

ISSN 0201–727X

РОСЖЕЛДОР
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО РГУПС)

ВЕСТНИК

**Ростовского государственного университета
путей сообщения**

Научно-технический журнал

№ 1 (93)

Ростов-на-Дону
2024

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор журнала

В.И. Колесников, академик Российской академии наук, заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор, РГУПС, г. Ростов-на-Дону

К.С. Ахвердиев, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

М.П. Бадёр, д-р техн. наук, проф., Московский государственный университет путей сообщения (МГУПС), г. Москва

А.В. Белый, член-корреспондент НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф., Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

А.В. Божениук, д-р техн. наук, проф., Южный федеральный университет (ЮФУ), г. Таганрог

М.А. Бутакова, д-р техн. наук, проф., Южный федеральный университет (ЮФУ), г. Ростов-на-Дону

В.Д. Верескун, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

А.Н. Гуда, д-р техн. наук, проф., заместитель главного редактора, РГУПС, г. Ростов-на-Дону

Ф. Даниэль, д-р физ.-мат. наук, проф., Университет дю Мэн, г. Ле-Ман, Франция

И.Д. Долгий, д-р техн. наук, проф., Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (НИИАС), г. Москва

Ю.И. Жарков, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

А.А. Зарифьян, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

В.В. Зырянов, д-р техн. наук, проф., Донской государственный технический университет (ДГТУ), г. Ростов-на-Дону

С.М. Ковалев, д-р техн. наук, проф., Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (НИИАС), г. Москва

И.В. Котенко, д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН), г. Санкт-Петербург

А.Г. Кочур, д-р физ.-мат. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

Н.Н. Лябах, д-р техн. наук, проф., Международная Академия Менеджмента и Технологий INTAMT, г. Дюссельдорф, Северный Рейн-Вестфалия, Германия

И.А. Майба, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

Э.А. Мамаев, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

Ю.Ф. Мигаль, д-р физ.-мат. наук, проф., Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону

И.С. Морозкин, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

В.И. Новакович, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

Ж. Палечек, д-р техн. наук, проф., Остравский технический университет, г. Острава, Чешская Республика

А.Д. Петрушин, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

Е.С. Свиццов, д-р техн. наук, проф., Петербургский государственный университет путей сообщения (ПГУПС), г. Санкт-Петербург

А. Сладковски, д-р техн. наук, проф., Силезский технический университет, г. Катовице, Польша

С.В. Соколов, д-р техн. наук, проф., Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ), г. Москва

В.А. Соломин, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

В. Стыскала, д-р, ассоц. проф., Остравский технический университет, г. Острава, Чешская Республика

В.Л. Сухоруков, д-р физ.-мат. наук, проф., Южный федеральный университет (ЮФУ), НИИ Физики, г. Ростов-на-Дону

В.Н. Таран, д-р физ.-мат. наук, проф., Донской государственный технический университет (ДГТУ), г. Ростов-на-Дону

В.А. Финоченко, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

О.Н. Числов, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

А.Н. Чукарин, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

В.В. Шаповалов, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

В.Л. Шаповалов, д-р техн. наук, доц., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

И.А. Яицков, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

А.О. Полунина, ответственный секретарь, РГУПС, г. Ростов-на-Дону

VESTNIK RGUPS
Scientific and Technical Journal

EDITORIAL BOARD

Editor-in-chief

- V.I. Kolesnikov**, academician of Russian Academy of Sciences, Honored Scientist of the Russian Federation, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- K.S. Akhverdiev**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- M.P. Bader**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Moscow State Transport University (MSTU), Moscow
- A.V. Belyj**, Corresponding member NAS of Belarus, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Physic Technical Institute NAS of Belarus, Minsk, Belarus
- A.V. Bozhenyuk**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Southern Federal University (SFedU), Taganrog
- M.A. Butakova**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Southern Federal University (SFedU), Rostov-on-Don
- V.D. Vereskun**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- A.N. Guda**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don (deputy editor-in-chief)
- Ph. Daniel'**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Universite du Maine, Le Mans, France
- I.D. Dolgiy**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications on Railway Transport, Moscow
- Y.I. Zharkov**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- A.A. Zarifyan**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- V.V. Zyryanov**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Don State Technical University (DSTU), Rostov-on-Don
- S.M. Kovalev**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications on Railway Transport, Moscow
- I.V. Kotenko**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg
- A.G. Kochur**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- N.N. Lyabakh**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, The International Academy for Management and Technology (INTAMT), Dusseldorf, North Rhine-Westphalia, Germany
- I.A. Mayba**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- E.A. Mamaev**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- Y.F. Migal**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Southern Scientific Centre of Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don
- I.S. Morozkin**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- V.I. Novakovich**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- Z. Palechek**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Technical University of Ostrava, Ostrava, Czech Republic
- A.D. Petrushin**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- E.S. Svintsov**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Petersburg State Transport University (PSTU), St. Petersburg
- A. Sladkowski**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Silesian University of Technology, Katowice, Poland
- S.V. Sokolov**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Moscow Technical University of Communication and Informatics (MTUCI), Moscow
- V.A. Solomin**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- V. Stýskala**, Doctor, PhD, Technical University of Ostrava, Ostrava, Czech Republic
- V.L. Sukhorukov**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Southern Federal University (SFedU), Research Institute of Physics, Rostov-on-Don
- V.N. Taran**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Don State Technical University (DSTU), Rostov-on-Don
- V.A. Finochenko**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- O.N. Chislov**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- A.N. Chukarin**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- V.V. Shapovalov**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- V.L. Shapovalov**, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- I.A. Yait'skov**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- A.O. Polunina**, executive secretary, RSTU, Rostov-on-Don

СОДЕРЖАНИЕ

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ, БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

Карпычев В.А., Болотина А.Б., Страхова А.В. Определение граничных характеристик авторежима тормозной системы грузового вагона из условия безюзового торможения....	8
Кульков А.А., Шинкарук А.С., Рафиков Р.Х. Повышение эффективности технологии предокрасочной подготовки кузовов вагонов с использованием модели формирования качества очистки поверхности.....	15
Курилкин Д.Н., Грачев В.В., Брагин А.Г. Учет переходных процессов в дизель-генераторной установке тепловоза при выполнении тяговых расчетов	22

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ И ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Разуваев Д.А., Чахлов М.Г. Экспериментальное определение двухпараметрического температурного критерия начала интенсивного криогенного влагопереноса в различных видах глинистых грунтов	35
Шаповалов В.Л., Архипов В.В., Кочур А.Г., Морозов А.В., Окост М.В. Влияние характеристик балластного материала на модуль деформации эксплуатируемого балластного слоя	45

УПРАВЛЕНИЕ И ЛОГИСТИКА НА ТРАНСПОРТЕ

Годованый К.А., Зырянов В.В., Колобов А.И., Мамаев Э.А. О моделях трансформации деятельности логистического оператора	55
Зубков В.Н., Мусиенко Н.Н. Анализ показателей и меры по их выполнению на припортовой грузовой станции Новороссийск	66
Колокольников В.С., Фалалеева Т.А. Влияние структуры поездопотока на пропускную способность станции и перегонов	79
Осинцев Н.А., Рахмангулов А.Н., Мишкурин П.Н., Корнилов С.Н., Мельников М.С. Концепция гибридной многокритериальной модели устойчивой цепи поставок	90
Сагайдак С.А., Графова Т.О., Муравьев А.В. Использование логистического аудита в транспортно-логистических компаниях	105
Чеботарева Е.А. Системный подход к исследованию сложных объектов (на примере припортовых транспортно-технологических систем)	113
Числов О.Н., Мизгирева Е.Е. Принципы формирования комплексного критерия оценки структуры транспортного узла.....	122

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

Карасев Д.Н., Костюков А.В., Соколов С.В., Решетникова И.В. Аппаратное решение задачи стохастической робастной дискретной фильтрации в бортовых системах управления локомотивов	132
--	-----

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,
АВТОМАТИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

Соловьев В.В., Федорова С.В. Требования и условия для перспективных диагностических комплексов и программного обеспечения железнодорожной инфраструктуры	141
Чудотворова К.М., Федоров А.В. Программирование цифрового автомата противоаварийной защиты для технологических установок нефтеперерабатывающего предприятия.....	151
Хохлов Н.С., Бокова О.И., Канавин С.В., Гилев И.В., Ртищев Р.В. Разработка интеллектуального программного модуля на основе аппарата нейронных сетей для визуализации и автоматического анализа характеристик спектров информационного сигнала и деструктивных воздействий.....	158

ТРАНСПОРТНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Блинкова С.А., Скольский А.В. Оценка остаточного ресурса изоляторов контактной сети.....	169
Доманский В.В. Интеллектуальная система анализа потерь энергии в тяговых сетях переменного тока для наполнения баз данных.....	176

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Азоян А.И., Мантуров Д.С., Шишияну Д.Н., Данильченко С.А. Экспериментальное исследование влияния температуры на физико-механические свойства композиционного материала	186
Ерзин О.А. Анализ конструкторского решения «интеллектуального» режущего инструмента для токарных операций отрезки	196
Ерзин О.А. Техническое обеспечение управления передним углом режущего клина на операциях отрезки	205
Крутова В.А., Чукарин А.Н., Порческо А.А. Моделирование возникновения вибраций в рамках мостовых кранов.....	212
Кудасова А.С. Теоретические исследования влияния воздушной составляющей шума на акустические характеристики в кабинах свайных копров.....	220
Майба И.А., Майба И.И. Исследование тягово-сцепных свойств локомотивов, оборудованных устройством активации трения.....	226
Отока А.Г., Холодилов О.В. Обнаружение подповерхностных дефектов в местах локализации «остаточных рисунков» на поверхности катания цельнокатаного колеса после восстановления его профиля на колесотокарном станке.....	233
Приймак А.Ю., Сербиновский М.Ю. Выбор перспективных материалов центробежных форсунок впрыскивающих пароохладителей	240
Яицков И.А., Поляков П.А., Федотов Е.С., Тагиев Р.С., Дедусенко Р.Н. Анализ неустановившихся процессов в тормозном устройстве дисково-колодочного типа при торможении.....	248

CONTENTS

ROLLING STOCK, TRAFFIC SAFETY

Karpychev V.A., Bolotina A.B., Strakhova A.V. Determination of the boundary characteristics of the auto mode of the brake system of a freight car from the condition of no-base braking.....	8
Kulkov A.A., Shinkaruk A.S., Rafikov R.H. Increasing the efficiency of pre-painting technology of car bodies using the model formation of surface cleaning quality	15
Kurilkin D.N., Grachev V.V., Bragin A.G. Accounting for transient processes in a locomotive diesel generator equipment when performing traction calculations	22

RAIL TRACK AND TRANSPORT CONSTRUCTION

Razuvaev D.A., Chakhlov M.G. Experimental determination of the two-parameter temperature criterion for the onset of intensive cryogenic moisture transfer in various types of clayey soils.....	35
Shapovalov V.L., Arkhipov V.V., Kochur A.G., Morozov A.V., Okost M.V. Influence of the characteristics of the ballast material on the deformation modulus of the operated ballast layer....	45

OPERATION AND LOGISTICS ON TRANSPORT

Godovany K.A., Zyryanov V.V., Kolobov A.I., Mamaev E.A. About the models of transformation of the logistics operator's activities	55
Zubkov V.N., Musienko N.N. Analysis of indicators and measures for their implementation at the Novorossiysk port cargo station.....	66
Kolokolnikov V.S., Falaleeva T.A. The influence of the train flow structure on the capacity of the station and of the adjoining span.....	79
Osintsev N.A., Rakhmangulov A.N., Mishkurov P.N., Kornilov S.N., Melnikov M.S. The concept of hybrid multicriteria model of sustainable supply chain	90
Sagaidak S.A., Grafova T.O., Muraviev A.V. The use of logistic audit in transport and logistics companies.....	105
Chebotareva E.A. A systematic approach to the study of complex objects (using the example of port transport and technological systems).....	113
Chislov O.N., Mizgireva E.E. Principles of forming a comprehensive criterion for evaluating the structure of transport hub	122

MODELING SYSTEMS AND PROCESSES

Karasev D.N., Kostyukov A.V., Sokolov S.V., Reshetnikova I.V. Hardware solution of the problem of stochastic robust discrete filtration in on-board locomotive control systems.....	132
--	-----

**INFORMATION TECHNOLOGIES, AUTOMATION
AND TELECOMMUNICATIONS**

Solovyov V.V., Fedorova S.V. Requirements and conditions for advanced diagnostic systems and software for railway infrastructure.....	141
Chudotvorova K.M., Fedorov A.V. Programming a digital emergency protection automatic for oil refining technological installations at enterprises.....	151
Khokhlov N.S., Bokova O.I., Kanavin S.V., Gilev I.V., Rtischev R.V. Development of an intelligent software module based on neural networks for visualization and automatic analysis of characteristics of information signal spectra and destructive impacts.....	158

POWER ENGINEERING ON TRANSPORT

Blinkova S.A., Skolskiy A.V. Assessment of the residual life of contact network insulators.....	169
Domansky V.V. Intelligent system for analysis of energy loss for ac traction networks for database updating.....	176

MECHANICAL ENGINEERING

Azojan A.I., Manturov D.S., Shishiyanu D.N., Danilchenko S.A. Experimental study of the influence of temperature on the physico-mechanical properties of a composite material.....	186
Erzin O.A. Analysis of the design solution of an “intelligent” cutting tool for turning operations.....	196
Erzin O.A. Technical support for front angle control wedge on cutting operations.....	205
Krutova V.A., Chukarin A.N., Porchesko A.A. Simulation of the occurrence of vibrations in the frames of overhead cranes	212
Kudasova A.S. Theoretical studies of the influence of the air component of noise on the acoustic characteristics in pile hopper cabins	220
Maiba I.A., Maiba I.I. Reseach of traction properties of locomotives equipped with a friction activation device	226
Otoka A.G., Kholodilov O.V. Detection of subsurface defects in places localization "residual patterns" on the surface riding a solid-rolled wheel after restoration its profile on a wheel-turning machine.....	233
Priymak A.Yu., Serbinovsky M.Yu. Selection of promising materials for centrifugal nozzles of injecting steam coolers.....	240
Yaitskov I.A., Polyakov P.A., Fedotov E.S., Tagiev R.S., Dedusenko R.N. Analysis of unsteady processes in the braking device disc-pad type when braking.....	248

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ, БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

УДК 62-592-52 629.4.067.4

DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_8

*В. А. Карпычев, А. Б. Болотина, А. В. Страхова***ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОРЕЖИМА ТОРМОЗНОЙ СИСТЕМЫ ГРУЗОВОГО ВАГОНА ИЗ УСЛОВИЯ БЕЗЪЮЗОВОГО ТОРМОЖЕНИЯ**

Аннотация. Рассмотрено решение актуальной задачи исследования ограничений, относящихся к авторежиму, которые накладываются на давление в тормозном цилиндре, что способствует обоснованию его рациональной характеристики давления от загрузки вагона. Подробно изучено условие недопущения юза, которое позволяет определить максимально допускаемое давление в тормозном цилиндре. В результате исследований получена зависимость давления в тормозном цилиндре из условия безъюзового торможения. Также выведена функция, являющаяся ограничением максимальных давлений при выборе параметров авторежима – функция допускаемых максимальных давлений в тормозном цилиндре от осевой нагрузки вагона для скорости, определяющей минимальное значение коэффициента сцепления.

Ключевые слова: авторежим, ограничение максимальных давлений, характеристики давления от загрузки вагона, условие недопущения юза, параметры системы.

Для цитирования: Карпычев, В. А. Определение граничных характеристик авторежима тормозной системы грузового вагона из условия безъюзового торможения / В. А. Карпычев, А. Б. Болотина, А. В. Страхова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1. – С. 8–14. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_8.

Введение

Авторежим – это устройство, входящее в пневматическую часть тормозной системы грузового вагона и предназначенное для регулирования давления в тормозном цилиндре при торможении в зависимости от загрузки вагона. Выбор характеристики регулирования давления является актуальной задачей, которая влияет не только на показатели и характеристики тормозной системы, но и определяет эффективность использования устройства, а также тормозной системы не только вагона, но и поезда в целом.

Существующие нормативы и рекомендации определяют ограничения, в пределах которых выбираются параметры системы. Такими ограничениями являются:

- непревышение предельных тормозных путей, значения которых устанавливаются из требований инфраструктуры, уклона пути, максимальной скорости движения, массы состава;
- непревышение предельной мощности, выделяемой в узле «колодка – колесо» при торможении, учитывающей ограничения по температурному нагреву;
- недопущение юза колесных пар при торможении и др.

Указанные ограничения представляются в виде условий, определяющих границы выбора параметров тормозной системы [1–10]. На практике сначала задаются параметры тормозной системы, затем определяются нормируемые величины и сравниваются с нормативными значениями. Полученные значения нормируемых величин не должны превышать нормируемых значений. Если имеет место превышение, то параметры тормозной системы корректируются. Таким образом, процесс обоснования параметров тормозной системы в общем случае носит итерационный характер.

Интерес представляет собой обратная задача, когда ограничения приводятся к параметрам системы и определяется область их выбора. Так, применительно к авторежиму актуальной является задача исследования ограничений, накладываемых на давление в тормозном цилиндре, что способствует обоснованию его рациональной характеристики давления от загрузки вагона. В данной статье рассмотрено решение задачи определения максимально допускаемого давления в тормозном цилиндре из условия недопущения юза.

Вывод формулы для определения максимально допускаемого давления в тормозном цилиндре из условия недопущения юза

Согласно [2] для условий безъюзового торможения должно соблюдаться условие

$$\delta_p \varphi_{кр} \leq f |\psi_p|, \quad (1)$$

где δ_p – расчетный коэффициент силы нажатия тормозных колодок, зависит от параметров тормозной системы и вагона; $\varphi_{кр}$ – расчетный коэффициент трения колодок, зависит от типа колодок и скорости движения; f – коэффициент, учитывающий обезгрузку тележки при торможении; $|\psi_p|$ – расчетный допускаемый коэффициент сцепления колеса с рельсом.

Исходя из (1), для максимальных значений δ_p можем записать

$$\delta_p = \frac{f |\psi_p|}{\varphi_{кр}}. \quad (2)$$

С другой стороны

$$\delta_p = \frac{m K_p}{q K_{осей}}, \quad (3)$$

где K_p – расчетная сила нажатия тормозной колодки; m – количество колодок на вагоне; q – осевая нагрузка вагона; $K_{осей}$ – количество осей на вагоне.

Приравнявая (2) и (3), получаем

$$\frac{f |\psi_p|}{\varphi_{кр}} = \frac{m K_p}{q K_{осей}}. \quad (4)$$

Решая относительно K_p , получаем

$$K_p = \frac{f |\psi_p| q K_{осей}}{m \varphi_{кр}}. \quad (5)$$

Вместе с этим расчетная сила нажатия колодки на колесо определяется через действительные нажатия в виде [2]

$$K_p = a K_d \frac{d K_d + b}{c K_d + b}, \quad (6)$$

где K_d – действительное нажатие колодки на колесо; a, b, c, d – коэффициенты, зависящие от материала изготовления тормозных колодок.

Приравниваем правые части:

$$\frac{f |\psi_p| q K_{осей}}{m \varphi_{кр}} = a K_d \frac{d K_d + b}{c K_d + b}. \quad (7)$$

Введем обозначение

$$X = \frac{f |\psi_p| q K_{осей}}{m \varphi_{кр}}.$$

Произведем замену в выражении (7):

$$X = a K_d \frac{d K_d + b}{c K_d + b}. \quad (8)$$

Решаем относительно K_d . Приводим к общему знаменателю:

$$X(c K_d + b) = a K_d (d K_d + b). \quad (9)$$

Раскрываем скобки:

$$X c K_d + X b = a d K_d^2 + a K_d b. \quad (10)$$

Переносим все в правую часть:

$$a d K_d^2 + a K_d b - X c K_d - X b = 0. \quad (11)$$

Вынесем за скобки действительную силу нажатий:

$$a d K_d^2 + K_d (a b - X c) - X b = 0. \quad (12)$$

В результате получаем квадратное уравнение.

Произведем замену:

$$\begin{aligned} ad &= k; \\ ab - cX &= l; \\ Xb &= j. \end{aligned} \quad (13)$$

В итоге получаем

$$kK_d^2 + lK_d - j = 0. \quad (14)$$

Решаем относительно K_d :

$$K_{d1,2} = \frac{-l \pm \sqrt{l^2 + 4kj}}{2k}. \quad (15)$$

Исследуя данную зависимость, получаем, что по условию торможения действительная сила нажатий всегда больше нуля. Коэффициент $ad = k$ всегда положителен. В результате, если $K_d > 0$, то числитель должен быть положительным, т.е.

$$-l \pm \sqrt{l^2 + 4kj} > 0.$$

Заметим, что для выражения $ab - Xc = l$ мы не можем установить знак. Тогда в общем случае получаем:

$$\text{если } l > 0, \text{ то } K_{d1} = \frac{-l + \sqrt{D}}{2k}, K_{d2} = \frac{-l - \sqrt{D}}{2k};$$

$$\text{если } l < 0, \text{ то } K_{d1} = \frac{+l + \sqrt{D}}{2k}, K_{d2} = \frac{+l - \sqrt{D}}{2k},$$

где $D = l^2 + 4kj$.

Заметим, что $k > 0$ и $j > 0$. Тогда

$$l^2 < l^2 + 4kj,$$

поэтому всегда

$$\sqrt{D} > l.$$

В результате приходим к выводу, что:

$$\text{если } l > 0, \text{ то } K_{d1} = \frac{-l + \sqrt{D}}{2k} > 0, K_{d2} = \frac{-l - \sqrt{D}}{2k} < 0;$$

$$\text{если } l < 0, \text{ то } K_{d1} = \frac{+l + \sqrt{D}}{2k} > 0, K_{d2} = \frac{+l - \sqrt{D}}{2k} < 0.$$

Так как действительные нажатия всегда положительные, то в зависимости от знака l корнями уравнения будут следующие:

$$K_{d1} = \frac{-l + \sqrt{D}}{2k}; \quad (16)$$

$$K_{d2} = \frac{l + \sqrt{D}}{2k}. \quad (17)$$

При этом для конкретного значения l имеется одно значение действительного нажатия. Отсюда в общем случае получаем одно решение:

$$K_d = \frac{-l + \sqrt{D}}{2k}. \quad (18)$$

Таким образом, зависимость (18) позволяет определить максимальные действительные нажатия колодки на колесо из условия отсутствия юза. Данное уравнение можно рассматривать относительно различных параметров тормозной системы. В нашем случае представляет интерес определение граничных значений давления в тормозных цилиндрах.

Для определения граничных значений давления из условий безюзового торможения воспользуемся известным выражением [2]

$$K_D = \frac{1}{1000} \left(\frac{\pi d_{ц}^2}{4} p_{ц} \eta_{ц} - F_1 - F_2 \right) n \eta_{трп}, \text{ тс}, \quad (19)$$

где d – диаметр тормозного цилиндра; $p_{ц}$ – давление в тормозном цилиндре; $\eta_{ц}$ – коэффициент полезного действия тормозного цилиндра; F_1 – усилие сжатия внутренней отпусковой пружины тормозного цилиндра; F_2 – усилие пружины авторегулятора рычажной передачи, приведенной к штоку тормозного цилиндра; n – передаточное число рычажной передачи; $\eta_{трп}$ – коэффициент полезного действия тормозной рычажной передачи.

В полученном выражении мы можем не учитывать силы F_1 и F_2 . Данные силы характеризуют силовые потери, вызванные сжатием пружины авторегулятора и пружины тормозного цилиндра при торможении. Если мы не будем учитывать потери, это позволит нам определить максимальные граничные значения действительных нажатий или давления в тормозном цилиндре, создаваемого авторегулятором, из условия недопущения юза. Для реальной системы при расчете действительных нажатий потери учитываются и значения получатся несколько меньше. Данный факт позволяет говорить о получении решений с некоторым запасом на величину потерь.

Решаем задачу с учетом принятых допущений. Преобразуем выражение (19):

$$\frac{-l + \sqrt{D}}{2k} = \frac{1}{1000} \left(\frac{\pi d_{ц}^2}{4} p_{ц} \eta_{ц} \right) n \eta_{трп}.$$

Как и ранее, произведем замену величин l , k , j , D выражениями, представленными выше. В результате получаем

$$\frac{-(ab - cX) + \sqrt{(ab - cX)^2 + 4aXb}}{2ad} = \frac{1}{1000m} \left(\frac{\pi d_{ц}^2}{4} p_{ц} \eta_{ц} \right) n \eta_{трп}. \quad (20)$$

Введем обозначение

$$R = \frac{1}{1000m} \left(\frac{\pi d_{ц}^2}{4} p_{ц} \eta_{ц} \right) n \eta_{трп}. \quad (21)$$

После замены в (20) получаем

$$\frac{-(ab - cX) + \sqrt{(ab - cX)^2 + 4adXb}}{2ad} = R. \quad (22)$$

Проведем преобразования выражения (22) и получим

$$adR^2 + R(ab - cX) - Xb = 0.$$

Решаем относительно R :

$$R_{1,2} = \frac{-(ab - cX) \pm \sqrt{(ab - cX)^2 + 4adXb}}{2ad}.$$

Исследуем данное выражение на отрицательность и положительность корней. Для упрощения произведем замену (13), получаем

$$R_{1,2} = \frac{-l \pm \sqrt{(l)^2 + 4kj}}{2k}.$$

Проверим выражение на отрицательность корней. Так как $k > 0$ и $\sqrt{l^2 + 4kj} > l$, получаем следующие корни:

$$R_1 = \frac{-l + \sqrt{(l)^2 + 4kj}}{2k} > 0;$$

$$R_2 = \frac{-l - \sqrt{(l)^2 + 4kj}}{2k} < 0.$$

Учтём, что R изначально величина положительная, следовательно, уравнение имеет одно положительное решение

$$R_1 = \frac{-l + \sqrt{(l)^2 + 4kj}}{2k}. \quad (23)$$

В уравнение (21) подставим выражение для R и решим относительно $p_{ц}$, раскрывая коэффициенты:

$$\frac{1}{1000m} \left(\frac{\pi d_{ц}^2}{4} p_{ц} \eta_{ц} \right) n \eta_{трп} = \frac{-l + \sqrt{(l)^2 + 4kj}}{2k},$$

где $l = ab - Xc$; $k = ad$; $j = Xb$.

Подставляя выражения для l, k, j , получаем

$$\frac{1}{1000m} \left(\frac{\pi d_{ц}^2}{4} p_{ц} \eta_{ц} \right) n \eta_{трп} = \frac{-(ab - cX) \pm \sqrt{(ab - cX)^2 + 4adXb}}{2ad}.$$

Решаем относительно $p_{ц}$:

$$p_{ц} = \frac{4000m \left[-(ab - cX) + \sqrt{(ab - cX)^2 + 4adXb} \right]}{2adn\eta_{трп}\eta_{ц}\pi d_{ц}^2}. \quad (24)$$

Подставляя

$$X = \frac{f[\psi_p]qK_{осей}}{m\varphi_{кр}}$$

в (24), получаем

$$p_{ц} = \frac{4000m \left[-\left(ab - \left(\frac{f[\psi_p]qK_{осей}}{m\varphi_{кр}} \right) c \right) + \sqrt{\left(ab - \left(\frac{f[\psi_p]qK_{осей}}{m\varphi_{кр}} \right) c \right)^2 + 4a \left(\frac{f[\psi_p]qK_{осей}}{m\varphi_{кр}} \right) b} \right]}{2adn\eta_{трп}\eta_{ц}\pi d_{ц}^2}, \quad (25)$$

где f – коэффициент, учитывающий обезгрузку тележки при торможении; a, b, c, d – коэффициенты, зависящие от материала изготовления тормозных колодок; $\varphi_{кр}$ – расчетный коэффициент трения, $\varphi_{кр} = a^*V \frac{V+b^*}{c^*V+b^*}$; a^*, b^*, c^* – коэффициенты для определения расчетного коэффициента трения, зависящие от материала изготовления тормозных колодок [2]; $[\psi_p] = \psi_q \psi_V$, ψ_q – функция от осевой нагрузки, $\psi_q = 0,17 - 0,00150(q - 5)$; ψ_V – функция от скорости, $\psi_V = \frac{V+b^{**}}{c^{**}V+b^{**}}$; b^{**}, c^{**} – коэффициенты для определения функции скорости, зависящие от динамических свойств подвижного состава [2].

Заключение

Таким образом, получена зависимость давления в тормозном цилиндре из условия безюзового торможения. Если принять во внимание, что для конкретного вагона эксплуатационными характеристиками являются скорость и осевая нагрузка, то для скорости, определяющей минимальное значение коэффициента сцепления, получаем функцию допускаемых максимальных давлений в тормозном цилиндре от осевой нагрузки вагона. Данная функция является ограничением максимального давления при выборе параметров авторежима.

Список литературы

1 ГОСТ 34434–2018. Тормозные системы грузовых железнодорожных вагонов. Технические требования и правила расчета. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 31 с.

References

1 GOST 34434–2018. Braking systems for freight railway cars. Technical requirements and calculation rules. – Moscow : Standardinform, 2018. – 31 p.

- 2 Расчет и проектирование пневматической и механической частей тормозов вагонов : учебное пособие для вузов железнодорожного транспорта / П. С. Анисимов, В. А. Юдин, А. Н. Шамаков, С. Н. Коржин ; под редакцией П. С. Анисимова. – Москва : Маршрут, 2005. – 248 с. – ISBN 5-89035-292-X.
- 2 Calculation and design of pneumatic and mechanical parts of car brakes : Textbook for railway universities. transport / P. S. Anisimov, V. A. Yudin, A. N. Shamakov, S. N. Korzhin ; Ed. P. S. Anisimov. – Moscow : Marshrut, 2005. – 248 p. – ISBN 5-89035-292-X.
- 3 **Иноземцев, В. Г.** Тормоза железнодорожного подвижного состава : Вопросы и ответы. – 3-е изд., стереотипное / В. Г. Иноземцев. – Москва : Транспорт, 1987. – 207 с.
- 3 **Inozemtsev, V. G.** Brakes of railway rolling stock : Questions and answers. – 3rd ed., stereotypical / V. G. Inozemtsev. – Moscow : Transport, 1987. – 207 p.
- 4 **Карпычев, В. А.** Разработка метода системного анализа автотормоза грузового подвижного состава : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук : 05.22.07 / Карпычев Владимир Александрович. – Москва, 2000. – 316 с.
- 4 **Karpychev, V. A.** Development of a method for system analysis of automatic brakes on freight rolling stock : dis. Dr. Tech. Sciences : 05.22.07 / Karpychev Vladimir Aleksandrovich. – Moscow, 2000. – 316 p.
- 5 Классификатор. Основные неисправности грузовых вагонов (К ЖА 2005) / Дирекция совета по железнодорожному транспорту государств–участников содружества, информационно-вычислительный центр железнодорожной администраций. – Москва, 2005. – 16 с.
- 5 Classifier. Main malfunctions of freight cars (K ZhA 2005) / Directorate of the Council on Railway Transport of the Commonwealth Member States, information and computing center of railway administrations. – Moscow, 2005. – 16 p.
- 6 **Крылов, В. И.** Тормоза подвижного состава / В. И. Крылов, Е. В. Клыков, В. Ф. Ясенцев. – Москва : Транспорт, 1980. – 274 с.
- 6 **Krylov, V. I.** Rolling stock brakes / V. I. Krylov, E. V. Klykov, V. F. Yasentsev. – Moscow : Transport, 1980. – 274 p.
- 7 **Карпычев, В. А.** Решение задачи обоснования основной функции противоюзной системы в рамках системного анализа на основе метода дерева отказов / В. А. Карпычев, А. М. Шеньков // Труды МФТИ. – Том 10. – Москва, 2018. – С. 75–80.
- 7 **Karpychev, V. A.** Solving the problem of substantiating the main function of the anti-skid system within the framework of system analysis based on the fault tree method / V. A. Karpychev, A. M. Shenkov // Proceedings of MIPT. – Vol. 10. – Moscow, 2018. – P. 75–80.
- 8 Тормозное оборудование локомотивов : иллюстрированное пособие / А. П. Малыхин. – Москва, 2015. – 109 с.
- 8 **Malykhin, A. P.** Braking equipment for locomotives : Illustrated manual / A. P. Malykhin. – Moscow, 2015. – 109 p.
- 9 **Асадченко, В. Р.** Автоматические тормоза подвижного состава / В. Р. Асадченко. – Москва : Маршрут, 2006. – 392 с. – ISBN 5-89035-275-X.
- 9 **Asadchenko, V. R.** Automatic brakes for rolling stock / V. R. Asadchenko. – Moscow : Marshrut, 2006. – 392 p. – ISBN 5-89035-275-X.
- 10 Тормозное оборудование железнодорожного подвижного состава : справочник. – Москва : Транспорт, 1989. – 487 с.
- 10 Braking equipment for railway rolling stock : Directory. – Moscow : Transport, 1989. – 487 p.

V. A. Karpychev, A. B. Bolotina, A. V. Strakhova

DETERMINATION OF THE BOUNDARY CHARACTERISTICS OF THE AUTO MODE OF THE BRAKE SYSTEM OF A FREIGHT CAR FROM THE CONDITION OF NO-BASE BRAKING

Abstract. This paper considers the solution to the current problem of studying the restrictions related to auto mode, which is imposed on the pressure in the brake cylinder helping to substantiate its rational characteristics of pressure from car loading. This paper studies in detail the condition for preventing skidding, which provides determination of the maximum permissible pressure in the brake cylinder. The dependence of the pressure in the brake cylinder was obtained from the condition of skidless braking. A function is also derived that is a limitation of the maximum pressures in choosing auto mode parameters such as a function of

the permissible maximum pressures in the brake cylinder from the axial load of the car for a speed that determines the minimum value of the adhesion coefficient.

Keywords: auto mode, limitation of maximum pressures, pressure characteristics from car loading, condition for preventing skidding, system parameters.

For citation: Karpychev, V. A. Determination of the boundary characteristics of the auto mode of the brake system of a freight car from the condition of no-base braking / V. A. Karpychev, A. B. Bolotina, A. V. Strakhova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 1. – P. 8–14. – DOI 10.46973/0201–727X_2024_1_8.

Сведения об авторах

Карпычев Владимир Александрович

Российский университет транспорта (МИИТ),
кафедра «Машиноведение, проектирование,
стандартизация и сертификация»,
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой,
заместитель директора института,
начальник отдела информатизации,
e-mail: kv119@yandex.ru

Болотина Александра Борисовна

Российский университет транспорта (МИИТ),
кафедра «Машиноведение, проектирование,
стандартизация и сертификация»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: abbolotina@yandex.ru

Страхова Арина Владимировна

Российский университет транспорта (МИИТ),
студент,
e-mail: arishastrakhova543@gmail.com

Information about the authors

Karpychev Vladimir Alexandrovich

Russian University of Transport (MIIT),
Chair «Mechanical Engineering, Design,
Standardization and Certification»,
Doctor of Engineering Sciences,
Associate Professor,
Head of the Chair,
Deputy Director of the Institute,
Head of the Informatization Department,
e-mail: kv119@yandex.ru

Bolotina Alexandra Borisovna

Russian University of Transport (MIIT),
Chair «Mechanical Engineering, Design,
Standardization and Certification»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: abbolotina@yandex.ru

Strakhova Arina Vladimirovna

Russian University of Transport (MIIT),
Student,
e-mail: arishastrakhova543@gmail.com

А. А. Кульков, А. С. Шинкарук, Р. Х. Рафиков

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПРЕДОКРАСОЧНОЙ ПОДГОТОВКИ КУЗОВОВ ВАГОНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТИ

Аннотация. Представлены результаты исследований по улучшению процесса предокрасочной подготовки кузовов вагонов на основе моделирования процесса очистки и формирования качества поверхности. В работе проведено исследование физико-механических свойств сред эксплуатационных загрязнений, находящихся на кузовной части подвижного состава при приемке в ремонт. Результаты показали, что большинство типов загрязнений могут быть соотнесены по шкале твердости Мооса с известными материалами, что существенно облегчает их исследование. На основе полученных данных в статье предложена модель очистки и формирования качества предокрасочной подготовки поверхности, применяемая перед нанесением лакокрасочного покрытия. Модель имеет практическое применение в виде конкретных технологических режимов обработки, приведенных в статье.

Ключевые слова: подвижной состав, кузов, ремонт, предокрасочная обработка, качество.

Для цитирования: Кульков, А. А. Повышение эффективности технологии предокрасочной подготовки кузовов вагонов с использованием модели формирования качества очистки поверхности / А. А. Кульков, А. С. Шинкарук, Р. Х. Рафиков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1. – С. 15–21. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_15.

Введение

Продолжительность эксплуатации кузовных элементов подвижного состава зависит от качества лакокрасочного покрытия, нанесенного на них, так как кузов в процессе эксплуатации подвергается вредному природному и техногенному воздействию: температурный нагрев на солнце, влияние паров воды и кислорода, а также абразивное воздействие запыленного воздуха [7]. Правильно подобранные современные лакокрасочные материалы способны обеспечить выполнение всех требований к надежной антикоррозионной защите подвижного состава и существенно продлить долговечность срока его службы.

Качественное нанесение защитных покрытий на вагоны в специализированных цехах обеспечивается применением специального окрасочного оборудования, обеспечивающего распыление материалов различной вязкости и плотности, а также за счет привлечения квалифицированных специалистов. Качественная сушка, как важный технологический этап окраски, осуществляется в специальных камерах окрасочных цехов, воздух в которых нагревается до нужных температур электрическим или газовым способами.

В то же время для новых лакокрасочных покрытий нужен и совершенно иной качественный уровень подготовки поверхности к окрашиванию, тогда как технологии подготовки поверхности не менялись уже длительное время и устарели. Их использование не позволяет качественно подготовить поверхность к окраске современными лакокрасочными материалами, при том что антикоррозионная защита может быть эффективной лишь при проведении тщательной очистки поверхности перед окрашиванием. В настоящее время подготовка является наиболее грязным, неэкологичным, вредным и трудоёмким этапом окраски поверхности, загрязняющим окружающую среду и требующим от ремонтного предприятия решения серьезных экологических задач по утилизации отходов [8]. Одной из главных проблем является утилизация моечных растворов, отходов от очистки и окраски, что приводит к серьёзному удорожанию окрасочного производства, в результате себестоимость окрасочных работ существенно повышается [2, 9], увеличивая конечную стоимость ремонта.

В настоящее время в локомотивных и вагонных депо применяют различные методы очистки деталей и узлов [6]. К ним относятся механические, химические, струйные, пневмоабразивные, гидроабразивные, термические и другие способы. Подготовка поверхности подвижного состава к окраске обычно состоит из таких технологических этапов, как обмывка внешней поверхности, демонтаж навесного оборудо-

вания, установка защитных экранов, обработка поверхности свободным абразивом, грунтование, шлифование, герметизация, местное шпатлевание и сушка. В среднем трудоёмкость технологического процесса по обработке одного кузова пассажирского вагона занимает около 24 часов. При этом расходуется достаточно большой объем моечных жидкостей, требующих утилизации, дробы или других свободных абразивов, а также специальных обезжиривающих составов. Оценочные расчеты операционных расходов на ремонт кузова показывают, что на себестоимость работ по восстановлению лакокрасочного покрытия приходится каждый восьмой рубль от общей стоимости ремонта, а трудовые затраты на подготовку к окрашиванию превосходят трудозатраты на само окрашивание более чем в 2 раза.

Исходя из этого, возникает вопрос о разработке и применении новой, более эффективной технологии подготовки поверхности. Газодинамический метод является более эффективным по сравнению с традиционными методами очистки и может быть применен в железнодорожной отрасли. Применение данного способа позволит увеличить скорость очистки и обезжиривания поверхности, однако для его эффективного применения необходимо изучение закономерностей взаимодействия между газодинамическим потоком и кузовом вагона, во избежание его повреждения или порчи при обработке. Также необходим анализ физико-механических свойств среды эксплуатационных загрязнений для получения возможности прогнозирования скорости ее разрушения. Это позволит вкладывать в очистку лишь минимально необходимое количество энергии, достаточное для разрушения среды загрязнений, что существенно повысит эффективность процесса подготовки поверхности в целом. Исследование физико-механических свойств эксплуатационных загрязнений позволяет оптимизировать процесс очистки, выведя её эффективность на новый уровень.

Основная часть

Изучение свойств эксплуатационных загрязнений начинается с исследования скорости разрушения этой среды под действием газодинамического потока. С этой целью исследуется столкновение частицы абразива с поверхностью и рассчитываются параметры оставляемых срезов. С использованием теоретической модели столкновения определяется глубина врезания частицы в среду, если предполагается, что весь деформированный материал будет удалён или разрушен. В то же время при столкновении не происходит деформация частицы, а лишь поверхности среды загрязнений, приводя к образованию на поверхности среза вытянутой формы, глубина которого определяется путем применения закона контактного взаимодействия двух тел [3, 10]. Таким образом, максимальная глубина образующихся на поверхности срезов может быть исследована и оценена количественно.

Глубина среза, полученного от столкновения частицы дробы и поверхности, характеризуется массой частицы, её скоростью при столкновении и физико-механическими свойствами частицы дробы и разрушаемой среды загрязнений. Также установлено, что глубина и диаметр оставляемого частицей следа меняются прямо пропорционально изменению скорости и массы частиц, составляя около четверти диаметра частиц при скорости 50 м/с в случае применения кварцевого песка как абразива. Используя более твердый материал – стальную или чугунную дробь, можно достичь изменения глубины и ширины среза до 50 % от диаметра частиц при тех же скоростях.

Исследования показали, что твердость частиц абразива, твердость обрабатываемого материала, скорость частицы, угол столкновения и диаметр являются основными факторами, оказывающими влияние на глубину врезания. Рассмотрим их по отдельности.

Твердость частицы абразива является одним из основных факторов при столкновении, от которого зависит кинетическая энергии частицы, идущая на полезную работу (деформирование и разрушение обрабатываемого материала) и расход энергии на бесполезную работу (деформирование и разрушение самой частицы, упругое отталкивание). Больше бесполезной работы совершается в случае снижения твердости материала частицы. Основным материалом для изготовления абразивов, применяемых при ремонте вагонов и локомотивов, является сталь, чугун, минералы и отходы литейного производства – шлаки и окислы. Оценка твердости абразивов металлической основы осуществляется по шкале Бринелля и Виккерса, а минеральные абразивы, шлаки и окислы оцениваются по шкале Мооса [5].

Твердость разрушаемой среды загрязнений является следующим фактором, влияющим на скорость ее разрушения. Более твердая поверхность создает условия к совершению частицами большего объема бесполезной работы, что в результате снижает скорость очистки.

Следующий фактор, скорость частицы, характеризует величину кинетической энергии столкновения. Более высокая скорость частиц создает большую кинетическую энергию единичных столкновений, и как результат, очистка производится эффективнее. Специфика применения газодинамических установок свидетельствует о том, что скорость частиц перед столкновением с обрабатываемой

поверхностью зависит от режима работы газодинамической установки и расстояния от сопла до обрабатываемой поверхности. Форма следа при столкновении частицы и поверхности зависит от угла столкновения. След становится меньшей глубины и принимает продолговатую форму в случае столкновения под острым углом и является круглым и более глубоким при более тупом угле. Масса разрушенного материала при этом существенно не меняется. Обработка под углом более 30° не влияет существенно на скорость очистки. В то же время для формирования шероховатости поверхностного слоя угол обработки важен.

Следующий фактор – диаметр частицы абразива, оказывающий влияние на размер следа частицы и величину разрушаемой области. Габариты оставляемого следа напрямую зависят от размеров частицы. Кроме того, крупные и массивные частицы абразива двигаются инертнее, ускоряясь газодинамическим потоком медленнее и набирая меньшую скорость, чем мелкие и легкие частицы [1].

В уравнениях для определения глубины среза применяется коэффициент f , характеризующий физико-механические свойства среды загрязнений, значения которого для большинства сред загрязнений не известны. Для его определения были проведены исследования разных типов загрязнений путем нанесения царапин на загрязненные образцы. Исследования показали, что большинство типов эксплуатационных загрязнений подвижного состава, приходящего в ремонт, по показателям твердости соответствуют распространенным неметаллическим материалам, таким как, например, асбест или прессованная ткань бельтинг.

Эти данные были получены путем соотношения по шкале Мооса сред загрязнений с выбранными материалами. Применение материала заменителя (асбеста и бельтинга) в экспериментах позволяет исследовать их скорость разрушения под действием газодинамического потока. Получив скорость разрушения материалов заменителей, можно предположить, что с той же скоростью будет происходить и разрушение среды загрязнений, что позволяет экстраполировать полученные экспериментальные данные на соответствующие загрязнения. По результатам исследований установлено, что основные типы загрязнений имеют следующий класс твердости по шкале Мооса: асфальтоподобные наслоения – 5 класс; нагар, коррозия и старое лакокрасочное покрытие – 10 класс твердости.

Материалы – заменители среды загрязнений и их свойства

Фотография	Наименование типа загрязнений	Консистенция	Примерный класс твердости по шкале Мооса	Материал-заменитель	Фотография
	Асфальтоподобные наслоения	Твердое	~ 5 (царапается пластиком)	Асбест	
	Нагар	Твёрдое Хрупкое	~ 10 (царапается металлом)	Бельтинг	
	Коррозия	Твёрдое Хрупкое	~ 10 (царапается металлом)	Бельтинг	
	Старое лакокрасочное покрытие	Твёрдое	~ 10 (царапается металлом)	Бельтинг	

Знание физико-механических свойств среды загрязнений позволяет прогнозировать скорость ее разрушения, что, в свою очередь, поможет достичь максимального КПД процесса очистки, вкладывая в столкновение только то количество энергии, которое необходимо для разрушения среды, фактически без совершения посторонней работы.

Разрушение среды загрязнений под действием газодинамического потока – сложный и многофакторный процесс. Для его оценки введём величину ψ – средняя глубина разрушения, оставляемая одной частицей абразива заданной твёрдости, массы и скорости в среде загрязнений известных физико-механических свойств. Параметр ψ позволяет оценить точечную разрушающую способность газодинамической струи. Одной из проблем, связанных с величиной ψ является непредсказуемость механики разрушения большинства сред загрязнений. Она была решена через получение таблицы соотношений сред загрязнений с известными материалами. После этого, через оценку точечной разрушающей способности частиц возможно смоделировать технологический цикл очистки с высокой точностью, что в свою очередь позволит через правильное регулирование режимов обработки, достичь производительности и качества очистки на значительно более высоком уровне.

Математическое моделирование технологических процессов позволяет оценить их с той точностью, которая недостижима при простой производственной отладке. Процессы обработки свободным абразивом, как правило, смоделированы под конкретные технологические условия в определенной отрасли. Это обусловлено тем, что процесс обработки свободным абразивом – сложная для моделирования среда и расширение условий при создании модели приводит к резкому снижению её точности. Эта проблема актуальна и при моделировании процесса газодинамической обработки, где ко всему прочему добавляется еще и фактор температурного воздействия на среду загрязнений, наряду с механическим. Ниже представлена схема воздействия газодинамического потока на среду загрязнений обшивки кузова.

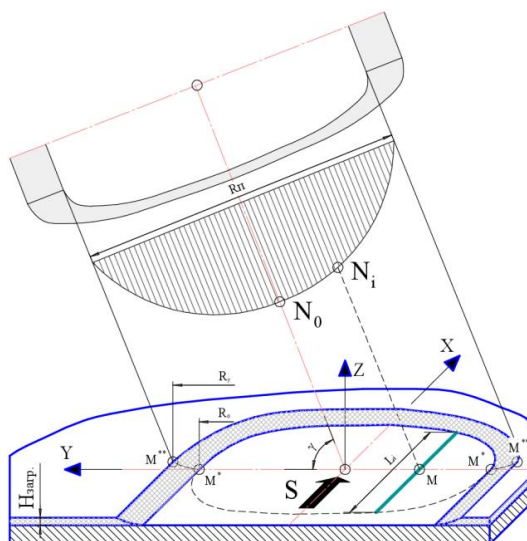


Схема воздействия газодинамического потока на поверхность обшивки кузова:

N_i – количество частиц, попадающих в точку M в единицу времени (частиц/с), N_0 – количество частиц в единицу времени в центре потока (частиц/с), R_n – радиус газодинамического потока (мм), M – произвольная точка в пятне контакта, M^* – точка на краю зоны очистки, M^{**} – точка на краю пятна контакта, R_y – проекция радиуса газодинамического потока на плоскость очистки (мм), R_0 – радиус очистки (мм), L_i – траектория движения точки M по площади пятна контакта (мм), S – скорость поперечной подачи сопла (м/с)

Полагая, что условием полной очистки в точке M должно быть то, что глубина разрушения H_i должна быть равна толщине слоя загрязнений $H_{загр.}$, можно записать уравнение для скорости подачи сопла S , обеспечивающей выполнение данного условия:

$$S = N_i \cdot \psi_{ср} \cdot \frac{L_i}{H_{загр.}}$$

Очевидно, что точка M^* (см. рисунок), находящаяся ближе к краю пятна контакта, испытает менее интенсивное по силе и более короткое по времени воздействие газодинамического потока. Глубина разрушения в ней будет меньше. Точка M^{**} на краю пятна контакта вообще не испытывает никакого воздействия. Критерием очистки можно считать разрушение слоя среды загрязнения в критической точке. Однако такой точки в пятне контакта нет. Точки, более удаленные от центра, испытывают меньше воздействия.

Таким образом, параметр R_o характеризует удаленность точки M^* от центра пятна контакта и устанавливает границу зоны очистки. При этом участок между R_n и R_o^* (см. рисунок) можно считать зоной получистки, где частично остается среда загрязнений.

Параметр R_o и скорость подачи S (м/с) связаны напрямую. С уменьшением радиуса очистки R_o , возрастает скорость подачи (м/с), иными словами, скорость подачи большая, но оставляет за собой более узкий очищающий след.

Так же следует отметить, что эффективную работу по удалению среды загрязнений совершает та область газодинамического потока, которая находится по окружности между точками M^* и M^{**} . Остальные области между точкой M^* и центром пятна контакта совершают работу по деформированию поверхности обшивки кузова.

Рассмотрим вариант решения этой проблемы, при условии что сопло движется автоматизированно с постоянной скоростью подачи S (м/с). Тогда единственным очевидным способом повышения энергоэффективности работы газодинамического потока будет обработка внахлест. Пятно контакта движется по поверхности, наполовину пересекая прошлый очищенный след, то есть $\Delta l = R_y$, тогда заштрихованная область пятна контакта будет совершать уже двойную работу по очистке, тем самым повысив эффективность процесса. При автоматической обработке возможно регулирование подачи с погрешностью позиционирования менее 1 мм. При таких условиях можно выбрать траекторию обработки, при которой эффективность будет максимальна.

Выводы

В результате проведенных исследований физико-механических свойств среды загрязнений и созданной модели предложены следующие энергоэффективные режимы очистки поверхностей кузовной части подвижного состава. Их классификация производится в зависимости от производительности и состоит из пяти групп. Ниже перечислены параметры каждого из режимов газодинамической обработки, используемые для очистки различных типов эксплуатационных загрязнений в зависимости от их толщины [4].

Перечисленные режимы позволяют не только очищать различные типы загрязнённых поверхностей локомотивов и вагонов при ремонте, но и применять при подготовке металлических поверхностей нового кузова к заводской окраске с наименьшим расходом энергии и высоким качеством.

Список литературы

- 1 **Кульков, А. А.** Особенности абразивно-струйной обработки металлических поверхностей перед окрашиванием / А. А. Кульков, М. А. Ларионов // Научные технологии в машиностроении. – 2018. – № 12 (90). – С. 15–20. – ISSN 2223-4608.
- 2 **Кульков, А. А.** Оценка эффективности процесса обработки поверхностей вагонов перед окраской / А. А. Кульков, Д. Г. Евсеев, А. Ю. Коротков // Металлообработка. – 2016. – № 4 (94). – С. 66–67. – ISSN 1684-6702.
- 3 **Куликов, М. Ю.** Оценка технико-экономической эффективности процесса абразивоструйной обработки металлических элементов кузовов железнодорожных вагонов / М. Ю. Куликов, А. А. Кульков // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2019. – № 6 (79). – С. 65–68. – ISSN 1999-8775.
- 4 **Куликов, М. Ю.** Технико-экономические особенности обработки поверхностей вагонов перед окрашиванием / М. Ю. Куликов, А. А. Кульков // Научные технологии в машиностроении. – 2019. – № 5 (95). – С. 39–41. – ISSN 2223-4608.
- 5 **Кульков, А. А.** Ультразвуковое жидкостное матирование металлических поверхностей /

References

- 1 **Kulkov, A. A.** Features of abrasive-jet treatment of metal surfaces before staining / A. A. Kulkov, M. A. Larionov // High-tech technologies in mechanical engineering. – 2018. – No. 12 (90). – P. 15–20. – ISSN 2223-4608.
- 2 **Kulkov, A. A.** Evaluation of the effectiveness of the surface treatment of wagons before painting / A. A. Kulkov, D. G. Evseev, A. Yu. Korytov Metalworking. – 2016. – No. 4 (94). – P. 66–67. – ISSN 1684-6702.
- 3 **Kulikov, M. Yu.** Assessment of the technical and economic efficiency of the process of abrasive blasting of metal elements of railway car bodies / M. Yu. Kulikov, A. A. Kulkov // Bulletin of the Bryansk State Technical University. – 2019. – No. 6 (79). – P. 65–68. – ISSN 1999-8775.
- 4 **Kulikov, M. Yu.** Technical and economic features of surface treatment of wagons before painting / M. Yu. Kulikov, A. A. Kulkov // High-tech technologies in mechanical engineering. – 2019. – No. 5 (95). – P. 39–41. – ISSN 2223-4608.
- 5 **Kulkov, A. A.** Ultrasonic liquid matting of metal surfaces / A. A. Kulkov, V. E. Inozemtsev

А. А. Кульков, В. Е. Иноземцев // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2018. – № 3 (64). – С. 40–43. – ISSN 1999-8775.

6 **Финоченко, В. А.** Анализ экозащитных технологий на станциях реостатных испытаний локомотивных депо / В. А. Финоченко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 2 (86). – С. 42–47. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_2_42.

7 **Финоченко, В. А.** Технологии защиты окружающей среды от воздействий железнодорожного транспорта / В. А. Финоченко, Т. А. Финоченко // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 1 (54). – С. 62–64. – ISSN 0201-727X.

8 **Финоченко, В. А.** Инженерная экология : учебное пособие / В. А. Финоченко, Г. Н. Соколова, Т. А. Финоченко. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2019. – 163 с. – ISBN 978-5-88814-855-6.

9 **Кульков, А. А.** Обеспечение качества предокрасочной подготовки поверхности обшивки вагонов газодинамическим методом / А. А. Кульков // Транспортное машиностроение. – 2023. – № 7 (19). – С. 59–65. – ISSN 2782-5957.

// Bulletin of the Bryansk State Technical University. – 2018. – No. 3 (64). – P. 40–43. – ISSN 1999-8775.

6 **Finochenko, V. A.** Analysis of environmental protection technologies at rheostat testing stations of locomotive depots / V. A. Finochenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2022. – No. 2 (86). – P. 42–47. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_2_42.

7 **Finochenko, V. A.** Technologies of environmental protection from the effects of railway transport / V. A. Finochenko, T. A. Finochenko // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2021. – No. 1 (54). – P. 62–64. – ISSN 0201-727X.

8 **Finochenko, V. A.** Engineering ecology: Text book / V. A. Finochenko, G. N. Sokolova, T. A. Finochenko. – Rostov-on-Don : RSTU, 2019. – 163 p. – ISBN 978-5-88814-855-6.

9 **Kulkov, A. A.** Ensuring the quality of pre-paint preparation of the surface of the lining of wagons by the gas-dynamic method / A. A. Kulkov // Transport engineering. – 2023. – No. 7 (19). – P. 59–65. – ISSN 2782-5957.

A. A. Kulkov, A. S. Shinkaruk, R. H. Rafikov

INCREASING THE EFFICIENCY OF PRE-PAINTING TECHNOLOGY OF CAR BODIES USING THE MODEL FORMATION OF SURFACE CLEANING QUALITY

Abstract. The results of research on improving the process of pre-painting preparation of car bodies based on modeling the cleaning process and the formation of surface quality are presented. The work carried out a study of the physical and mechanical properties of operational contaminant media located on the body part of the rolling stock that accepted for repair. The results showed that most types of contaminants can be correlated on the Mohs hardness scale with known materials, which greatly facilitates their study. Based on the data obtained, the article proposes a model for cleaning and forming the quality of pre-painting surface preparation, used before applying the paint and varnish coating. The model has practical application in the form of specific technological processing modes given in this paper.

Keywords: rolling stock, bodywork, repair, pre-painting, quality.

For citation: Kulkov, A. A. Increasing the efficiency of pre-painting technology of car bodies using the model formation of surface cleaning quality / A. A. Kulkov, A. S. Shinkaruk, R. H. Rafikov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 1. – P. 15–21. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_15.

Сведения об авторах

Кульков Анатолий Александрович
Российский университет транспорта (РУТ МИИТ),
кафедра «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: pow12@mail.ru

Information about the authors

Kulkov Anatoly Alexandrovich
Russian University of Transport (RUT MIIT),
Chair «Technology of Transport Engineering and Repair of Rolling Stock»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: pow12@mail.ru

Шинкарук Андрей Сергеевич

Российский университет транспорта
(РУТ МИИТ),
кафедра «Технология транспортного
машиностроения и ремонта подвижного
состава»,
кандидат технических наук,
e-mail: shinkarukas@mail.ru

Рафиков Рафик Хайдарович

Российский университет транспорта
(РУТ МИИТ),
кафедра «Технология транспортного
машиностроения и ремонта подвижного
состава»,
кандидат технических наук,
e-mail: rafis-89@mail.ru

Shinkaruk Andrey Sergeevich

Russian University of Transport (RUT MIIT),
Chair «Technology of Transport Engineering
and Repair of Rolling Stock»,
Candidate of Engineering Sciences,
e-mail: shinkarukas@mail.ru

Rafikov Rafik Haidarovich

Russian University of Transport (RUT MIIT),
Chair «Technology of Transport Engineering
and Repair of Rolling Stock»,
Candidate of Engineering Sciences,
e-mail: rafis-89@mail.ru

Д. Н. Курилкин, В. В. Грачев, А. Г. Брагин

УЧЕТ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКЕ ТЕПЛОВОЗА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ТЯГОВЫХ РАСЧЕТОВ

Аннотация. На переходные процессы, вызванные изменением режима работы, приходится значительная доля времени работы дизель-генераторной установки тепловоза. При этом в тяговых расчетах принимается мгновенное изменение мощности и расхода топлива силовой установкой в момент перевода рукоятки контроллера, что может приводить к снижению их точности. На основании статистического и регрессионного анализа данных регистрации подсистемы бортовой диагностики тепловозов 2ТЭ116У в работе предложена и обоснована методика учета влияния переходных процессов на уровень мощности силовой установки и расход топлива. Полученные результаты позволяют уточнить параметры тяговой характеристики локомотива и могут использоваться при выполнении оперативных тяговых расчетов.

Ключевые слова: переходные процессы, расход топлива, дизель-генераторная установка, снижение мощности, тепловоз.

Для цитирования: Курилкин, Д. Н. Учет переходных процессов в дизель-генераторной установке тепловоза при выполнении тяговых расчетов / Д. Н. Курилкин, В. В. Грачев, А. Г. Брагин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1. – С. 22–34. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_22.

Постановка задачи

Одним из вопросов, периодически возникающих как при эксплуатации, так и при проектировании тепловозов, является вопрос о влиянии переходных режимов работы силовой установки на тягово-энергетические свойства локомотива. Большинство специалистов в качестве единственного результата такого влияния традиционно рассматривают увеличение эксплуатационного расхода топлива, для оценки которого предлагаются различные методики [1–5]. При этом вопрос о влиянии переходных процессов (ПП) на уровень тяговой характеристики не ставится. При выполнении тяговых расчетов переходные процессы, вызванные изменением позиции контроллера, как правило, не учитывают, принимая допущение о том, что частота вращения коленчатого вала и мощность дизель-генератора изменяются мгновенно [6–8], а увеличение расхода топлива, вызванное переходными процессами, учитывается введением корректирующих коэффициентов [9, 10].

Целью данной работы является разработка методики учета влияния ПП на тяговые свойства локомотива и расход топлива в эксплуатации при выполнении тяговых расчетов.

Учет влияния переходных процессов на уровень мощности силовой установки тепловоза

Как показано в [1–5], на переходные процессы приходится значительная (от 8 до 58 %) доля времени работы дизель-генераторной установки тепловоза (ДГУ) в эксплуатации. В форсированных дизелях темп увеличения частоты вращения коленчатого вала дизеля при увеличении позиции контроллера, как правило, превышает темп увеличения мощности тягового генератора (рис. 1), что приводит к снижению средней мощности ДГУ, уменьшению механического КПД дизеля и увеличению удельного эффективного расхода топлива дизелем при одновременном снижении его абсолютного расхода. На рис. 1 представлен процесс увеличения мощности тягового генератора (ТГ) $P_{ТГ}$, частоты вращения коленчатого вала $n_{диз}$ и положения реек топливных насосов высокого давления (ТНВД) дизеля ДГУ 18-9ДГ тепловоза 2ТЭ116У при переводе рукоятки задатчика позиций с 9-й позиции (ПКМ=9) на 11-ю (ПКМ=11). На рис. 2 приведено изменение значений тех же параметров ДГУ при переводе рукоятки задатчика с 13-й на 11-ю позицию.

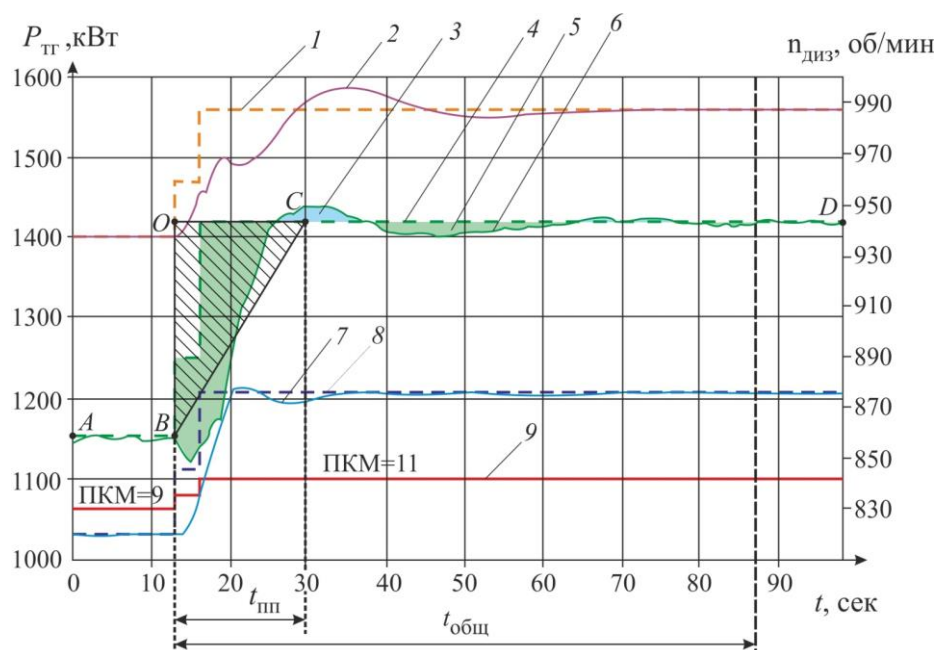


Рис. 1. Изменение параметров ДГУ тепловоза 2ТЭ116У при увеличении позиции контроллера машиниста:

1 – положение реек ТНВД при установившемся режиме работы; 2 – фактическое положение реек ТНВД; 3 – область, в которой фактическая мощность ТГ больше установившейся; 4 – установившееся значение мощности ТГ; 5 – область, в которой фактическая мощность ТГ меньше установившейся; 6 – фактическое значение мощности тягового генератора; 7 – фактическая частота вращения вала дизеля; 8 – установившаяся частота вращения вала дизеля; 9 – изменение позиций контроллера машиниста; ABCD – расчетная характеристика изменения мощности дизеля

Как отмечено выше, в практике тяговых расчетов переходные процессы при изменении позиции контроллера, как правило, не учитывают, принимая допущение о ступенчатом изменении мощности ДГУ [6–8] (линия ABCD на рис. 1 и 2). Между тем характер фактического изменения мощности тягового генератора (линия 6 на рис. 1 и 2) существенно отличается от линии ABCD. Учет плавного изменения мощности силовой установки тепловоза при изменении позиции контроллера повышает точность определения силы тяги и моментов переключения позиций при выполнении тяговых расчетов [11, 12]. Для этого целесообразно реальную диаграмму изменения мощности дизель-генераторной установки (линия 6 на рис. 1 и 2) заменить расчетной линейной, образующей ломаную линию ABCD. При этом работа ДГУ при изменении мощности по расчетной характеристике должна соответствовать работе при изменении мощности по реальной характеристике, т. е. должно выполняться условие:

$$\sum_{i=1}^n P_{ТГ ABCDi} \cdot \Delta t_i = \sum_{i=1}^n P_{ТГ\phi i} \cdot \Delta t_i, \quad (1)$$

где $P_{ТГ\phi i}$ – фактическое мгновенное значение мощности тягового генератора;

$P_{ТГ ABCDi}$ – мгновенное значение мощности тягового генератора по линии ABCD;

$n, \Delta t_i$ – число измерений и шаг между двумя измерениями фактической мощности тягового генератора во время переходного процесса, связанные с общим временем переходного процесса зависимо-

стью $t_{общ} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i$.

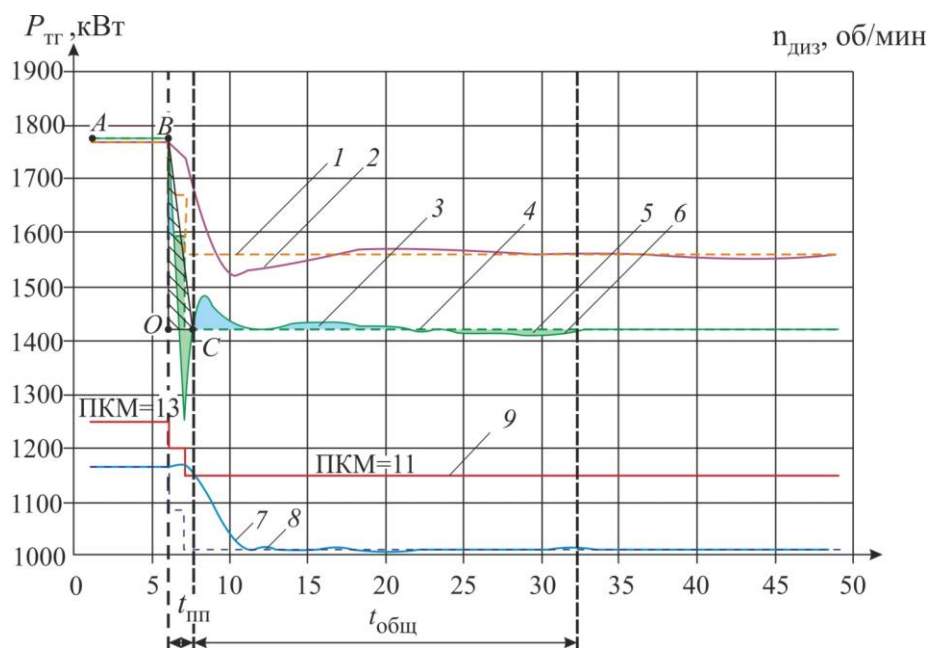


Рис. 2. Изменение параметров ДГУ тепловоза 2ТЭ116У при уменьшении позиции контроллера машиниста:

1 – положение реек ТНВД при установившемся режиме работы; 2 – фактическое положение реек ТНВД; 3 – область, в которой фактическая мощность ТГ больше установившейся; 4 – установившееся значение мощности ТГ; 5 – область, в которой фактическая мощность ТГ меньше установившейся; 6 – фактическое значение мощности тягового генератора; 7 – фактическая частота вращения вала дизеля; 8 – установившаяся частота вращения вала дизеля; 9 – изменение позиций контроллера машиниста; ABCD – расчетная характеристика изменения мощности дизеля

Введем понятие расчетного времени переходного процесса $t_{пп}$ (см. рис. 1 и 2), в течение которого происходит нарастание мощности ДГУ по расчетной траектории. Учитывая линейный характер изменения расчетной мощности ТГ в течение $t_{пп}$, условие (1) может быть представлено в виде:

$$\frac{1}{2} \cdot t_{пп} \cdot (P_{ТГ}^к + P_{ТГ}^н) + (t_{общ} - t_{пп}) \cdot P_{ТГ}^к = \sum_{i=1}^n P_{ТГfi} \cdot \Delta t_i, \quad (2)$$

где $P_{ТГ}^к$ и $P_{ТГ}^н$ – установившиеся значения мощности тягового генератора на конечной и начальной позиции контроллера.

За начало переходного процесса принимается момент изменения позиции контроллера машиниста. Моменту завершения переходного процесса и переходу в установившийся режим работы соответствует одновременное выполнение следующих условий:

$$\begin{aligned} \left| \frac{n_{диз} - n_{диз}^{уст}}{n_{диз}^{уст}} \right| &< 0,01; \\ \left| \frac{h_p - h_p^{уст}}{h_p^{уст}} \right| &< 0,01; \\ \left| \frac{P_{ТГ} - P_{ТГ}^{уст}}{P_{ТГ}^{уст}} \right| &< 0,05, \end{aligned} \quad (3)$$

где $n_{диз}$, h_p , $P_{ТГ}$ – текущие значения частоты вращения ДГУ, выхода реек топливных насосов и мощность тягового генератора, об/мин, ед. кода, кВт;

$n_{диз}^{уст}$, $h_p^{уст}$, $P_{ТГ}^{уст}$ – установившиеся значения частоты вращения ДГУ, выхода реек топливных насосов и мощность тягового генератора, об/мин, ед. кода, кВт.

Выполнив элементарные преобразования выражения (2), получим время расчетного переходного процесса (отрезок OC на рис. 1 и 2):

$$t_{mn} = 2 \cdot \frac{P_{tr}^k \cdot t_{общ} - \sum_{i=1}^n P_{tr\phi i} \cdot \Delta t_i}{P_{tr}^k - P_{tr}^h} \quad (4)$$

В этом случае расчетная мощность тягового генератора при увеличении позиции контроллера P_{tr} ($h \rightarrow k$) в любой момент времени t от начала переходного процесса может быть определена следующим образом:

$$P_{tr}(h \rightarrow k) = \begin{cases} P_{tr}^h + \frac{P_{tr}^k - P_{tr}^h}{t_{mn}} \cdot t, & \text{при } t \leq t_{mn} \\ P_{tr}^k, & \text{при } t > t_{mn} \end{cases} \quad (5)$$

Для определения фактических значений расчетного времени переходного процесса t_{mn} были проанализированы данные подсистемы бортовой диагностики четырех сдй тепловозов 2ТЭ116У, находящихся в рядовой эксплуатации на Октябрьской железной дороге.

В качестве установившихся значений основных параметров ДГУ принимались средние значения, удовлетворяющие условиям (3), рассчитанные для каждой позиции контроллера машиниста. В итоге было обработано 90 фрагментов данных, соответствующих различным вариантам изменения позиций контроллера. С учетом того, что время переходных процессов при наборе позиций существенно превышает время переходных процессов при сбросе, набор и сброс позиций рассматривались отдельно.

С учетом большого числа различных факторов, влияющих на время переходного процесса t_{mn} , можно предположить, что его значение является нормально распределенной случайной величиной, что позволяет использовать в расчете его математическое ожидание с обязательной проверкой гипотезы о нормальном законе распределения. Проверка осуществляется с использованием метода Е. И. Пустыльника [13], согласно которому условием соответствия выборки нормальному закону распределения является выполнение условий:

$$|A_{t_{mn}}| \leq 3 \cdot \sqrt{D(A_{t_{mn}})}; \quad (6)$$

$$|E_{t_{mn}}| \leq 5 \cdot \sqrt{D(E_{t_{mn}})}, \quad (7)$$

где $A_{t_{mn}}$ и $E_{t_{mn}}$ – асимметрия и эксцесс выборки времени переходного процесса в расчете на одну позицию контроллера;

$D(A_{t_{mn}})$ и $D(E_{t_{mn}})$ – дисперсия асимметрии и эксцесса выборки.

Указанные параметры определяются по следующим известным зависимостям [13]:

$$A_{t_{mn}} = \frac{1}{n \cdot S_{t_{mn}}^3} \cdot \sum_{i=1}^n (t_{mni} - \overline{t_{mn}})^3; \quad (8)$$

$$E_{t_{mn}} = \frac{1}{n \cdot S_{t_{mn}}^4} \cdot \sum_{i=1}^n (t_{mni} - \overline{t_{mn}})^4 - 3; \quad (9)$$

$$D(A_{t_{mn}}) = \frac{6 \cdot (n-1)}{(n+1) \cdot (n+3)}; \quad (10)$$

$$D(E_{t_{mn}}) = \frac{24 \cdot n \cdot (n-2) \cdot (n-3)}{(n+1)^2 \cdot (n+3) \cdot (n+5)}, \quad (11)$$

где i – номер фрагмента данных с ПП;

n – число;

t_{mni} – время переходного процесса в расчете на одну позицию, с;

$\overline{t_{mn}}$ – математическое ожидание времени переходного процесса, с;

$S_{t_{mn}}$ – среднее квадратичное отклонение времени переходного процесса

Математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение времени переходного процесса, определяются по формулам:

$$\bar{t}_{mn} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n t_{mni} ; \quad (12)$$

$$S_{t_{mn}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (t_{mni} - \bar{t}_{mn})^2} . \quad (13)$$

Группированные статистические ряды значений t_{mn} в расчете на одну позицию контроллера при увеличении и уменьшении позиций представлены на рис. 3 и 4. Результаты вычислений статистических характеристик выборок приведены в табл. 1.

Как следует из приведенных результатов, гипотеза о нормальном законе распределения времени переходного процесса подтверждается как для набора, так и для сброса позиций.

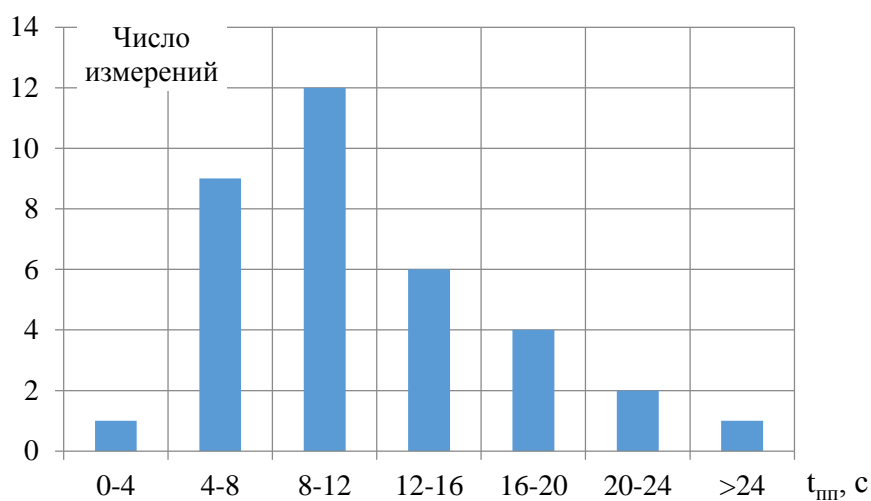


Рис. 3. Группированный статистический ряд времени переходного процесса при наборе одной позиции контроллера

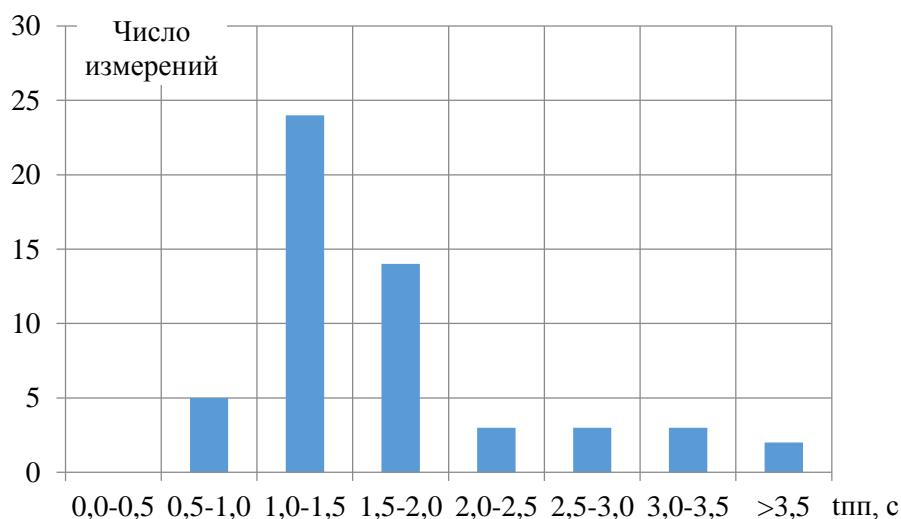


Рис. 4. Группированный статистический ряд времени переходного процесса при сбросе одной позиции контроллера

Таблица 1

Результаты определения времени переходного процесса

Параметр	Значение параметра	
	Увеличение позиций	Уменьшение позиций
Число измерений, n	35	55
Математическое ожидание $\overline{t_{mn}}$, с	11,3	1,7
Среднеквадратичное отклонение $S_{t_{mn}}$, с	4,9	0,7
Асимметрия выборки A_{mn}	0,72	0,84
Эксцесс выборки E_{mn}	0,35	0,79
Дисперсия асимметрии выборки $D(A_{mn})$	0,15	0,099
Дисперсия эксцесса выборки $D(E_{mn})$	0,45	0,333
Допустимая асимметрия выборки A_{mn}	1,15	0,94
Допустимый эксцесс выборки E_{mn}	3,35	2,88

Учет влияния переходных процессов на эксплуатационный расход топлива

Как показано выше, опережающее изменение частоты вращения коленчатого вала в переходных режимах работы, вызванных изменением позиции контроллера, приводит к уменьшению механического коэффициента полезного действия и увеличению удельного эффективного расхода топлива дизеля с одновременным уменьшением работы ДГУ при наборе и некоторым ее увеличением при сбросе позиции.

В качестве критерия для оценки изменения эффективности силовой установки в переходном процессе может использоваться величина коэффициента K_{mn} :

$$K_{mn} = \frac{g_{\text{тр}}^{\text{нпж}}}{g_{\text{тр}}^{\text{идж}}}, \quad (14)$$

где $g_{\text{тр}}^{\text{идж}}$, $g_{\text{тр}}^{\text{нпж}}$ – удельный расход топлива на кВт·ч работы ДГУ на j -й позиции контроллера в установившемся режиме работы и средний удельный расход топлива на кВт·ч генератора в реальном переходном процессе длительностью $t_{\text{общ}}$ при наборе j -й позиции (кг/кВт·ч).

Величина $g_{\text{тр}}^{\text{идж}}$ удельного расхода топлива на кВт·ч работы генератора в установившемся режиме работы связана с удельным эффективным расходом топлива дизеля $g_e^{\text{идж}}$ на j -й позиции контроллера выражением:

$$g_{\text{тр}}^{\text{идж}} = g_e^{\text{идж}} \cdot \frac{N_e^j}{P_{\text{тр}}^j}, \quad (15)$$

где N_e^j – эффективная мощность дизеля в установившемся режиме работы на j -й позиции контроллера, кВт;

$P_{\text{тр}}^j = \sum_{i=1}^6 (U_i^j \cdot I_i^j)$ – мощность на зажимах выпрямительной установки в установившемся режиме

работы на j -й позиции контроллера, кВт;

i – номер тягового двигателя;

U_i^j – напряжение, прикладываемое к i -му тяговому двигателю на j -й позиции;

I_i^j – ток, протекающий через якорь i -го тягового двигателя на j -й позиции.

Эффективная мощность дизеля N_e на j -й позиции:

$$N_e^j = P_{\text{тр}}^j + \Delta P_{\text{г}}^j + \Delta P_{\text{вы}}^j + P_{\text{вт}}^j + P_{\text{всв}}^j + P_{\text{эдк}}^j + P_{\text{аб}}^j + P_{\text{мвх ср}}^j + P_{\text{неоткл}}^j, \quad (16)$$

где $P_{\text{тр}}^j$ – мощность на выходе тяговой выпрямительной установки;

$\Delta P_{\text{г}}^j$ – мощность потерь энергии в СТГ без учета затрат на возбуждение;

$\Delta P_{\text{вы}}^j$ – мощность потерь в выпрямительной установке;

$P_{\text{вт}}^j$ – мощность, затрачиваемая на возбуждение СТГ;

$P_{\text{всв}}^j$ – мощность, затрачиваемая на возбуждение синхронного возбудителя;

$P_{\text{эдк}}^j$ – мощность, затрачиваемая на привод тормозного компрессора;

$P_{\text{аб}}^j$ – мощность, затрачиваемая на подзарядку аккумуляторной батареи;

$P_{\text{мвх ср}}^j$ – мощность, затрачиваемая на привод вентиляторов охлаждения теплоносителей дизеля;

$P_{\text{неоткл}}^j$ – мощность, затрачиваемая на привод неотключаемых нагрузок.

Методика определения составляющих правой части выражения (16) изложена в работах [14–19].

Величина удельного эффективного расхода топлива $g_{\text{тр}}^{\text{удj}}$ в установившихся режимах работы ДГУ для каждой позиции контроллера машиниста может быть определена из универсальной характеристики дизеля по методике [20], согласно которой изменение $g_{\text{тр}}^{\text{удj}}$ по нагрузочной характеристике, соответствующей j -й позиции контроллера, может быть аппроксимировано полиномом вида:

$$g_e^j = a_j \cdot N_e^4 + b_j \cdot N_e^3 + c_j \cdot N_e^2 + d_j \cdot N_e + e_j, \quad (17)$$

где a_j, b_j, c_j, d_j, e_j – постоянные коэффициенты, определяемые для каждой j -й позиции контроллера (частоты вращения коленчатого вала дизеля) [20].

Средний удельный расход топлива на кВтч генератора в реальном переходном процессе длительностью $t_{\text{общ}}$ при наборе или j -й позиции может быть определен следующим образом:

$$g_{\text{тр}}^{\text{мж}} = \frac{G_{\text{пт}}^j}{\sum_{i=1}^n P_{\text{трф}i} \cdot \Delta t_i}, \quad (18)$$

где $G_{\text{пт}}^j$ – расход топлива за время перехода на j -ю позицию контроллера.

Реальный расход топлива за время переходного процесса $G_{\text{пт}}^j$ может быть определен с использованием параметров ДГУ, регистрируемых подсистемой диагностики системы управления МСУ-ТП тепловоза 2ТЭ116У [4]:

$$G_{\text{пт}}^j = \frac{1}{30} \cdot k_h \cdot \sum_{i=1}^n (n_{\text{дизи}} \cdot h_{\text{р}i}^{\text{пп}} \cdot \Delta t_i), \quad (19)$$

где k_h – коэффициент пропорциональности, связывающий цикловую подачу топлива с приведенным кодом рейки ТНВД, кг/ц·ед.;

$n_{\text{дизи}}$ – текущее значение частоты вращения ДГУ, об/мин.

$h_{\text{р}i}^{\text{пп}}$ – приведенный код рейки ТНВД, ед., определяемый по зависимости [4]:

$$h_{\text{р}i}^{\text{пп}} = h_{\text{р}i} - h_0, \quad (20)$$

где $h_{\text{р}i}$ – текущее значение кода рейки ТНВД, ед.;

h_0 – код рейки ТНВД при остановленном дизеле, ед.

Величина коэффициента k_h определяется действием многих факторов, основными из которых являются настройка рычажной передачи регулятора дизеля, частота вращения коленчатого вала (средняя скорость плунжера ТНВД), температура и давление топлива в коллекторе низкого давления [21].

При установившемся режиме работы ДГУ $k_h^{\text{н(к)}}$ может быть определен по следующей зависимости:

$$k_h^{\text{н(к)}} = \frac{B_{\text{ч}}^{\text{н(к)}}}{h_{\text{р}}^{\text{прн(к)}} \cdot n_{\text{диз}}^{\text{н(к)}}}, \quad (21)$$

где $B_{\text{ч}}^{\text{н(к)}}$ – часовой расход топлива при работе ДГУ в установившемся режиме на начальной (конечной) позиции, кг/ч;

$n_{\text{диз}}^{\text{н(к)}}$ – частота вращения вала дизеля на начальной (конечной) позиции контроллера, об/мин;

$h_p^{\text{прн(к)}}$ и $h_p^{\text{прj}}$ – приведенный код рейки ТНВД на начальной (конечной) позиции контроллера, ед.

Тогда во время переходного процесса (см. рис. 1 и 2) коэффициент $k_h^{\text{мп}}$ может быть определен из соотношения:

$$k_h^{\text{мп}} = \begin{cases} 0,5 \cdot (k_h^{\text{н}} + k_h^{\text{к}}), & \text{при } t \leq t_{\text{мп}} \\ k_h^{\text{к}}, & \text{при } t_{\text{общ}} \geq t > t_{\text{мп}} \end{cases}. \quad (22)$$

Среднее за анализируемое время переходного процесса значение $k_h^{\text{мп}}$:

$$k_h^{\text{мп}} = \frac{t_{\text{мп}}}{t_{\text{общ}}} \cdot 0,5 \cdot (k_h^{\text{н}} + k_h^{\text{к}}) + \frac{t_{\text{общ}} - t_{\text{мп}}}{t_{\text{общ}}} \cdot k_h^{\text{к}} = \frac{0,5 \cdot t_{\text{мп}}}{t_{\text{общ}}} k_h^{\text{н}} + \frac{t_{\text{общ}} - 0,5 \cdot t_{\text{мп}}}{t_{\text{общ}}} k_h^{\text{к}}. \quad (23)$$

С учетом (21):

$$k_h^{\text{мп}} = \frac{0,5 \cdot t_{\text{мп}}}{t_{\text{общ}}} \cdot \frac{B_q^{\text{н}}}{h_p^{\text{прн}} \cdot n_{\text{диз}}^{\text{н}}} + \frac{t_{\text{общ}} - 0,5 \cdot t_{\text{мп}}}{t_{\text{общ}}} \cdot \frac{B_q^{\text{к}}}{h_p^{\text{прк}} \cdot n_{\text{диз}}^{\text{к}}}. \quad (24)$$

При расчете значения коэффициента $K_{\text{мп}}$ использовались те же фрагменты данных, что и при определении времени переходного процесса $t_{\text{мп}}$.

На рис. 5 и 6 представлены группированные статистические ряды значений $K_{\text{мп}}$ при увеличении и уменьшении позиций контроллера.

В табл. 2 приведены результаты вычисления статистических параметров коэффициента $K_{\text{мп}}$ при наборе и сбросе позиций, подтверждающие нормальный закон распределения его значений.

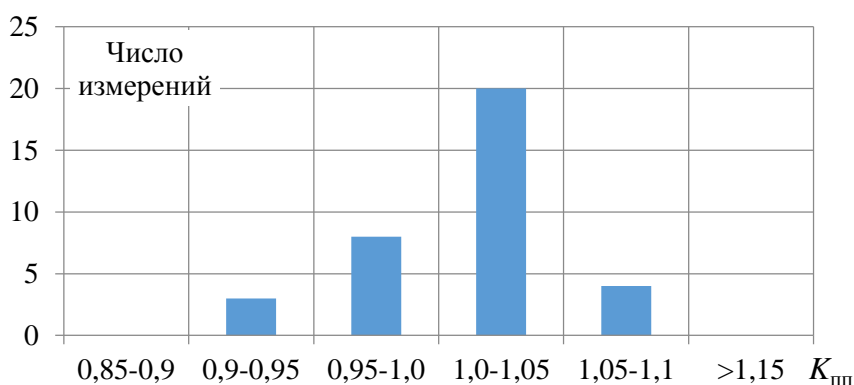


Рис. 5. Группированный статистический ряд коэффициента $K_{\text{мп}}$ при увеличении позиций контроллера

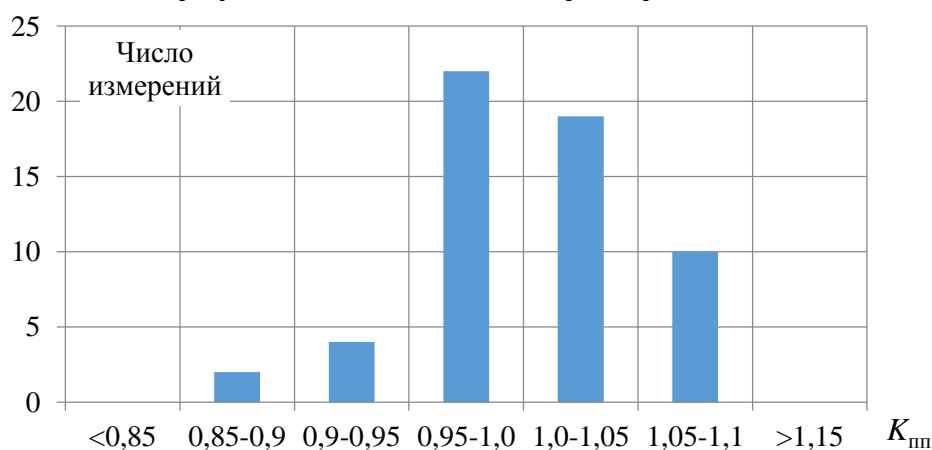


Рис. 6. Группированный статистический ряд коэффициента $K_{\text{мп}}$ при уменьшении позиций контроллера

Таблица 2

Результаты определения коэффициента K_{mn}

Параметр	Значение параметра	
	Увеличение позиций	Уменьшение позиций
Число измерений, n	35	55
Математическое ожидание $\overline{K_{mn}}$	1,007	1,005
Среднеквадратичное отклонение $S_{K_{mn}}$	0,033	0,049
Асимметрия выборки $A_{K_{mn}}$	-0,65	-0,261
Экссесс выборки $E_{K_{mn}}$	0,36	0,439
Дисперсия асимметрии выборки $D(A_{K_{mn}})$	0,15	0,099
Дисперсия эксцесса выборки $D(E_{K_{mn}})$	0,45	0,333
Допустимая асимметрия выборки $A_{K_{mn}}$	1,15	0,94
Допустимый эксцесс выборки $E_{K_{mn}}$	3,35	2,88

Обсуждение результатов

В форсированных дизелях следствием опережающего темпа увеличения частоты вращения коленчатого вала при одновременном ограничении перерегулирования по подаче топлива является уменьшение темпа набора мощности тягового генератора при увеличении позиции контроллера. Для тепловоза серии 2ТЭ116У среднее время от изменения позиции контроллера (положения рукоятки задатчика позиции) до выхода ДГУ на мощность, соответствующую установленной позиции, составляет 11,3 с на одну позицию. При уменьшении позиции, напротив, имеет место запаздывание темпа снижения частоты вращения коленчатого вала по отношению к интенсивности изменения мощности тягового генератора во избежание перехода нагнетателя турбокомпрессора в режим помпажа. Среднее время снижения мощности до уровня, соответствующего установленной позиции, составляет 1,7 с на одну позицию.

Эти особенности организации переходных процессов приводят к уменьшению средней мощности силовой установки и уровня тяговой характеристики тепловоза в период переходного процесса. Принимая во внимание значительную долю времени работы тепловоза, приходящуюся на такие процессы, учет реального темпа изменения мощности ДГУ при изменении позиций контроллера машиниста в тяговых расчетах с использованием зависимости (5) позволит повысить их точность, особенно в части определения моментов переключения позиций.

Как следует из рис. 5, 6 и табл. 2, математическое ожидание величины коэффициента K_{mn} (14) составляет 1,007 для увеличения и 1,005 для уменьшения позиций контроллера. Следовательно, увеличение удельного расхода топлива на кВтч работы ДГУ в переходном процессе в среднем не превышает 0,7 % при одновременном уменьшении работы ДГУ, выполненной за время переходного процесса. Соответственно, перерасход топлива за время работы силовой установки только в неустановившихся режимах работы сопоставим (без учета расхода в установившихся режимах и режимах холостого хода) с погрешностью измерения количества топлива в баке (0,65 %) [4] и практически никак не влияет на расход топлива за поездку.

Таким образом, широко распространенное мнение о существенном влиянии переходных процессов в ДГУ тепловоза на эксплуатационный расход топлива не находит подтверждения. Аналогичные результаты получены в работе [5]. В работах [3, 4] на основе обработки результатов работы маневровых тепловозов делается вывод об отсутствии связи между среднеэксплуатационным удельным расходом топлива на единицу работы ДГУ и числом переключений позиций контроллера, что подтверждает отсутствие влияния переходных процессов в силовой установке на эксплуатационный расход топлива тепловозом.

При выполнении тяговых расчетов значение мгновенного часового расхода топлива в произвольный момент времени t от начала переходного процесса может вычисляться по формуле:

$$B_q (н \rightarrow к) = \begin{cases} B_q^н + \frac{B_q^к - B_q^н}{t_{mn}} \cdot t, & \text{при } t \leq t_{mn} \\ B_q^к, & \text{при } t > t_{mn} \end{cases} \quad (25)$$

Выводы

1 В работе предложена методика учета влияния переходных процессов в силовой установке автономного локомотива на его тяговые свойства и расход топлива.

2 Время изменения мощности силовой установки тепловоза в переходном процессе является случайной величиной с нормальным законом распределения и математическим ожиданием (для силовой установки тепловоза серии 2ТЭ116У) 11,3 с на одну позицию при увеличении позиций и 1,7 с на позицию при уменьшении.

3 Предложена зависимость для определения значения мощности на зажимах выпрямительной установки тепловоза в течение переходного процесса.

4 Увеличение удельного эффективного расхода топлива дизелем в период переходного процесса (без учета установившихся режимов работы ДГУ и режимов холостого хода) не превышает 0,7 % и никак не влияет на расход топлива за поездку.

5 Предложена зависимость для определения мгновенного часового расхода топлива в каждый момент времени переходного процесса.

Список литературы

1 **Володин, А. И.** Топливная экономичность силовых установок тепловозов / А. И. Володин, Г. А. Фофанов. – Москва : Транспорт, 1979. – 126 с.

2 **Хомич, А. З.** Топливная эффективность и вспомогательные режимы тепловозных дизелей / А. З. Хомич. – 2-е изд. перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 1987. – 271 с.

3 **Попов, К. М.** Некоторые вопросы практического использования бортовых систем учета топлива тепловозов / К. М. Попов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). – 2022. – Т. 81, № 4. – С. 370–382. – DOI 10.21780/2223-9731-2022-81-4-370-382.

4 Влияние переходных процессов в силовой установке маневрового тепловоза на расход топлива в эксплуатации / В. В. Грачев, А. В. Грищенко, Ф. Ю. Базилевский, Д. Н. Курилкин // Бюллетень результатов научных исследований. – 2022. – № 1. – С. 48–67. – DOI 10.20295/2223-9987-2022-1-48-67.

5 Влияние переходных процессов дизель-генераторной установки тепловоза серии 2ТЭ116У на его эксплуатационные показатели / В. В. Грачев, Д. Н. Курилкин, С. И. Ким, С. В. Сергеев // Локомотивы. XXI век : сборник материалов Международной научно-технической конференции, посвященной 110-летию со дня рождения д.т.н., профессора Е. Я. Гаккель. – Санкт-Петербург : ПГУПС. – 2013. – С. 146–147.

6 **Климович, А. В.** Оптимизация управления движением поезда по минимуму затрат энергоресурсов на тягу : монография / А. В. Климович. – Москва : Компания Спутник, 2008. – 263 с. – ISBN 978-5-364-01071-1.

7 **Мугинштейн, Л. А.** Энергооптимальный тяговый расчет движения поезда / Л. А. Мугинштейн, А. Е. Илютович, И. А. Яблоко // Вестник

References

1 **Volodin, A. I.** Fuel efficiency of diesel locomotive power plants / A. I. Volodin, G. A. Fofanov. – Moscow : Transport, 1979. – 126 p.

2 **Khomich, A. Z.** Fuel efficiency and auxiliary modes of diesel locomotives / A. Z. Khomich. – 2nd ed. and additional. – Moscow : Transport, 1987. – 271 p.

3 **Popov, K. M.** Some issues of practical use of on-board fuel metering systems for diesel locomotives / K. M. Popov // Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport (Bulletin of VNIIZHT). – 2022. – Vol. 81, No.4. – P. 370–382. – DOI 10.21780/2223-9731-2022-81-4-370-382.

4 The influence of transients in the power plant of a shunting locomotive on fuel consumption in operation / V. V. Grachev, A. V. Grishchenko, F. Yu. Bazilevsky, D. N. Kurilkin // Bulletin of the results of scientific research. – 2022. – No. 1. – P. 48–67. – DOI 10.20295/2223-9987-2022-1-48-67.

5 The influence of transients of the diesel generator set of the 2TE116U series locomotive on its performance / V. V. Grachev, D. N. Kurilkin, S. I. Kim, S. V. Sergeev // Locomotives. XXI century : In the collection of materials of the International Scientific and Technical Conference, dedicated to the 110th anniversary of the birth of Doctor of Technical Sciences, Professor E. Ya. Gakkel. – Saint Petersburg : PGUPS. – 2013. – P. 146–147.

6 **Klimovich, A. V.** Optimization of train traffic control to minimize energy costs for traction : monograph / A. V. Klimovich. – Moscow : Sputnik Company, 2008. – 263 p. – ISBN 978-5-364-01071-1.

7 **Muginstein, L. A.** Energy-optimal traction calculation of train movement / L. A. Muginstein,

ВНИИЖТ. – 2013. – № 6. – С. 3–13. – ISSN 2223-9731.

8 **Баранов, Л. А.** Энергооптимальное управление движением транспортных средств / Л. А. Баранов, Н. А. Кузнецов, М. В. Максимов // Электротехника. – 2016. – № 9. – С. 12–18. – ISSN 0013-5860.

9 **Ерофеев, Е. В.** Расчет оптимальных программ автоведения поезда при ступенчатом управлении силой тяги / Е. В. Ерофеев, И. С. Мостов // Вопросы автоматизации процессов управления движением поездов : сборник трудов под ред. Л. А. Баранова. – Москва : МИИТ, 1975. – Вып. 492. – С. 16–21.

10 **Ерофеев, Е. В.** Оптимизация программ систем автоведения поездов / Е. В. Ерофеев // Автоматическое и телемеханическое управление движением поездов : сборник трудов под ред. Л. А. Баранова. – Москва : МИИТ, 1980. – Вып. 661. – С. 41–50.

11 **Гриневич, В. П.** Использование программного комплекса «Тяга-прогноз» для поиска энергооптимальных режимов ведения поезда / В. П. Гриневич, Д. Н. Курилкин, Т. С. Авсиевич // Бюллетень результатов научных исследований. – 2022. – № 4. – С. 131–149. – DOI 10.20295/2223-9987-2022-4-131-149.

12 **Курилкин, Д. Н.** Совершенствование правил тяговых расчетов / Д. Н. Курилкин, В. П. Гриневич // Железнодорожный транспорт. – 2023. – № 2. – С. 39–43. – ISSN 0044-4448.

13 **Пустыльник, Е. И.** Статистические методы анализа и обработки наблюдений / Е. И. Пустыльник. – Москва : Наука, 1968. – 288 с.

14 **Курилкин, Д. Н.** Определение параметров тягово-энергетических характеристик автономных локомотивов по данным микропроцессорных систем управления и диагностики : монография / Д. Н. Курилкин. – Санкт-Петербург : РГУПС. – 2022. – 160 с. – ISBN 978-5-6049080-0-6.

15 **Курилкин, Д. Н.** Определение затрат энергии на возбуждение тягового генератора по данным микропроцессорных систем управления для прогнозирования тяговой характеристики локомотива / Д. Н. Курилкин // Бюллетень результатов научных исследований. – 2022. – № 1. – С. 103–117. – DOI 10.20295/2223-9987-2022-1-103-117.

16 **Курилкин, Д. Н.** Анализ затрат энергии на привод мотор-вентиляторов охлаждающего устройства дизеля тепловоза 2ТЭ116У по данным МСУ-ТП / Д. Н. Курилкин // Вестник транспорта Поволжья. – 2022. – № 1 (91). – С. 25–33. – ISSN 1997-0722.

A. E. Ilyutovich, I. A. Yabko // Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport (Bulletin of VNIIZHT). – 2013. – No. 6. – P. 3–13. – ISSN 2223-9731.

8 **Baranov, L. A.** Energooptimal control of vehicle movement / L. A. Baranov, N. A. Kuznetsov, M. V. Maksimov // Elektrotechnika. – 2016. – No. 9. – P. 12–18. – ISSN 0013-5860.

9 **Yerofeev, E. V.** Calculation of optimal programs of train driving with stepwise traction control / E. V. Yerofeev, I. S. Mostov // Issues of automation of train traffic control processes : In the collection of works edited by L. A. Baranov. – Moscow : MIIT, 1975. – Issue. 492. – P. 16–21.

10 **Yerofeyev, E. V.** Optimization of programs for train driving systems / E. V. Yerofeyev // Automatic and telemechanical control of train traffic : In the collection of works edited by L. A. Baranov. – Moscow : MIIT, 1980. – Issue 661. – P. 41–50.

11 **Grinevich, V. P.** The use of the software complex "Traction-forecast" for the search for energy-optimal train driving modes / V. P. Grinevich, D. N. Kurilkin, T. S. Avsievich // Bulletin of the results of scientific research. – 2022. – No. 4. – P. 131–149. – DOI 10.20295/2223-9987-2022-4-131-149.

12 **Kurilkin, D. N.** Improvement of the rules of traction calculations / D. N. Kurilkin, V. P. Grinevich // Railway transport. – 2023. – No. 2. – P. 39–43. – ISSN 0044-4448.

13 **Pustynnik, E. I.** Statistical methods of analysis and processing of observations / E. I. Pustynnik. – Moscow : Nauka, 1968. – 288 p.

14 **Kurilkin, D. N.** Determination of the parameters of traction and energy characteristics of autonomous locomotives according to microprocessor control and diagnostic systems: monograph / D. N. Kurilkin. – Saint Petersburg : PGUPS. – 2022. – 160 p. – ISBN 978-5-6049080-0-6.

15 **Kurilkin, D. N.** Determination of energy costs for excitation of a traction generator according to microprocessor control systems for predicting the traction characteristics of a locomotive / D. N. Kurilkin // Bulletin of scientific research results. – 2022. – No. 1. – P. 103–117. – DOI 10.20295/2223-9987-2022-1-103-117.

16 **Kurilkin, D. N.** Analysis of energy costs for the drive of motor fans of the cooling device of the diesel locomotive 2TE116U according to MSU-TP / D. N. Kurilkin // Bulletin of transport of the Volga region. – 2022 – No. 1 (91). – P. 25–33. – ISSN 1997-0722.

17 **Курилкин, Д. Н.** Определение затрат энергии на подзарядку аккумуляторной батареи тепловоза по данным микропроцессорной системы управления / Д. Н. Курилкин // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2022. – Т. 19, № 1. – С. 68–74. – DOI 10.20295/1815-588x-2022-19-1-68-74.

18 **Курилкин, Д. Н.** Определение затрат энергии в синхронных тяговых генераторах тепловозов при различных режимах нагружения / Д. Н. Курилкин // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2022. – Т. 19, № 2. – С. 286–297. – DOI 10.20295/1815-588x-2022-19-2-286-297.

19 **Курилкин, Д. Н.** Определение потерь в силовых выпрямительных установках тепловозов при различных режимах нагружения / Д. Н. Курилкин // Вестник транспорта Поволжья. – 2022. – № 6 (96). – С. 19–26. – ISSN 1997-0722.

20 Разработка показателей энергоэффективности тепловозов и методик их определения. Экспериментальные исследования по определению показателя энергоэффективности локомотивов (ПЭЛ) для оценки качества ремонта тепловозов (на примере тепловозов 2ТЭ116У, ТЭП70БС, ТЭМ18ДМ) : техн. отчет № 27-2014-19. Рук. работы Перминов В. А. – Коломна : ВНИКТИ, 2014. – 175 с.

21 **Грачев, В. В.** Прескриптивный контроль энергоэффективности силовой установки тепловоза с использованием интеллектуальных методов обработки измерительной информации встроенных средств диагностики : монография / В. В. Грачев. – Санкт-Петербург : ПГУПС, 2019. – 106 с. – ISBN 978-5-7641-1400-2.

17 **Kurilkin, D. N.** Determination of energy costs for recharging the diesel locomotive battery according to the microprocessor control system / D. N. Kurilkin // Izvestia of the Saint Petersburg University of Railway Communications. – 2022. – Vol. 19, No. 1. – P. 68–74. – DOI 10.20295/1815-588x-2022-19-1-68-74.

18 **Kurilkin, D. N.** Determination of energy costs in synchronous traction generators diesel locomotives under various loading conditions / D. N. Kurilkin // Izvestiya Peterburgskogo universiteta of Railways. – 2022. – Vol. 19, No. 2. – P. 286–297. – DOI 10.20295/1815-588x-2022-19-2-286-297.

19 **Kurilkin, D. N.** Determination of losses in power rectifier installations of locomotives under various loading modes / D. N. Kurilkin // Bulletin of transport of the Volga region. – 2022. – No. 6 (96). – P. 19–26. – ISSN 1997-0722.

20 Development of indicators of energy efficiency of locomotives and methods of their determination. Experimental studies to determine the energy efficiency index of locomotives (PEL) to assess the quality of repair of locomotives (using the example of diesel locomotives 2TE116U, TEP70BS, TEM18DM) : tech. Report No. 27-2014-19. Handiwork of Perminov V. A. – Kolomna : VNIKTI, 2014. – 175 p.

21 **Grachev, V. V.** Prescriptive control of the energy efficiency of a diesel locomotive power plant using intelligent methods for processing measurement information of built-in diagnostic tools : monograph / V. V. Grachev. – Saint Petersburg : PGUPS, 2019. – 106 p. – ISBN 978-5-7641-1400-2.

D. N. Kurilkin, V. V. Grachev, A. G. Bragin

ACCOUNTING FOR TRANSIENT PROCESSES IN A LOCOMOTIVE DIESEL GENERATOR EQUIPMENT WHEN PERFORMING TRACTION CALCULATIONS

Abstract. The transient processes caused by changes in the operating account a significant proportion of the operating time of the locomotive diesel generator equipment. At the same time, in traction calculations, the change in power and fuel consumption by the power plant is assumed to be instantaneous, which can lead to a decrease in their reliability. The methods of statistical processing and regression analysis of experimental data were used in the work. Based on the statistical analysis of the registration data of the on-board diagnostics subsystem of 2TE116U locomotives, a methodology for taking into account the influence of transients on the power plant power level and fuel consumption is proposed and justified. The results obtained make it possible to clarify the parameters of the traction characteristics of the locomotive and can be used when performing operational traction calculations.

Keywords: DSU transition process, DSU fuel consumption, DSU power reduction.

For citation: Kurilkin, D. N. Accounting for transient processes in a locomotive diesel generator equipment when performing traction calculations / D. N. Kurilkin, V. V. Grachev,

A. G. Bragin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 1. – P. 22–34. – DOI 10.46973/0201–727X_2024_1_22.

Сведения об авторах

Курилкин Дмитрий Николаевич

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС),
кафедра «Локомотивы и локомотивное хозяйство»,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой,
e-mail: kurilkin@pgups.ru

Грачев Владимир Васильевич

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС),
кафедра «Локомотивы и локомотивное хозяйство»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: lt@pgups.ru

Брагин Александр Геннадьевич

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС),
кафедра «Локомотивы и локомотивное хозяйство»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: lt@pgups.ru

Information about the authors

Kurilkin Dmitry Nikolayevich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
Chair «Locomotives and Locomotive Facility»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor, Head of the Chair,
e-mail: kurilkin@pgups.ru

Grachev Vladimir Vasilievich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
Chair «Locomotives and Locomotive Facility»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: lt@pgups.ru

Bragin Alexander Gennadievich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
Chair «Locomotives and Locomotive Facility»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: lt@pgups.ru

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ И ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 625.123

DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_35

*Д. А. Разуваев, М. Г. Чахлов***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО КРИТЕРИЯ НАЧАЛА ИНТЕНСИВНОГО КРИОГЕННОГО ВЛАГОПЕРЕНОСА В РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ**

Аннотация. Для предотвращения образования пучин на железнодорожном пути при сезонном промерзании возможно применение способа, предусматривающего создание в теле или основании земляного полотна капиллярного барьера путем инъекции гидроизолирующих составов, что исключает криогенный влагоперенос в активную зону.

Для более точных прогнозов и назначения глубины капиллярного барьера при проектировании авторами поставлена задача по установлению двухпараметрического критерия (от значения температуры и градиента температуры) начала интенсивного криогенного влагопереноса для глинистых грунтов и его зависимости от числа пластичности. В работе описаны постановка и проведение, а также обобщены и приведены результаты лабораторных экспериментов, направленных на решение поставленной актуальной задачи.

По результатам эксперимента для различных видов глинистых грунтов (в интервале числа пластичности от 0,05 до 0,13) определены и аппроксимированы экспоненциальной функцией двухпараметрические температурные критерии начала интенсивного криогенного влагопереноса под капиллярным барьером. Полученные экспериментальные данные дополнительно аппроксимированы по числу пластичности глинистого грунта.

Ключевые слова: железная дорога, капиллярный барьер, земляное полотно, сезонное промерзание, температура грунтов, градиент температуры грунтов, влагоперенос.

Для цитирования: Разуваев, Д. А. Экспериментальное определение двухпараметрического температурного критерия начала интенсивного криогенного влагопереноса в различных видах глинистых грунтов / Д. А. Разуваев, М. Г. Чахлов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1. – С. 35–44. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_35.

Введение

В районах с преобладанием неблагоприятных грунтово-гидрологических условий и глубокого сезонного промерзания грунтов деформирование земляного полотна в результате действия сил морозного пучения остается актуальной проблемой [1–3].

Для уже существующих и эксплуатируемых в таких условиях дорог авторами предложен и обоснован способ устройства капиллярного барьера в основании или теле земляного полотна путем инъектирования гидроизолирующих составов [3, 4]. Капиллярный барьер (рис. 1), например, из силикатизированного грунта, преграждает доступ грунтовых вод в зону сезонного промерзания, а также формирует цементационные связи в грунтах нижней части этой зоны, что в совокупности позволяет снизить деформации пучения железнодорожного пути до предельно допустимых значений.

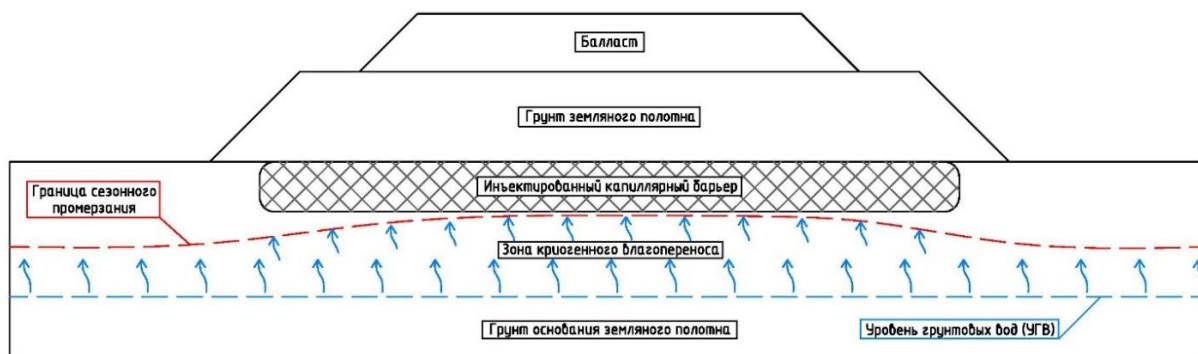


Рис. 1. Пример размещения инъектированного в основание насыпи капиллярного барьера

Предложенный способ позволяет исключить интенсивный криогенный влагоперенос в грунтах земляного полотна при промерзании (создать закрытую систему промерзания), что существенно снижает величину морозного пучения грунтов деятельного слоя [3–5]. Дополнительный положительный эффект достигается расположением капиллярного барьера из непучинистого материала (например, из силикатизированного грунта) в нижней части зоны сезонного промерзания, то есть частичным преобразованием изначально пучинистых грунтов в непучинистые [3–5].

При проектировании, авторами рекомендуется размещать капиллярный барьер в нижней части зоны сезонного промерзания, но как можно ближе к поверхности земляного полотна, в этом случае снижается трудоемкость устройства барьера за счет меньшей глубины инъектирования, а также уменьшается мощность потенциально пучинистых грунтов над барьером. При этом *обязательно должно соблюдаться условие недопущения интенсивного криогенного влагопереноса в грунтах земляного полотна под капиллярным барьером*. В противном случае под капиллярным барьером будет формироваться слой водонасыщенных слабых грунтов.

Ряд отечественных ученых [1, 2, 6–9] сходятся во мнении, что практически в любой момент времени в промерзающем массиве грунта существует зона интенсивного криогенного влагопереноса, близкая, но не совпадающая по глубине с зоной фазовых переходов. Именно промерзание (фазовый переход) формирует одну из основных движущих сил – градиент влажности. Эмпирически установлено, что интенсивный криогенный влагоперенос наблюдается в интервале температур от 0 до $-3-5$ °С [2, 9, 10], в работе [6] этот интервал уточнен до значений от $-0,6$ до -3 °С.

При этом известно [11], что на механизм криогенной миграции влияет не только градиент влажности, формируемый при промерзании в зоне фазовых переходов (ограничен интервалом изотерм от $-0,6$ до -3 °С), но и формируемый градиент температуры. Поэтому для более точных прогнозов и назначения глубины капиллярного барьера при проектировании, авторами поставлена задача по установлению двухпараметрического критерия (от значения температуры и градиента температуры) начала интенсивного криогенного влагопереноса для глинистых грунтов, и его зависимости от числа пластичности.

Далее в работе будут описаны постановка, проведение и результаты лабораторных экспериментов, направленных на решение поставленной актуальной задачи. Обработка экспериментальных данных осуществлена совместно с ранее выполненными авторами исследованиями [15, 16] по отдельным видам глинистых грунтов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке ОАО «РЖД» (грант на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта).

Постановка лабораторного эксперимента

По результатам анализа существующих методик, применяемых ранее для исследования механизмов и закономерностей криогенного влагопереноса в грунтах при промерзании [8–10], в лабораторных условиях поставлен эксперимент, позволяющий на грунтовых моделях определять температуру и градиент температур начала интенсивного криогенного влагопереноса под капиллярным барьером в зависимости от числа пластичности глинистого грунта.

Ввиду отсутствия поставщиков специализированного оборудования под решаемую задачу, в качестве основной лабораторной установки при реализации эксперимента использовался прибор ГТ 1.1.12, обеспечивающий контролируемое формирование водно-теплового состояния грунтовых образцов. Несмотря на прямое назначение установки – определение степени морозного пучения грунтов, именно она, в комплексе с программным обеспечением, позволяет моделировать в образце грунта зону промерзания с контролируемыми параметрами (температура и градиент температур в образце, параметры водонасыщения и влагопереноса), а также наличие капиллярного барьера. Принципиальная схема экспериментальной установки с грунтовой моделью представлена на рис. 2.

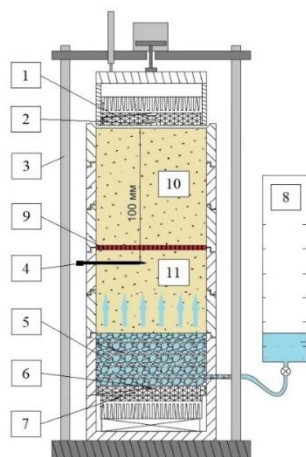


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки с грунтовой моделью:

1 – верхний охлаждающий термоэлектрический модуль; 2 – датчик температуры № 1; 3 – кольцевая обойма с теплоизоляцией; 4 – датчик температуры № 2; 5 – фильтрующий материал (песчаник); 6 – датчик температуры № 3; 7 – нижний греющий термоэлектрический модуль; 8 – мерная колба; 9 – мембрана (имитация капиллярного барьера); 10 – верхняя часть грунтовой модели; 11 – нижняя часть грунтовой модели

Для создания и поддержания отрицательной (t_i^B) и положительной (t_i^H) температуры на торцах промораживаемой модели грунта применены два одинаковых термоэлектрических модуля (элементы Пельтье), под управлением ЭВМ через аппаратуру установки.

Для моделирования криогенного влагопереноса в грунтах нижней части образца (под мембраной) обеспечена возможность подтока воды из мерного сосуда через фильтрующий камень (песчаник), расположенный в поддоне прибора. По изменению уровня воды в мерном сосуде фиксировалось начало интенсивного криогенного влагопереноса в модели, а по температурному полю – достижение температурных критериев начала криогенной миграции влаги (пар значений температуры t^{KM} и градиента температур ∇t^{KM}).

Модели в рамках лабораторного эксперимента изготавливались из грунтов нарушенной структуры с уплотнением до коэффициента 0,95. Начальная степень водонасыщения образцов превышала $S_r > 0,9$. Для исключения изменения теплофизических свойств грунта по глубине образца и морозного пучения (факторы, ограничивающие возможности эксперимента), его верхняя часть (над мембраной) водонасыщалась соевым раствором, что предотвращало возможность фазовых переходов.

Грунтовая модель представляла собой цилиндр диаметром 100 мм, высотой 150 мм внутри кольцевой теплоизолированной обоймы прибора. В процессе формирования и уплотнении грунта в кольцах, внутри образца на глубине 90 мм устанавливалась водонепроницаемая мембрана из полиэтилена, моделирующая капиллярный барьер. Мембрана располагалась над температурным датчиком № 2 (рис. 2).

В рамках эксперимента и дальнейших исследований приняты исходные глинистые грунты в диапазоне числа пластичности от 0,05 до 0,13, представленные в табл. 1. Физические характеристики грунтов определены по ГОСТ 5180-2015 и ГОСТ 12536-2014.

Таблица 1

Физические характеристики исследуемых грунтов

№	Число пластичности	Содержание песчаных частиц	Вид грунта
1	0,05	<50 %	Супесь пылеватая
2	0,07	<40 %	Суглинок легкий пылеватый
3	0,09		Суглинок легкий пылеватый
4	0,11		Суглинок легкий пылеватый
5	0,13	<40 %	Суглинок тяжелый пылеватый

Запуск прибора осуществлялся после термостатирования моделей в холодильной камере при температуре +2 °С в течение суток. После запуска с помощью лабораторной установки создавалось одномерное стационарное температурное поле в модели.

Формирование температурного поля, термостатирование и контроль температурных параметров (температура и градиент температур) в образце выполнялись по схеме, представленной на рис. 3.

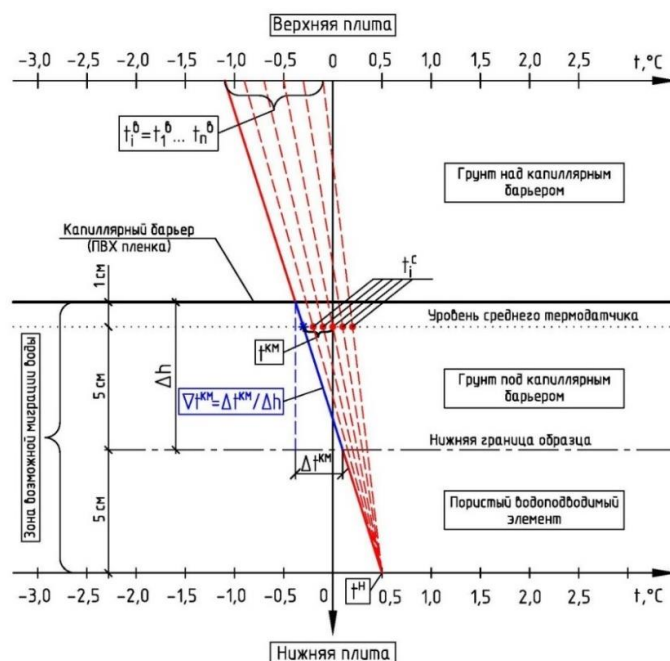


Рис. 3. Схема формирования и изменения температурного поля в модели в процессе проведения эксперимента

В соответствии со схемой (рис. 3), на нижнем (греющем) термоэлектрическом модуле (плите) выставлялось фиксированное для каждого опыта значение температуры t^H (контроль по датчику температуры № 3). Затем, с шагом $0,2\text{ }^\circ\text{C}$ поэтапно (1...n этапов), с термостатированием температурного поля в модели, понижалась температура на верхнем (охлаждающем) термоэлектрическом модуле (плите) t_i^B (контроль по датчику температуры № 1). Контрольными маркерами завершения термостатирования модели являлись стабилизация температуры t_i^C (контроль по датчику температуры № 2) и формирование температурного поля в модели по линейному закону (или близкому к линейному, ввиду практически одинаковых теплофизических свойств верхней и нижней части модели). На каждом из этапов выполнялся контроль уровня воды в мерном сосуде (8, рис. 2).

В момент, когда в нижней части грунтовой модели (под капиллярным барьером) начиналась криогенная миграция влаги (по уровню в мерном сосуде), фиксировались температура t^{KM} и градиент температуры ∇t^{KM} под капиллярным барьером на данном этапе опыта. Далее выполнялось термостатирование модели до температуры $+2\text{ }^\circ\text{C}$, и запускался следующий опыт (на той же модели) при ином значении температуры на нижнем (греющем) термоэлектрическом модуле (плите) прибора t^H (контроль по датчику температуры № 3). При следующем опыте, как видно из схемы (рис. 3), формировалось температурное поле с иными градиентами температур.

Проведение лабораторного эксперимента

Общий вид подготовленной для проведения эксперимента модели представлен на рис. 4, а. Поскольку собранная на основе прибора ГТ 1.1.12 установка позволяет проводить до трех параллельных испытаний, испытания для каждого опыта проводились в трех повторностях, рис. 4, б. Каждый эксперимент состоял из шести последовательных опытов с различным значением температуры t^H .

Последовательность и основные условия проведения лабораторного эксперимента по определению температурных критериев начала интенсивного криогенного влагопереноса для одного вида грунта представлены блок-схемой на рис. 5.



Рис. 4. Проведение лабораторного эксперимента:
а – общий вид модели с капиллярным барьером;
б – смонтированные блоки установки в момент проведения эксперимента



Рис. 5. Последовательность лабораторного эксперимента по определению температурных критериев начала интенсивного криогенного влагопереноса в грунтах

В ходе эксперимента программный комплекс прибора позволял производить непрерывный контроль температур верха, низа и середины грунтовой модели в режиме реального времени.

Результаты исследования

Проведенный эксперимент позволил определить температурные критерии (температуру $t^{\text{кМ}}$ и градиент температур $\nabla t^{\text{кМ}}$ под капиллярным барьером), соответствующие началу интенсивного криогенного влагопереноса. Экспериментальные данные (средние значения параметров температурного поля в моделях в момент начала криогенного влагопереноса по результатам не менее трех испытаний для каждого опыта) представлены в табл. 2. В табл. 2 и далее выполнена совместная обработка данных с ранее выполненными авторами исследования [15, 16] по отдельным видам глинистых грунтов.

Таблица 2

Экспериментальные данные для исследуемых грунтов

№ Опыта	Средние значения параметров температурного поля под капиллярным барьером в экспериментальных моделях в момент начала криогенного влагопереноса	
	Температура (t_{cp}^{KM}), °С	Градиент температур (∇t_{cp}^{KM}), °С/см
1	2	3
Исследуемый грунт: супесь пылевая с $I_p = 0,05$		
1	-0,30	0,03
3	-0,07	0,06
4	0,13	0,09
5	0,67	0,13
5	1,00	0,20
6	1,37	0,26
Исследуемый грунт: супесь пылевая с $I_p = 0,07$		
1	-0,57	0,06
2	-0,13	0,06
3	-0,03	0,10
4	0,63	0,14
5	0,83	0,22
6	1,17	0,28
Исследуемый грунт: суглинок легкий пылеватый с $I_p = 0,09$		
1	-0,80	0,08
2	-0,50	0,10
3	-0,17	0,12
4	0,30	0,17
5	0,87	0,21
6	1,10	0,29
Исследуемый грунт: суглинок легкий пылеватый с $I_p = 0,11$		
1	-0,83	0,08
2	-0,57	0,11
3	-0,40	0,14
4	0,27	0,17
5	0,47	0,25
6	0,93	0,31
Исследуемый грунт: суглинок легкий пылеватый с $I_p = 0,13$		
1	-1,00	0,10
2	-0,60	0,11
3	-0,33	0,13
4	0,00	0,20
5	0,37	0,26
6	0,77	0,32

Далее выполнена аппроксимация полученных экспериментальных данных экспоненциальными функциями. На рис. 6 представлены аппроксимирующие кривые с нанесенными экспериментальными точками для исследуемых глинистых грунтов. Физически каждая аппроксимирующая функция – это граница температурной области начала криогенного влагопереноса под капиллярным барьером для конкретного вида глинистого грунта (рис. 6).

Следует отметить, что именно «криогенный» влагоперенос, в классическом понимании, происходит в левой относительно оси ординат части графика. При относительно высоких градиентах температур именно они становятся основной движущей составляющей влагопереноса, и миграция влаги начинается и при положительных температурах грунта. Этот факт не препятствует получению и даже расширяет возможности решения поставленной задачи – определения оптимальной глубины расположения капиллярного барьера.

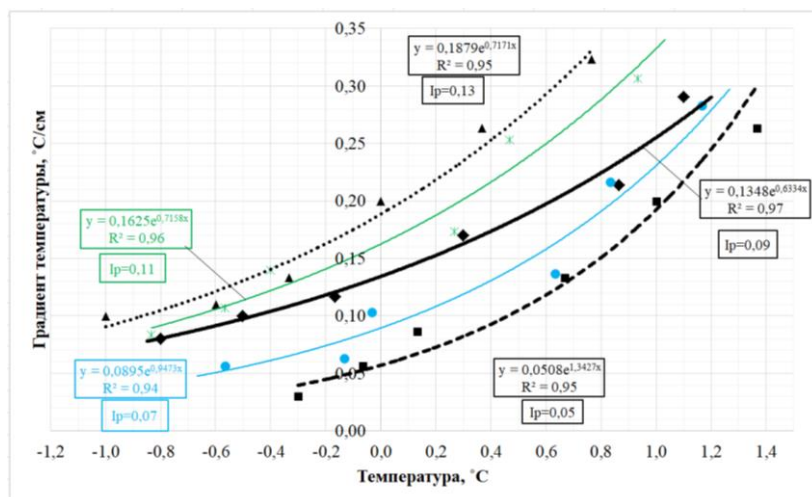


Рис. 6. Экспериментальные данные, аппроксимированные экспоненциальными функциями

Аппроксимация показала (рис. 6), что полученные экспериментальные данные наиболее точно описываются экспоненциальными функциями. Достоверность аппроксимации (R^2) для каждого графика составила более 0,90, что демонстрирует адекватность математической модели и высокую степень близости аппроксимации экспериментальных данных выбранной функции.

Уравнения аппроксимирующих функций и двухпараметрические температурные критерии для исследуемых глинистых грунтов представлены в табл. 3, где ∇t – градиент температуры в зоне промерзания, $^{\circ}\text{C}/\text{см}$; t – температура в зоне промерзания.

Полученные экспериментальные данные дополнительно аппроксимированы по числу пластичности глинистого грунта I_p с определением поверхности влияния, представленной на рис. 7. Наибольшая степень достоверности аппроксимации в этом случае получена с применением полинома.

Таблица 3

Двухпараметрические температурные критерии для исследуемых глинистых грунтов

№	Вид глинистого грунта	I_p	Аппроксимирующая функция по результатам эксперимента	Двухпараметрический температурный критерий начала интенсивной миграции влаги
1	Супесь пылеватая [по 15]	0,05	$\nabla t^{\text{KM}} - 0,0508e^{1,3427t^{\text{KM}}} = 0$	$\nabla t - 0,0508e^{1,3427t} > 0$
2	Суглинок легкий пылеватый	0,07	$\nabla t^{\text{KM}} - 0,0895e^{0,9473t^{\text{KM}}} = 0$	$\nabla t - 0,0895e^{0,9473t} > 0$
3	Суглинок легкий пылеватый [по 15]	0,09	$\nabla t^{\text{KM}} - 0,1348e^{0,6334t^{\text{KM}}} = 0$	$\nabla t - 0,1348e^{0,6334t} > 0$
4	Суглинок легкий пылеватый	0,11	$\nabla t^{\text{KM}} - 0,1625e^{0,7158t^{\text{KM}}} = 0$	$\nabla t - 0,1625e^{0,7158t} > 0$
5	Суглинок тяжелый пылеватый [по 15, 16]	0,13	$\nabla t^{\text{KM}} - 0,1879e^{0,7171t^{\text{KM}}} = 0$	$\nabla t - 0,1879e^{0,7171t} > 0$

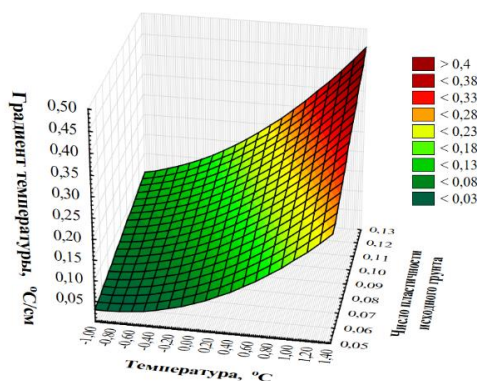


Рис. 7. Экспериментальные данные в виде поверхности влияния

Уравнение поверхности (рис. 7) имеет вид

$$\nabla t = 0,0431t^2 - 0,0279I_p^2 + 0,6387tI_p + 0,0475t + 1,5624I_p - 0,0129,$$

а критерий начала интенсивного криогенного влагопереноса под капиллярным барьером выполняется при

$$\nabla t - 0,0431t^2 + 0,0279I_p^2 - 0,6387tI_p - 0,0475t - 1,5624I_p + 0,0129 > 0.$$

Выводы

По результатам поставленного и проведенного лабораторного эксперимента установлены и аппроксимированы экспоненциальной функцией двухпараметрические температурные критерии начала интенсивного криогенного влагопереноса под капиллярным барьером (табл. 3). Критерии определены для достаточно широкого диапазона глинистых грунтов (число пластичности от 0,05 до 0,13). Данные грунты, как правило, обладают пучинистыми свойствами, и в то же время, их возможно стабилизировать инъекционными способами.

При проектировании капиллярного барьера, не допускается формирование под ним, в сезонно промерзающих грунтах основания или тела земляного полотна, температурного поля, удовлетворяющего условиям по двухпараметрическому температурному критерию (табл. 3). В противном случае будет существовать возможность начала криогенного влагопереноса под проектируемой конструкцией, с формированием слабых подстилающих грунтов. В этом случае необходимо корректировать (увеличивать) глубину расположения капиллярного барьера в сооружении.

Результаты проведенного исследования, при прогнозировании температурного поля в системе «земляное полотно – основание», позволяют определять оптимальную глубину проектирования капиллярного барьера.

Список литературы

- 1 **Золотарь, И. А.** Водно-тепловой режим земляного полотна и дорожных одежд / И. А. Золотарь, Н. А. Пузаков, В. М. Сиденко. – Москва : Транспорт, 1971. – 416 с.
- 2 **Пузаков, Н. А.** Водно-тепловой режим земляного полотна автомобильных дорог / Н. А. Пузаков. – Москва, 1960. – 169 с.
- 3 **Razuvaev, D. A.** Rationale for creation of capillary breaking layers in cold regions subgrade by pressure injection of waterproofing compounds / D. Razuvaev, A. Lanis, M. Chakhlov // Sciences in Cold and Arid Regions. – Volume 13, Issue 5, October, 2021. – P. 366–371. – ISSN 2310-0044.
- 4 Injection Compositions for Creating Impervious Screen for Roadbed Foundation / D. A. Razuvaev, M. G. Chakhlov, V. Y. Soloviiova, G. V. Karpachevsky // Transportation Research Procedia : 12, Irkutsk-Krasnoyarsk, 06–08 October 2021. – Irkutsk ; Krasnoyarsk, 2022. – P. 621–626. – DOI 10.1016/j.trpro.2022.01.100.
- 5 Коэффициенты морозного пучения силикатизированных глинистых грунтов / Д. А. Разуваев, А. Л. Ланис, М. Г. Чахлов, Р. С. Печенкин // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2 (65). – С. 91–98. – DOI 10.52170/1815-9265_2023_65_91.
- 6 **Чевереv, В. Г.** Физико-химическая теория формирования массообменных и тепловых свойств криогенных грунтов : специальность 04.00.07 «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение» : диссертация на соискание ученой степени

References

- 1 **Zolotar, I. A.** Water-thermal regime of roadbed and road clothing / I. A. Zolotar, N. A. Puzakov, V. M. Sidenko. – Moscow : Transport, 1971. – 416 p.
- 2 **Puzakov, N. A.** Water-thermal regime of roadbeds of highways / N. A. Puzakov. – Moscow, 1960. – 169 p.
- 3 **Razuvaev, D. A.** Rationale for creation of capillary breaking layers in cold regions subgrade by pressure injection of waterproofing compounds / D. Razuvaev, A. Lanis, M. Chakhlov // Sciences in Cold and Arid Regions. – Volume 13, Issue 5, October, 2021. – P. 366–371. – ISSN 2310-0044.
- 4 Injection Compositions for Creating Impervious Screen for Roadbed Foundation / D. A. Razuvaev, M. G. Chakhlov, V. Y. Soloviiova, G. V. Karpachevsky // Transportation Research Procedia : 12, Irkutsk-Krasnoyarsk, 06–08 October 2021. – Irkutsk ; Krasnoyarsk, 2022. – P. 621–626. – DOI 10.1016/j.trpro.2022.01.100.
- 5 Coefficients of frost heaving of silicatised clayey soils / D. A. Razuvaev, A. L. Lanis, M. G. Chakhlov, R. S. Pechenkin // Siberian Transport University Bulletin. – 2023. – No. 2 (65). – P. 91–98. – DOI 10.52170/1815-9265_2023_65_91.
- 6 **Cheverev, V. G.** Physico-Chemical Theory of Formation of Mass Exchange and Thermal Properties of Cryogenic Soils : specialty 04.00.07 “Engineering geology, permafrost and soil science” : Thesis for the Degree of Doctor of Geological and

доктора геолого-минералогических наук / В. Г. Чеверев ; Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова. – Москва, 1999. – 305 с.

7 **Чистотин, Л. В.** Миграция влаги в промерзающих неводонасыщенных грунтах / Л. В. Чистотин. – Москва : Наука, 1973. – 142 с.

8 **Ананян, А. А.** Исследование процессов перемещения влаги и образование сегрегационного льда в замерзающих и мерзлых горных породах / А. А. Ананян // Труды Гидропроекта. – Сб. 3. – Москва, 1960.

9 **Кудрявцев, С. А.** Промерзание и оттаивание грунтов (практические примеры и конечно-элементные расчеты) / С. А. Кудрявцев, И. И. Сахаров, В. Н. Парамонов. – Санкт-Петербург, 2014. – 262 с. – ISBN 978-5-9904956-3-0.

10 Общее мерзлотоведение (геокриология) / В. А. Кудрявцев, Б. Н. Достовалов, Н. Н. Романовский [и др.] ; под редакцией В. А. Кудрявцева. – Москва : Издательство МГУ, 1978. – 464 с.

11 **Лыков, А. В.** Теория тепло- и массопереноса / А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов. – Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1963. – 536 с.

12 Анализ представлений о механизме криогенной миграции воды в промерзающих грунтах / В. Г. Чеверев, А. В. Брушков, С. А. Половков [и др.] // Криосфера Земли. – 2021. – Т. 25, № 5. – С. 3–12. – DOI 10.15372/KZ20210501.

13 **Bronfenbrener, L.** Modeling frost heave in freezing soils / L. Bronfenbrener, R. Bronfenbrener // Cold Regions Science and Technology. – 2010. – Vol. 61. – P. 43–64. – DOI 10.1016/j.coldregions.2009.12.007.

14 Extended porosity rate function for frost heave / B. Abdalla, C. Fan, C. Mckinnon [et al.] // 33rd Intern. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Vol. 10 : Polar and Arctic Science and Technology (San Francisco, California, USA, June 8–13, 2014). – New York, Publ. ASME, 2014, V010T07A046.

15 **Разуваев, Д. А.** Температурные критерии начала интенсивного криогенного влагопереноса в грунтах земляного полотна / Д. А. Разуваев, М. Г. Чахлов // TRANSOILCOLD-2023 : Материалы 6-го Международного Симпозиума по строительному инжинирингу грунтовых сооружений на транспорте в холодных регионах, Москва, 02–05 октября 2023 года ; под общей редакцией Т. В. Шепитько. – Москва, 2023. – С. 155–157. – EDN YYSXKO.

16 **Razuvaev, D. A.** Determination of the two-parameter temperature criterion for the start of the intensive cryogenic moisture transfer process in clay soils of the subgrade / D. Razuvaev, M. Chakhlov // E3S Web of

Mineralogical Sciences / V. G. Cheverev ; Moscow State University named after. M. V. Lomonosov. – Moscow, 1999. – 305 p.

7 **Chistotin, L. V.** Water Migration in Freezing Unsaturated Soils / L. V. Chistotin. – Moscow : Nauka, 1973. – 142 p.

8 **Ananyan, A. A.** Study of Water Migration Processes and Formation of Segregational Ice in Freezing and Frozen Mountain Rocks. – Proceedings of Hydroproject. – Vol. 3. – Moscow, 1960.

9 **Kudryavtsev, S. A.** Freezing and Thawing of Soils (Practical Examples and Finite Element Calculations) / S. A. Kudryavtsev, I. I. Sakharov, V. N. Paramonov. – Saint Petersburg, 2014. – 262 p. – ISBN 978-5-9904956-3-0.

10 General Permafrost Science (Geocryology) / V. A. Kudryavtsev, B. N. Dostovalov, N. N. Romanovsky [et al.] ; Edited by V. A. Kudryavtsev. – Moscow : Moscow State University Press, 1978. – 464 p.

11 **Lykov, A. V.** Theory of Heat and Mass Transfer / A. V. Lykov, Yu. A. Mikhailov. – Moscow ; Leningrad : Gosenergoizdat, 1963. – 536 p.

12 Analysis of concepts on the mechanism of cryogenic water migration in freezing soils / V. G. Cheverev, A. V. Brushkov, S. A. Polovkov [et al.] // Earth's Cryosphere. – 2021. – Vol. 25, No. 5. – P. 3–12. – DOI 10.15372/KZ20210501.

13 **Bronfenbrener, L.** Modeling frost heave in freezing soils / L. Bronfenbrener, R. Bronfenbrener // Cold Regions Science and Technology. – 2010. – Vol. 61. – P. 43–64. – DOI 10.1016/j.coldregions.2009.12.007.

14 Extended porosity rate function for frost heave / B. Abdalla, C. Fan, C. Mckinnon [et al.] // 33rd Intern. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Vol. 10 : Polar and Arctic Science and Technology (San Francisco, California, USA, June 8–13, 2014). – New York, Publ. ASME, 2014, V010T07A046.

15 **Razuvaev, D. A.** Temperature criterion for the start of the intensive cryogenic moisture transfer process in the soils of the subgrade / D. A. Razuvaev, M. G. Chakhlov // TRANSOILCOLD-2023 : Materials of the 6th International Symposium on Geotechnical Engineering of Transportation Infrastructure in Cold Regions, Moscow, October 2–5, 2023 ; Edited by T. V. Shepitko. – Moscow, 2023. – P. 155–157. – EDN YYSXKO.

16 **Razuvaev, D. A.** Determination of the two-parameter temperature criterion for the start of the intensive cryogenic moisture transfer process in clay soils of the subgrade / D. A. Razuvaev,

Conferences. Volume 402, 12022 (2023). –
DOI 10.1051/e3sconf/202340212022.

M. G. Chakhlov // E3S Web of Conferences. Vol-
ume 402, 12022 (2023). –
DOI 10.1051/e3sconf/202340212022.

D. A. Razuvaev, M. G. Chakhlov

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE TWO-PARAMETER TEMPERATURE CRITERION FOR THE ONSET OF INTENSIVE CRYOGENIC MOISTURE TRANSFER IN VARIOUS TYPES OF CLAYEY SOILS

Abstract. A method for creating a capillary barrier in the subgrade soil of railway pavements by injecting waterproofing compounds has been proposed and justified for use in adverse soil and hydrological conditions and deep seasonal freezing of soils. The implementation of this method allows for the elimination of frost heaving in the active zone of the subgrade during seasonal freezing.

For more accurate predictions and determining the depth of the capillary barrier during design, the authors aimed to establish a two-parameter criterion (based on temperature and temperature gradient) for the onset of intensive cryogenic moisture transfer in clayey soils, and its dependence on the plasticity index. The paper describes the formulation, implementation, and presents the results of laboratory experiments aimed at solving this relevant problem.

Based on the experiment results, exponential functions for the two-parameter temperature criteria for the onset of intensive cryogenic moisture transfer beneath the capillary barrier have been determined and approximated for various types of clayey soils (within the plasticity index range of 0.05 to 0.13). Additionally, the obtained experimental data have been further approximated based on the plasticity index of the clayey soil.

Keywords: railway, capillary barrier, subgrade, seasonal freezing, soil temperature, soil temperature gradient, moisture transfer.

For citation: Razuvaev, D. A. Experimental determination of the two-parameter temperature criterion for the onset of intensive cryogenic moisture transfer in various types of clayey soils / D. A. Razuvaev, M. G. Chakhlov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 1. – P. 35–44. – DOI 10.46973/0201–727X_2024_1_35.

Сведения об авторах

Разуваев Денис Алексеевич

Сибирский государственный университет
путей сообщения (СГУПС),
кафедра «Путь и путевое хозяйство»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail : razdenis@mail.ru

Чахлов Михаил Геннадьевич

Сибирский государственный университет
путей сообщения (СГУПС),
кафедра «Путь и путевое хозяйство»,
преподаватель, научный сотрудник,
e-mail : mik404@mail.ru

Information about the authors

Razuvaev Denis Alexeevich

Siberian Transport University (STU),
Chair «Track and Track Facilities»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail : razdenis@mail.ru

Chakhlov Mikhail Gennadevich

Siberian Transport University (STU),
Chair «Track and Track Facilities»,
Lecturer, Researcher,
e-mail : mik404@mail.ru

В. Л. Шаповалов, В. В. Архипов, А. Г. Кочур, А. В. Морозов, М. В. Окост

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК БАЛЛАСТНОГО МАТЕРИАЛА НА МОДУЛЬ ДЕФОРМАЦИИ ЭКСПЛУАТИРУЕМОГО БАЛЛАСТНОГО СЛОЯ*

Аннотация. Описываются полевые экспериментальные исследования балластного слоя прямыми методами для определения свойств материала и определения модуля деформации динамическими испытаниями от действия ударной силы через круглый штамп с использованием прибора ZORN ZFG 3.0, которые проводились на действующих участках железнодорожного пути. В качестве натурных участков выбраны перегоны с различной засоренностью и пропущенным тоннажем, а также участок пути грузового двора, где длительное время не выполнялась очистка балластного слоя. По результатам проведенных исследований определены взаимосвязи между истираемостью щебня, сопротивлением щебня удару на копре и засоренностью балластного слоя, а также получены зависимости между засоренностью балластного слоя и модулем деформации.

Ключевые слова: балластный слой, засорённость, модуль деформации, истираемость.

Для цитирования: Влияние характеристик балластного материала на модуль деформации эксплуатируемого балластного слоя / В. Л. Шаповалов, В. В. Архипов, А. Г. Кочур [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1. – С. 45–54. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_45.

Введение

Балластный слой является элементом верхнего строения пути и выполняет ряд важных функций. Нарушение в его структуре и свойствах влияет на плавность хода поездов и может приводить к образованию деформаций основной площадки земляного полотна.

Непрерывный мониторинг его структуры в течение обслуживания и проведения надзора качества после проведенных строительных и путеремонтных работ даст возможность выйти на новый рациональный уровень формирования плана работ по текущему содержанию, объемам и видам ремонтных работ, а также своевременно выявить предотказное состояние пути.

Учитывая отечественный и зарубежный опыт, проблематика оценки фактического состояния балластного слоя при текущем содержании пути и при контроле качества выполненных работ имеет высокую актуальность.

Целью данного исследования является установление связи между засоренностью балластного слоя и модулем деформации, который является одной из характеристик балластного материала, влияющей на стабильность пути. Сдача в эксплуатацию железнодорожного пути с низкими значениями модуля деформации будет приводить к более интенсивным осадкам пути в начальный период времени после ремонта. При этом разброс значений вдоль пути приведет к неравномерным осадкам, что будет влиять на плавность хода, приведет к более активному износу элементов верхнего строения пути и будет провоцировать развитие дефектов земляного полотна.

Для экспериментальных полевых исследований были выбраны несколько участков железнодорожного пути с различными условиями эксплуатации. В 2022 и 2023 годах на полигоне Северо-Кавказской железной дороги в границах Шахтинской дистанции пути на четном пути перегона Зверевое – Сулин с 1086 км пк 4 по 1096 км пк 2 и на нечетном пути перегона Персиановка – Локомотивстрой с 1158 км пк 1 по 1164 км пк 5, в границах Ростовской дистанции пути на 6 пути грузового двора станции Ростов-Западный, нечетный путь перегона Морская – Синявская с 1295 км пк 3 по 1303 км пк 0 + 00 и нечетный путь перегона Александровка – Кизитеринка с 1188 км пк 4 по 1199 км пк 0, в границах Кавказской дистанции пути однопутный участок перегона Ладожская – Двубратский с 56 км пк 2 + 00 по 65 км пк 5 + 00 и четный путь перегона Гулькевичи – Отрадо-Кубанская с 1599 км пк 2 по 1617 км пк 3 был проведен комплекс измерений. На рассматриваемых участках планировалось проведение ремонтных работ с приведением балластного слоя в нормативное состояние.

Путь на перегоне Зверевое – Сулин относится к первому классу. Грузонапряженность составляет 94,1 млн ткм брутто/км в год. На участке обращаются: 62 пары грузовых, 68 пар пассажирских и 6 пар

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-79-20005).

пригородных поездов с применением локомотивов ВЛ60К, 2ВЛ60К, ВЛ80С, К, Т, 1,5ВЛ80С, ЭП1(1М), ЭП1П, ЭП20, ЧС4Т. На участке эксплуатируется бесстыковой путь из рельсов типа Р65 на железобетонных шпалах со скреплением АРС. Путь на перегоне Александровка – Кизитиринка относится к первому классу. Грузонапряженность составляет 67 млн ткм брутто/км в год. На участке обращаются 40 пар грузовых, 69 пар пассажирских и 7 пар пригородных поездов с применением локомотивов ЭП1(П, М), ЭП20, ЧС4Т, ВЛ80в/н, 1,5ВЛ80С, ВЛ80, 2ЭС5. На участке эксплуатируется бесстыковой путь из рельсов типа Р65 на железобетонных шпалах со скреплением КБ. Путь на перегоне Персиановка – Локомотивстрой относится ко второму классу. Грузонапряженность составляет 43,8 млн ткм брутто/км в год. На участке обращаются грузовые, пассажирские и пригородные поезда с применением локомотивов ЭП1(П, М), ЭП20, ЧС4Т, ВЛ80в/н, 1,5ВЛ80С, ВЛ80, 2ЭС5. На участке эксплуатируется бесстыковой путь из рельсов типа Р65 на железобетонных шпалах со скреплением КБ и АРС. Путь на перегоне Ладожская – Двубратский относится ко второму классу. Грузонапряженность составляет 27,18 млн ткм брутто/км в год. На участке обращаются грузовые, пассажирские и пригородные поезда с применением локомотивов ЭП1(П, М), ЭП20, ЧС4Т, ВЛ80в/н, 1,5ВЛ80С, ВЛ80. На участке эксплуатируется звеньевой путь из рельсов типа Р65 на железобетонных шпалах со скреплением КБ. Путь на перегоне Гулькевичи – Отрадо – Кубанская относится ко второму классу. Грузонапряженность составляет 35,22 млн ткм брутто/км в год. На участке обращаются грузовые, пассажирские и пригородные поезда с применением локомотивов ЭП1(П, М), ЭП20, ЧС4Т, ВЛ80в/н, 1,5ВЛ80С, ВЛ80. На участке эксплуатируется бесстыковой путь из рельсов типа Р65 на железобетонных шпалах со скреплением КБ. Путь на перегоне Морская – Синявская относится к 3 классу. Грузонапряженность составляет 16,92 млн ткм брутто/км в год. На участке обращаются грузовые, пассажирские и пригородные поезда с применением локомотивов ЭП1(П, М), ВЛ80в/н, 1,5ВЛ80С. На участке эксплуатируется бесстыковой путь из рельсов типа Р65 на железобетонных шпалах со скреплением ЖБР. 6 путь (интервал СП № 122 – тупик) и «вытяжка» 40 путь (интервал СП 122 – СП № 130) грузового двора ст. Ростов-Западный относится к 3 классу. Грузонапряженность составляет 16,92 млн ткм брутто/км в год. На путях обращается грузовой подвижной состав с применением локомотива ЧМЭЗ. На участке эксплуатируется звеньевой путь из рельсов типа Р65 на железобетонных шпалах со скреплением АП6.

Основными характеристиками балластного слоя можно считать его геометрические параметры, в том числе толщину, засоренность (фракционный состав балласта) и деформационные (упругие) характеристики.

При проведении полевых измерений балластного слоя в данном исследовании применялось два диагностических метода. Определение толщины и загрязненности балластного слоя выполнено согласно Методическим указаниям по обследованию балласта № ЦПТ-16-77 [1]. Определение модуля деформации балластного слоя определялось динамическими испытаниями от действия ударной силы через круглый штамп с использованием прибора ZORN ZFG 3.0.

Прямой метод исследования свойств балластного слоя

Согласно ЦПТ-16-77 [1] определены места оценки толщины и засоренности балласта в количестве трех мест на одном километре (ПК 3, ПК 6 и километровый знак каждого исследуемого километра). Определение значений толщины и загрязненности балластного слоя также выполнено согласно ЦПТ-16-77 [1] (рис. 1).

Взаимосвязь между истираемостью щебня, сопротивлением щебня удару на копре и засоренностью балластного слоя

Накопление засорителя в балластном слое связано с несколькими основными факторами, которые определяются свойствами самого балластного материала и внешними факторами [2]. Основным свойством балласта является возможность щебня сопротивляться удару и истираемости. От значения этих параметров в значительной степени будет зависеть интенсивность накопления продуктов переработки щебня в процессе эксплуатации пути и работы подбивочных машин. В процессе эксплуатации балластный слой может дополнительно засоряться продуктами, перевозимыми по железнодорожному пути, пылеватыми частицами, переносимыми ветром, и вследствие процессов диффузии материала нижележащих слоев в балласт [3–5].



Рис. 1. Определение толщины и загрязненности балластного слоя

Для оценки связи между истираемостью, сопротивлением щебня удару и засоренностью балластного слоя проведена серия лабораторных тестов с анализом 271 пробы, которые были отобраны на действующих участках железнодорожного пути Северо-Кавказской железной дороги, расположенных в Ростовской области и Краснодарском крае (участки Звереве – Сулин, Гулькевичи – Отрадо – Кубанская, Персиановка – Локомотивстрой, Ладожская – Двубратский, Морская – Синявская, Александровка – Кизитеринка). Для каждой пробы был определен фракционный состав и засоренность, для 67 проб проведены испытания по определению сопротивления щебня удару на копре и истираемости по ГОСТ 7392-2014, ГОСТ 8269.0-97 [6–8].

Для учета на рассматриваемых участках пропущенного тоннажа в межремонтный период полученные значения засоренности приведены из расчета на 1 млн тонн брутто. В данной работе учитывались значения грузонапряженности на рассматриваемых участках и интервал времени эксплуатации пути между ремонтами. График зависимости приведен на рис. 2.

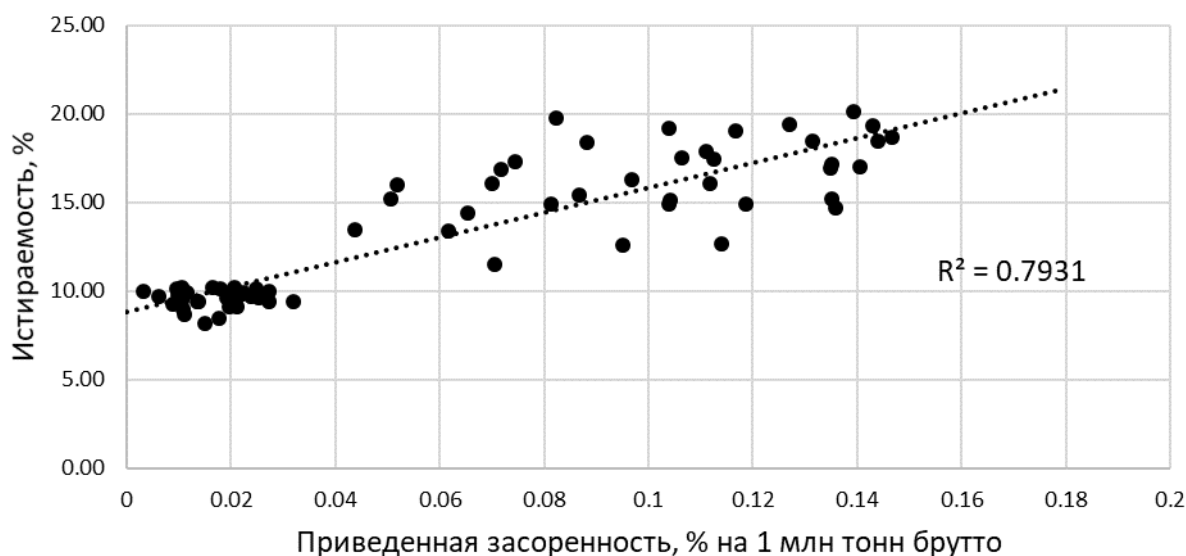


Рис. 2. Зависимость засоренности балластного слоя от истираемости щебня с учётом пропущенного тоннажа

Аналогичный график построен для зависимости засоренности балласта от сопротивления щебня удару на копре (рис. 3).

Линейная аппроксимация данных, в которых учтен пропущенный тоннаж, привела к увеличению коэффициента детерминации для зависимости засоренности от истираемости до 0,793 и уменьшению коэффициента детерминации для зависимости засоренности от сопротивления удару до 0,271.

Усреднение данных истираемости, сопротивления удару и засоренности на участках Звереве – Сулин, Гулькевичи – Отрадо-Кубанская, Персиановка – Локомотивстрой, Ладожская – Двубратский, Морская – Синявская, Александровка – Кизитеринка указаны точками и приводит к линейным зависимостям, приведенным на рис. 4 и 5, пунктирной линией.

Линейная аппроксимация по усредненным данным приводит к коэффициенту детерминации для зависимости засорённости от истираемости, равному 0,866, и для зависимости засоренности от сопротивления удару – 0,133.

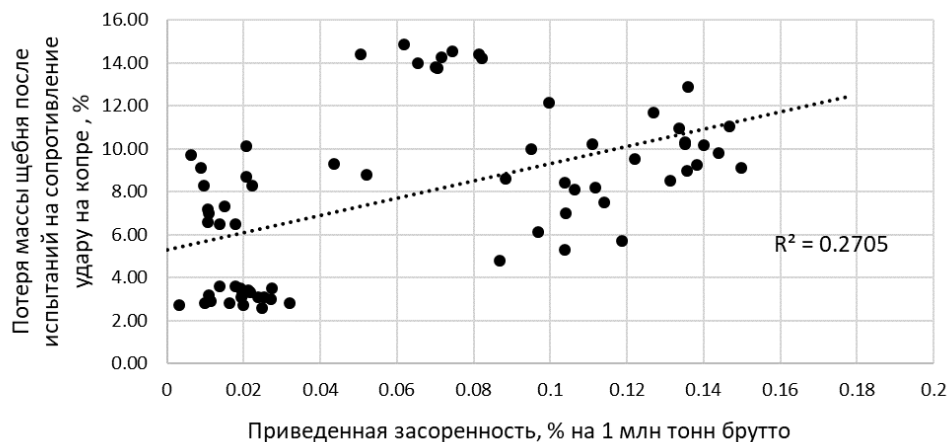


Рис. 3. Зависимость засоренности балластного слоя от сопротивления щебня удару на копре с учетом пропущенного тоннажа

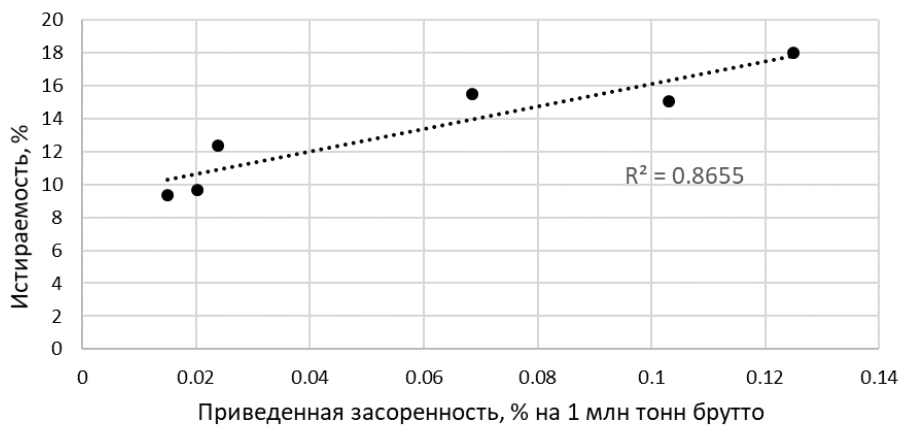


Рис. 4. Зависимость засорённости балласта от истираемости щебня, усреднённая по перегонам

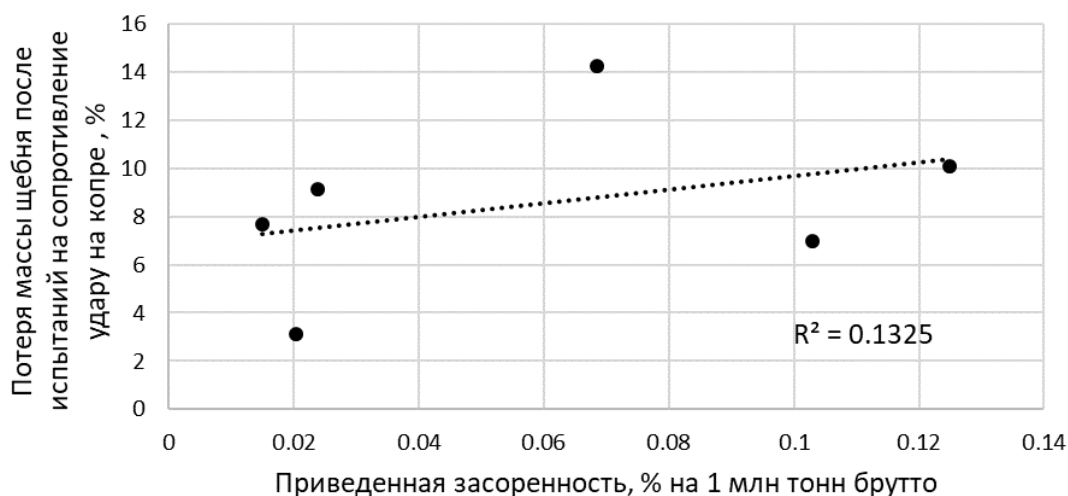


Рис. 5. Зависимость засоренности балластного слоя от сопротивления удару на копре, усредненная по перегонам

Модуль деформации

Определение значений динамического модуля деформации E_{vd} выполнялось с использованием прибора ZORN ZFG 3.0 в тех же местах, где определялась толщина и загрязненность балластного слоя (рис. 6).

Для уменьшения погрешности измерений в одной точке выполнялись три серии измерений с последующим усреднением полученных значений. Вместе с модулем деформации E_{vd} дополнительно определялись значения деформации S_m и коэффициент s/v , характеризующий возможность дальнейшего уплотнения балластного слоя. Как отмечено в инструкции [9] к прибору ZORN ZFG 3.0, если значение $s/v < 3,5$, то дальнейшее уплотнение невозможно, если $s/v > 3,5$, возможно последующее уплотнение грунта.



Рис. 6. Определение характеристики прочности и деформируемости балластного слоя

В результате проведенных измерений получены значения динамического модуля деформации. Используя зависимость (рис. 7), полученную из соотношений динамического E_{vd} и статического E_{v2} модуля деформации, приведенных в нормативных документах (выдержка из ZTVE-STB 09, исследовательское сообщество дорожно-транспортной службы (2009); выдержка из директивы № 836 «Deutsche Bahn AG» (от 20.12.1999), Техническая директива по проведению испытаний грунтов и скального грунта в дорожном строительстве TP BF-StB. Часть B 83), ГОСТ Р 59866-2022 «Дороги автомобильные общего пользования. Показатели деформативности конструктивных слоёв дорожной одежды из несвязных материалов и грунтов земляного полотна. Технические требования и методы определения» [10], можно перейти от полученных полевых измерений прибором ZORN ZFG 3.0 к статическим модулям деформации балластного слоя.

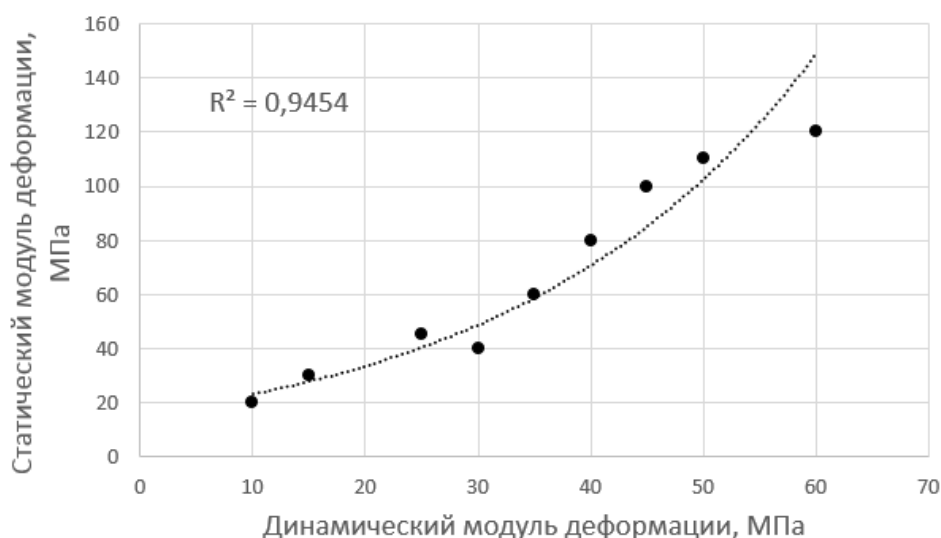


Рис. 7. Взаимосвязь статического и динамического модулей деформации

С учетом связи статического и динамического модулей деформации на рис. 8 и 9 приведены значения модулей на перегоне Звереве – Сулин и грузовом дворе ст. Ростов-Западный. Красными квад-

ратами показаны значения статических модулей деформации, черными точками – динамических модулей деформации, а прерывистыми кривыми соответствующего цвета – их степенная аппроксимация (см. рис. 8 и 9).

Полученная зависимость на рис. 8 показывает слабую связь между модулем деформации балласта и его засоренностью. При этом на рис. 9 связь практически отсутствует.

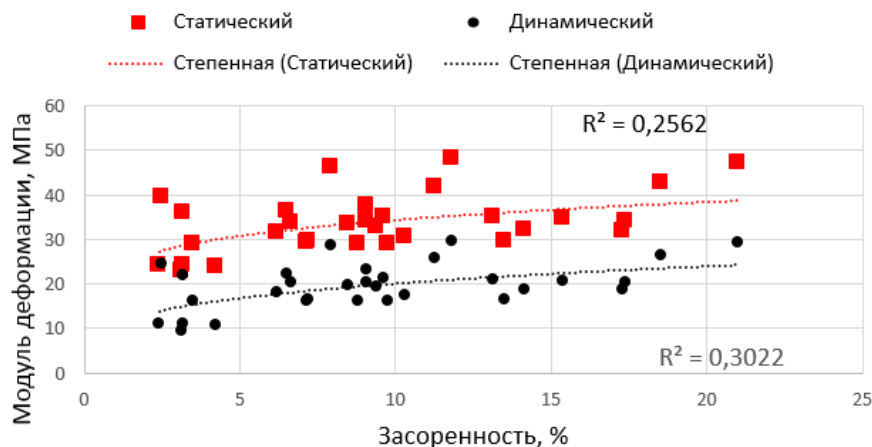


Рис. 8. Зависимость модуля деформации балласта от его засоренности на перегоне Зверово – Сулин

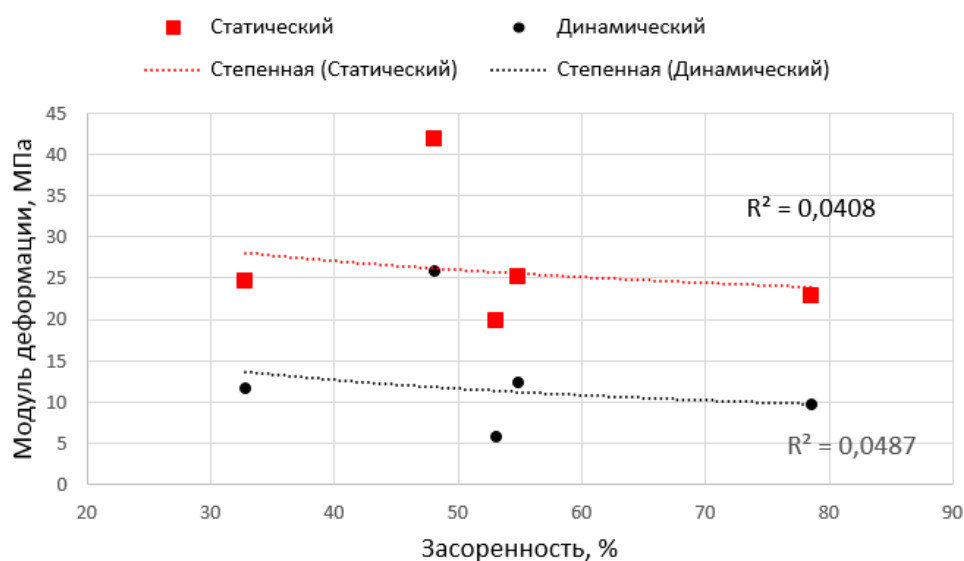


Рис. 9. Зависимость модуля деформации балласта от его засоренности на грузовом дворе станции Ростов-Западный

На рис. 10 приведена обобщенная зависимость модуля деформации от засоренности по четырём объектам. Полученные результаты свидетельствуют, что связь между засоренностью и модулем деформации эксплуатируемого балластного слоя практически отсутствует.

Дополнительный анализ фракционного состава балластного материала позволил при малых значениях динамического модуля деформации, когда их значение не превышает 16 МПа, оценить влияние на этот параметр крупных фракций балластного материала (40–60 мм). Линейная аппроксимация приводит к коэффициенту детерминации равному 0,54, что по шкале Чеддока показывает высокую тесноту связей между приведенными на рис. 11 переменными.

Из рассмотрения полученных графиков видно, что накопление засорителей в процессе эксплуатации пути мало влияет на модуль деформации балластного слоя. Это объясняется тем, что засорение балласта происходит постепенно, при этом стабилизация пути после строительства и ремонтов проис-

ходит на чистом балластном материале с минимальным количеством засорителей. Дальнейшее загрязнение уже не сильно влияет на модуль деформации, поскольку гранулы щебня уже нашли оптимальное положение. Значимую связь фракционного состава от модуля деформации можно видеть только на слабо уплотненном балластном слое, тогда вклад крупной фракции приводит к увеличению модуля деформации.

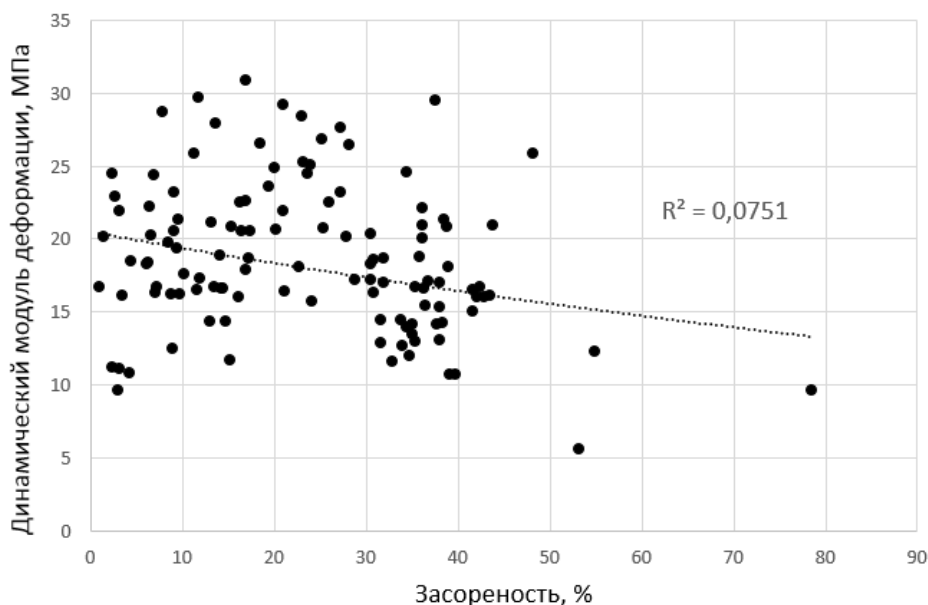


Рис. 10. Зависимость модуля деформации балласта от его засоренности по четырем объектам

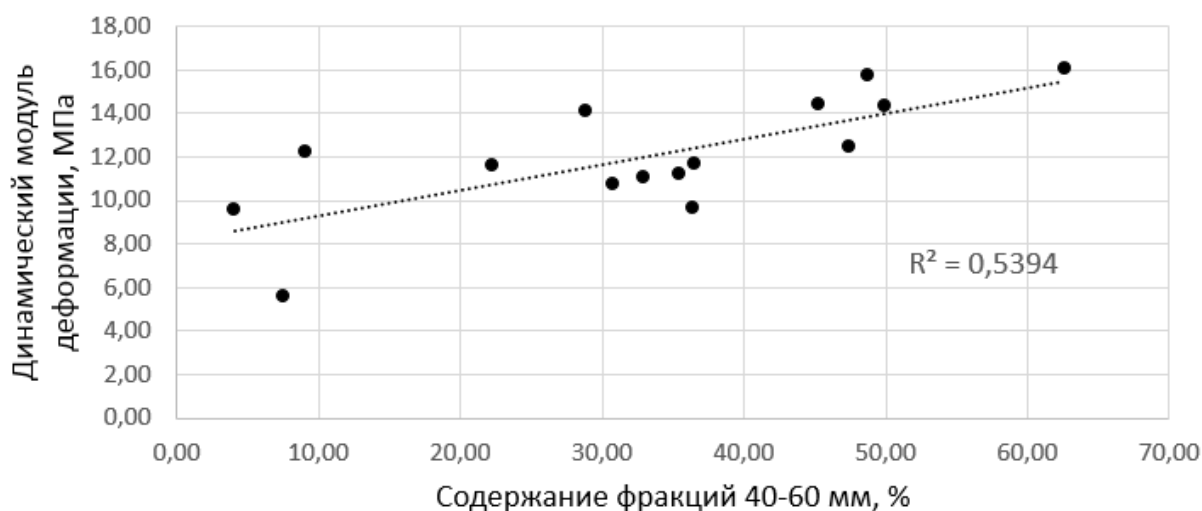


Рис. 11. Зависимость модуля деформации от содержания крупных фракций

Выводы

Анализ полученных зависимостей позволяет сформулировать следующие основные выводы.

1 Установленная связь засоренности балластного слоя от истираемости и сопротивления удару балластного материала может быть использована для прогнозирования накоплений засорителя при наработке тоннажа вместе с другими параметрами, влияющими на это значение.

2 Связь между засоренностью и модулем деформации эксплуатируемого балластного слоя практически отсутствует, при этом если значение динамического модуля деформации не превышает 16 МПа, а рассматриваемый фракционный состав балластного материала находится в пределах 40–60 мм, то линейная аппроксимация приводит к коэффициенту детерминации равному 0,54, что по шкале Чеддока показывает высокую тесноту связей между засоренностью и модулем деформации.

Список литературы

- 1 Методические указания по обследованию балластного слоя № ЦПТ-16-77 / ВНИИ ж.-д. трансп. – Москва : Транспорт, 1979. – 15 с.
- 2 **Колос, А. Ф.** Засорение и загрязнение щебеночного балласта при эксплуатации железнодорожного пути / А. Ф. Колос // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2022. – Т. 19, № 3. – С. 558–575. – DOI 10.20295/1815-588X-2022-3-558-575.
- 3 **Колос, А. Ф.** Метод оценки коэффициента формы зерен щебня, применяемого в балластном слое железнодорожного пути / А. Ф. Колос, Е. А. Лебедева, В. Г. Гладий // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 4 (52). – С. 59–67. – DOI 10.20291/2079-0392-2021-4-59-67.
- 4 Оценка источников загрязнения балластного слоя из гранитного щебня и моделирование разрушения и истирания частиц щебня при динамическом нагружении / А. А. Абрашитов, А. А. Зайцев, А. В. Семак, Л. А. Шаврин // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути : труды XIII Международной научно-технической конференции. Чтения, посвященные памяти профессора Г. М. Шахунянца, Москва, 31 марта – 01 апреля 2016 года. – Москва : МГУПС Императора Николая II, 2016. – С. 184–187. – EDN YKPXBV.
- 5 Application of microwave methods for the determination of ballast material clogging / V. A. Yavna, V. L. Shapovalov, A. V. Morozov, K. M. Ermolov // Geophysics 2015 – 11th EAGE International Scientific and Practical Conference and Exhibition on Engineering and Mining Geophysics, Gelendzhik, April 20–24, 2015. – Gelendzhik : EAGE All Rights, 2015. – P. 33. – DOI 10.3997/2214-4609.201412252.
- 6 **ГОСТ 7392–2014.** Щебень из плотных горных пород для балластного слоя железнодорожного пути. Технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 32 с.
- 7 **ГОСТ 8269.0-97.** Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 65 с.
- 8 **ГОСТ 5180–2015.** Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 20 с.
- 9 Руководство по эксплуатации электронного динамического плотномера грунта с легким падающим грузом ZORN ZFG 3.0. – Стендаль, 2011. – 29 с.

References

- 1 Guidelines for the examination of the ballast layer CPT 16-77 / Institute of Railway Transport – Moscow : Transport, 1979. – 15 p.
- 2 **Kolos, A. F.** Blockage and contamination of crushed stone ballast during the operation of a railway track / A. F. Kolos // Izvestiya of the Saint Petersburg University of Railways. – 2022. – Vol. 19, No. 3. – P. 558–575. – DOI 10.20295/1815-588X-2022-3-558-575.
- 3 **Kolos, A. F.** A method for estimating the coefficient of the shape of crushed stone grains used in the ballast layer of a railway track / A. F. Kolos, E. A. Lebedeva, V. G. Gladyy // Bulletin of the Ural State University of Railways. – 2021. – No. 4 (52). – P. 59–67. – DOI 10.20291/2079-0392-2021-4-59-67.
- 4 Assessment of sources of pollution of the ballast layer from granite rubble and modeling of destruction and abrasion of crushed stone particles under dynamic loading / A. A. Abrashitov, A. A. Zaitsev, A. V. Semak, L. A. Shavrin // Modern problems of design, construction and operation of railway tracks : proceedings of the XIII International Scientific and Technical Conference. Readings dedicated to the memory of Professor G. M. Shakhunyants, Moscow, March 31 – April 01, 2016. – Moscow : MGUPS of Emperor Nicholas II, 2016. – P. 184–187. – EDN YKPXBV.
- 5 Application of microwave methods for the determination of ballast material clogging / V. A. Yavna, V. L. Shapovalov, A. V. Morozov, K. M. Ermolov // Geophysics 2015 – 11th EAGE International Scientific and Practical Conference and Exhibition on Engineering and Mining Geophysics, Gelendzhik, April 20–24, 2015. – Gelendzhik : EAGE All Rights, 2015. – P. 33. – DOI 10.3997/2214-4609.201412252.
- 6 **GOST 7392-2014.** Crushed stone from dense rocks for the ballast layer of the railway track. Technical specifications. – Moscow : Standartinform, 2015. – 32 p.
- 7 **GOST 8269.0-97.** Crushed stone and gravel from dense rocks and industrial waste for construction work. Methods of physical and mechanical tests. – Moscow : Standartinform, 2018. – 65 p.
- 8 **GOST 5180–2015.** Soils. Methods of laboratory determination of physical characteristics. – Moscow : Standartinform, 2016. – 20 p.
- 9 Operating manual of the electronic dynamic soil density meter with a light falling load ZORN ZFG 3.0. – Stendhal, 2011. – 29 p.

10 ГОСТ Р 59866–2022. Дороги автомобильные общего пользования. Показатели деформативности конструктивных слоёв дорожной одежды из несвязных материалов и грунтов земляного полотна. Технические требования и методы определения. – Москва : Российский институт стандартизации, 2022. – 33 с.

10 GOST R 59866–2022. Public automobile roads. Indicators of deformability of structural layers of pavement made of non-cohesive materials and soils of the roadbed. Technical requirements and methods of determination. –Moscow : Russian Institute of Standardization, 2022. – 33 p.

V. L. Shapovalov, V. V. Arkhipov, A. G. Kochur, A. V. Morozov, M. V. Okost

INFLUENCE OF THE CHARACTERISTICS OF THE BALLAST MATERIAL ON THE DEFORMATION MODULUS OF THE OPERATED BALLAST LAYER

Abstract. The paper describes the field experimental studies which were carried out on active sections of the railway track. The research observed the ballast layer using direct methods to determine the properties of the material and the deformation modulus by dynamic tests from the impact force action through a round stamp using the ZORN ZFG 3.0 device. As full-scale sections, hauls with varying contamination and missed tonnage were selected as well as a section of the cargo yard track where the ballast layer had not been cleaned for a long time. Based on the results of the studies, the links between the abrasions of crushed stone, the resistance of crushed stone to impact on a pile driver and the clogging of the ballast layer were determined. It was obtained the links between the clogging of the ballast layer and the deformation modulus.

Keywords: ballast layer, clogging, modulus of deformation, abrasion.

For citation: Influence of the characteristics of the ballast material on the deformation modulus of the operated ballast layer / V. L. Shapovalov, V. V. Arkhipov, A. G. Kochur [et al.] Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 1. – P. 45–54. – DOI 10.46973/0201–727X_2024_1_45.

Сведения об авторах

Шаповалов Владимир Леонидович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), кафедра «Путь и путевое хозяйство», доктор технических наук, доцент, e-mail: cpd@rgups.ru

Архипов Виталий Викторович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), кафедра «Изыскание, проектирование и строительство железных дорог», аспирант, e-mail: vitalijjarkhi@rambler.ru

Кочур Андрей Григорьевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), кафедра «Физика», доктор физико-математических наук, профессор, e-mail: agk2007@bk.ru

Морозов Андрей Владимирович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), кафедра «Физика», кандидат технических наук, e-mail: cpd@rgups.ru

Information about the authors

Shapovalov Vladimir Leonidovich

Rostov State Transport University (RSTU), Chair «Track and Track Facilities», Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, e-mail: cpd@rgups.ru

Arkhipov Vitaly Viktorovich

Rostov State Transport University (RSTU), Chair «Railway Survey, Design and Construction», Postgraduate Student, e-mail: vitalijjarkhi@rambler.ru

Kochur Andrey Grigorievich

Rostov State University of Railways (RSTU), Chair «Physics», Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, e-mail: agk2007@bk.ru

Morozov Andrey Vladimirovich

Rostov State Transport University (RSTU), Chair «Physics», Candidate of Engineering Sciences, e-mail: cpd@rgups.ru

Окост Максим Викторович

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Путь и путевое хозяйство»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: cpd@rgups.ru

Okost Maksim Victorovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Track and Track Facilities»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: cpd@rgups.ru

УПРАВЛЕНИЕ И ЛОГИСТИКА НА ТРАНСПОРТЕ

УДК 656.078 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_55

К. А. Годованый, В. В. Зырянов, А. И. Колобов, Э. А. Мамаев

О МОДЕЛЯХ ТРАНСФОРМАЦИИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЛОГИСТИЧЕСКОГО ОПЕРАТОРА

Аннотация. Значимую роль в современной экономике играют логистические операторы, формирующие не только соответствующий рынок услуг, но и определяющие темпы и тенденции развития национальной экономики. Изменения и трансформации этого рынка, которые послужили предметом исследования в данной статье, требуют качественного анализа.

В работе приводится анализ экономических, технологических и информационных трансформаций логистического рынка, а также методологических подходов к их формализованному представлению в моделях оптимального планирования и управления. Представлен сопоставительный анализ разных концептов исследования изменений в работе логистического оператора: от макроэкономических моделей производственно-транспортного планирования до моделей реинжиниринга логистических процессов на операционном уровне предприятия.

Показано, что использование цифровых платформ и технологий для развития отдельных сервисов логистического рынка является энергоэффективным и ресурсосберегающим трендом развития операционной работы логистического оператора.

Ключевые слова: логистический оператор, активы предприятия, цифровые технологии, цифровая логистика, оптимальное планирование и управление, моделирование.

Для цитирования: О моделях трансформации деятельности логистического оператора / К. А. Годованый, В. В. Зырянов, А. И. Колобов, Э. А. Мамаев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1. – С. 55–65. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_55.

Введение

Поиск эффективных методов реализации решений в экономиках кризисных периодов или нестационарного поведения внешнего и внутреннего рынка является перманентной задачей в области организационно-технологического и управленческого развития предприятий и организаций. Современный период развития отечественной экономики можно в определенной степени характеризовать как переходный, с элементами перестройки экономики со спросом на новые виды деятельности, на новые логистические связи на внутреннем и внешнем рынках. В этих условиях первичный спрос на развитие макроэкономических логистических каналов (макрологистических систем) с использованием передовых инновационных технологий взаимодействия бизнес-единиц и технологий организации транспортно-логистических процессов является доминантным трендом в экономике [1–3].

При относительно консервативном развитии технологий реализации логистических функций и операций востребованными в научно-практическом плане являются вопросы перестройки логистических цепей. Методы и алгоритмы развития логистической деятельности предприятий зависят от масштабов трансформации макро- и микроэкономики логистического предприятия – оператора. В этой связи исследование таких процессов проводится в разных плоскостях: специфика логистической деятельности предприятия, ее локализация на рынке, зависимость от изменений внешней среды и резервов и ресурсов для перепрофилирования бизнеса; методические подходы к трансформации бизнеса; методы и алгоритмы развития логистики предприятия, региона, отрасли; современные инновационные технологии «Индустрии 4.0» в логистической сфере и возможности их использования для развития логистических процессов и др. [2, 4, 5].

Определенная систематизация приведённых направлений научно-практических исследований является актуальной задачей, рассматриваемой в данной работе.

Методы

Операторская деятельность – один из ключевых секторов развития, который в современной экономике направлен на снижение издержек в сфере обращения. Многообразие форм и видов этой

сферы бизнеса формирует вопросы научного обоснования траекторий их развития. Так, по числу и масштабам изменений логистических функций (операций) операторов можно подразделить на локальных, множественных, системных.

Локальная сфера деятельности операторов ориентирована на выполнение отдельных функций, таких как складирование и хранение, производство, транспортировка, снабжение, закупка и др.

Множественные функции логистических операций, как правило, включают последовательность смежных операций (функции) в логистических цепях. Например, «транспортировка – хранение», «производство – транспортировка – распределение», «склад готовой продукции – транспортировка – распределительный центр».

Системные логистические операторы ориентируются на выполнение полного цикла логистических услуг по продвижению материального потока от начального этапа его зарождения до конечного потребления. Схема такой логистической цепи представлена на рис. 1.

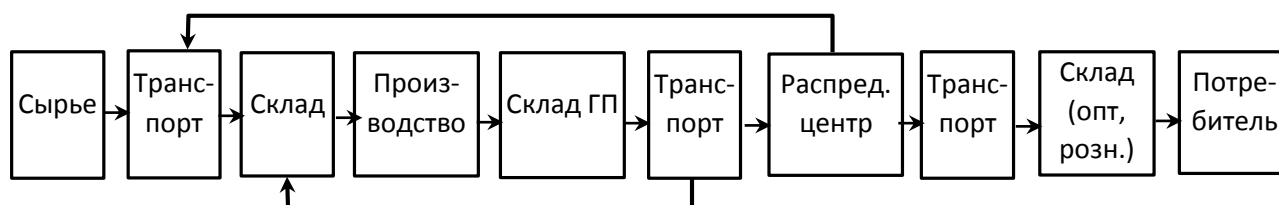


Рис. 1. Схема логистической цепи организации материальных потоков в экономике

Разнообразие спроса на мировом транспортно-логистическом рынке предоставляет операторам вариативность направлений развития своих бизнес-процессов для расширения ассортимента предоставляемых услуг, а также инициации новых участников на рынке для реализации локальных бизнес-процессов. Данная ситуация способствует развитию конкуренции на рынке, что выражается в свободном доступе на рынок новых участников, а также появлением альтернативных вариантов решения разнообразных задач, возникающих в процессе реализации транспортно-логистической деятельности [1, 6]. Алгоритмом повышения экономической и технологической устойчивости компании на рынке может выступать диверсификация. Она позволяет повысить эффективность использования активов, а также повысить гибкость компании в условиях изменения внешней среды.

Изменения внешней и внутренней среды логистического оператора требуют рассмотрения моделей трансформации его деятельности. Определённую сложность представляют системные изменения логистической деятельности, то есть изменения, влияющие на деятельность двух или более хозяйствующих субъектов в цепях поставок. Такие субъекты по форме вовлекаемых средств для реализации транспортно-логистических процессов можно классифицировать на компании с реальными активами и без реальных активов. С точки зрения оценки рисков для капитала в условиях изменения внешней среды компании без собственных активов имеют большую гибкость, так как реализуют свои услуги через договорную деятельность. В мировом опыте развития логистических компаний есть множество успешных примеров эффективного управления цепями поставок с использованием логистических посредников (3PL). Наличие собственных активов позволяет четко определить потенциал возможностей компании, а также ее способность использования диверсификации услуг.

История развития логистического провайдинга (аутсорсинга) для компании эволюционирует от модели 1PL к 5PL, которая ускоряется за счет технологических инноваций организации взаимодействия субъектов в цепях поставок, а также возможностей консолидации (вовлечения) капитала в логистическую сферу деятельности [7, 8].

Экономическая целесообразность диктует подход к реализации новаций от малозатратных и ресурсосберегающих к фондоемким и инфраструктурным решениям для обеспечения гибкости деятельности при изменениях внешней и внутренней среды. Первые относятся к категории организационно-технологических решений по изменению управления технологическими и логистическими процессами предприятия, совершенствованию структуры и внедрению малозатратных цифровых и интеллектуальных технологий. К фондоемким относятся решения от изменения структуры активов до диверсификации видов деятельности, вхождение на новые рынки логистических услуг.

Методологическая основа принятия решений по стратегии развития логистического предприятия включает аналитические, статистические, экспертные, имитационные и другие модели и методы, различающиеся как по постановке целей, так и формам реализации с учетом возможностей информационного обеспечения.

Таким образом, экономические и формализованные модели трансформации бизнеса логистического оператора представляют самостоятельную задачу исследования.

Теоретическая основа

Несмотря на многообразие методологических подходов к моделированию логистических процессов, систем и оптимального планирования работы логистических операторов, целевые функционалы таких задач, вместе с концептуальной моделью объекта исследования, определяют информационный базис принятия решения и результирующее воздействие на субъекты рынка. Приведенная классификация изменений в логистических системах для локальных, множественных и системных изменений представляет не претендующие на полноту следующие типы экономико-математических моделей без разделения на динамические и стохастические варианты [3, 7–11]:

- M1. Модели оптимального размещения и развития производств.
- M2. Задачи синтеза сетей.
- M3. Транспортно-экономические балансы.
- M4. Распределительные модели (задачи) производственно-транспортного планирования.
- M5. Модели транспортного планирования.
- M6. Модели развития транспортной системы в сетевой постановке.
- M7. Модели транспортных балансов.
- M8. Модели маршрутизации перевозок.
- M9. Задачи выбора оптимального вида транспорта.
- M10. Определение оптимальной мультимодальной схемы транспортировки.
- M11. Модели оптимального планирования производств.
- M12. Задачи размещения складских комплексов.
- M13. Модели оптимальной организации складской работы.
- M14. Многоэтапные транспортно-распределительные задачи.

Распределение использования представленных моделей на локальные, множественные или системные изменения, представленное на рис. 2, показывает разнообразие вариантов экономико-математической постановки задач и их целевой ориентации на решение задач с локализацией интересов агентов логистического рынка, включая логистических операторов.

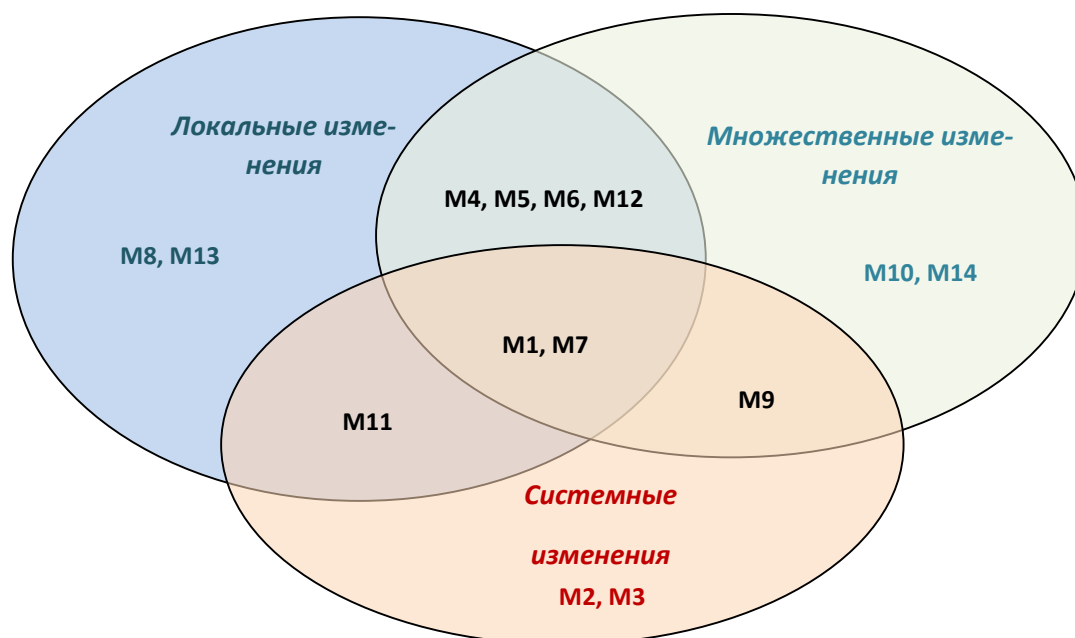


Рис. 2. Распределение моделей для решения задач в условиях локальных, множественных и системных изменений

В обобщенном виде информация для постановки и решения задач в логистической сфере включает следующие массивы:

- I1. Номенклатура продукции в производственно-логистической системе.
- I2. Пункты производства и мощности объемов производства.

13. Пункты потребления и объемы потребления.

14. Пункты промежуточного хранения и переработки материального потока.

15. Структура транспортно-логистической сети: пункты переработки потока, пропускные способности направлений и участков, формы перемещения потока (виды транспорта).

16. Потенциальные возможности по развитию мощностей узлов транспортно-логистической сети и потребные ресурсы для этих целей.

17. Потенциальные возможности по развитию мощностей пунктов производства и переработки материального потока и потребные ресурсы для этих целей.

18. Стоимостные параметры по реализации производственных и транспортно-логистических процессов на сети, приведенные на единицу продукции (потока), – потребности в ресурсах.

Варианты модельно-методических подходов исследования и оптимизации субъектов логистических систем в условиях изменений можно также распределить по следующим категориям, определяемых глубиной и качеством изменений [1, 11–14]:

– модели оценки и формирования новых транспортно-логистических связей;

– модели оптимального распределения материальных потоков в условиях изменений;

– модели оптимизации реализации потоковых процессов в локальных звеньях цепей поставок.

С другой стороны, бизнес логистического оператора связан с конкретным сегментом рынка услуг степенью влияния на него изменений и его возможностями к трансформации бизнеса.

Систематизация внешних и внутренних изменений для целей моделирования и оптимизации логистического оператора представлена в табл. 1.

Таблица 1

**Внешние и внутренние изменения
транспортно-логистической деятельности предприятия (оператора)**

Область изменений	Характер и качество изменений	Виды, параметры и содержание отражаемых изменений в моделях управления
1	2	3
Логистический оператор		
Инфраструктура логистического оператора	<ul style="list-style-type: none"> – Объем и мощности. – Специализация. – Мобильность. – Гибкость 	LI1. Основные фонды и их структура. LI2. Мощность, производительность фондов. LI3. Наличие потенциала развития мощностей производства (услуг). LI4. Виды деятельности. LI5. Возможности диверсификации географии рынка услуг. LI6. Возможности диверсификации видов деятельности на рынке логистических услуг
Бренд и человеческий капитал логистического оператора	<ul style="list-style-type: none"> – Узнаваемость. – Компетенции. – Долгосрочные контракты. – Стратегические партнеры. – База клиентов (контрагентов) 	VI1. Присутствие на всех сегментах рынка. VI2. Число видов логистических услуг на рынке. VI3. Положительные тренды во всех видах логистических услуг. VI4. Контракты с агентами рынка с высоким рейтингом. VI5. Наличие устойчивого портфеля заказов на планируемый период. VI6. Неубывающая по объему клиентская база получателей услуг (контрагентов)

Окончание табл. 1

1	2	3
Изменения внешней среды (логистического рынка)		
Объемные и качественные изменения	<ul style="list-style-type: none"> – Объемы потоков. – Структуры потоков. – Изменения в номенклатуре и объемах производства. – Изменения в номенклатуре и объемах потребления 	VI1. Основные фонды и их структура. VI2. Мощность, производительность фондов. VI3. Виды деятельности. VI4. Возможности диверсификации географии рынка услуг. VI5. Возможности диверсификации видов деятельности на рынке логистических услуг
Инфраструктура логистической системы	<ul style="list-style-type: none"> – Ограничения в товаро-(грузо-) проводящей сети. – Исключение, прибавление элементов сети. – Существенное (кратное) изменение параметров элементов сети 	П1. Пропускные способности транспортной сети. П2. Мощности пунктов хранения (распределения). П3. Новые элементы и (или) модернизация существующих элементов логистической системы
Системообразующие агенты логистического рынка	<ul style="list-style-type: none"> – Изменения на логистическом рынке по ключевым агентам. – Рост активности субъектов рынка 	S1. Изменения типологии рынка. S2. Уход (приход) новых логистических операторов
Макроэкономическая среда деятельности логистических операторов	<ul style="list-style-type: none"> – Изменение нормативно-правовой среды. – Макроэкономические изменения, влияющие на национальную экономику 	G1. Существенное регулирование ценовой (тарифной) политики. G2. Ограничения, влияющие на реализацию логистических потоков (санкции, преференции)

Результаты

Без формализованного представления вышеприведенных моделей изменений логистического рынка М1-М14 их информационное заполнение имеет вид, представленный в табл. 2.

Таблица 2

**Информационные массивы в моделях изменений
транспортно-логистической деятельности предприятия (оператора)**

Обозначение модели	Изменения и параметры, отражаемые в модели (табл. 1)	Информационные массивы в постановке модели
1	2	3
М1	LI2, LI3, LI6, VII, VI4, VI5, П1, П3	I1, I2, I3, I4, I5, I6, I7, I8
М2	LI2, LI3, VII, VI2, П1, П2, П3, SI1, GI2	I2, I3, I5, I7, I8
М3	LI1, LI2, LI3, LI6, VII, VI2, VI3, VI4, VI5, П2, П3, GI1, GI2	I1, I2, I3, I4, I5, I7, I8
М4	LI4, LI6, BI1, BI2, VI2, VI3, VI4, П1, П2, П3	I1, I2, I3, I4, I5, I6, I7, I8
М5	LI2, LI5, LI6, VI2, П1	I2, I3, I5, I6, I7, I8
М6	LI2, LI5, LI6, VI2, П1	I2, I3, I5, I6, I7, I8

Окончание табл. 2

1	2	3
M7	LI1, LI2, VI1, VI2, VI3, VI4, VI5, П1, П2, SI1	I1, I2, I3, I4, I5, I6, I7, I8
M8	LI2, LI5, LI6, VI2, П1	I1, I2, I3, I4, I5, I6, I7, I8
M9	LI1, LI2, LI3, LI4, LI5, LI6, BI1, BI2, BI3, BI4, BI5, BI6, VI1, VI2, VI3, П1, П2, GI1	I2, I3, I4, I5, I8
M10	LI1, LI2, LI3, LI5, LI6, BI1, BI2, BI4, BI5, BI6, VI1, VI2, VI3, П1, П2, SI1, SI2, GI1	I2, I3, I4, I5, I8
M11	LI2, LI3, LI4, VI1, VI2, VI3, П1, П2, GI1	I1, I2, I3, I4, I5, I6, I7, I8
M12	LI2, LI3, LI4, VI1, VI2, VI3, VI4, VI5, П1, П2, П3, SI1, GI2	I1, I2, I3, I4, I5, I8
M13	LI4, BI2, BI4, BI5, BI6, VI1, VI3, П2, GI1	I1, I8
M14	LI4, LI6, BI1, BI2, VI2, VI3, VI4, П1, П2, П3	I2, I3, I4, I5, I8

В зависимости от оперативности реагирования компании на изменения, действия компании могут быть стратегического или адаптивного характера. Первый предполагает наличие определенной информации о возможных изменениях на рынке, что позволяет получить конкурентное преимущество. Во втором случае компания реагирует уже после проявления изменений и, проводя определенные мероприятия, адаптируется к новым условиям. В зависимости от глубины и скорости изменений во внешней среде можно выделить следующие формы адаптации к ним (рис. 3):

- реформирование – долгосрочный процесс изменения во всех областях взаимоотношений участников на макроуровне экономики;
- реинжиниринг – радикальное переосмысление способов реализации бизнес-процессов с целью резкого улучшения показателей деятельности всего предприятия (организации);
- реструктуризация – процесс внутрисистемных качественных изменений без изменения связей или самих участников системы с целью повышения общей эффективности системы;
- перепроектирование – процесс, предполагающий реорганизацию связей и элементов логистической цепи [1].



Рис. 3. Распределение методов действия ЛС в условиях изменения внешней среды

Результатом изменений во внешней среде, а также реакции участников рынка являются следующие состояния:

- появление нового участника транспортно-логистического рынка. Примером может служить реформирование структуры ОАО «РЖД», в результате которого было создано много новых участников

железнодорожного транспортного рынка (операторы подвижного состава, структурные дирекции, провайдеры логистических услуг);

– переход участника рынка в другой сегмент. Вследствие снижения рентабельности капитала и роста конкуренции в текущем сегменте участник может перейти в другой сегмент для повышения эффективности своих активов с сохранением связей;

– выход участника из отрасли. По причине неэффективных управленческих решений возможна потеря доли рынка и отсутствие возможности ее восстановления;

– объединение участников рынка. Возможны варианты реализации: объединение на равных правах (сотрудничество) с целью повышения эффективности или поглощение элемента цепи поставок с целью сохранения показателей деятельности всей цепи [1].

Ключевым фактором эффективного реагирования на изменения внешней среды на современном этапе можно считать цифровые технологии. Они позволяют реализовать процессы планирования и мониторинга деятельности, ускорить движение сопутствующих потоков (информационного и финансового), а также обеспечивают процессы поддержки принятия управленческих решений (рис. 4).

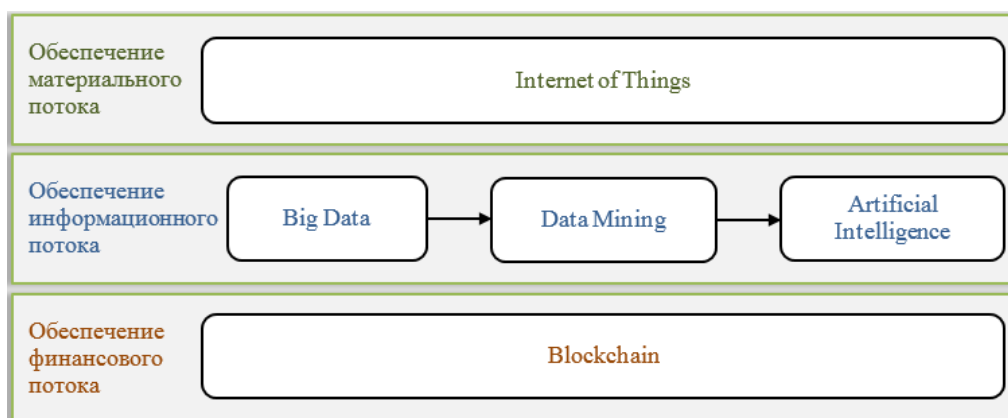


Рис. 4. Цифровые технологии в логистических потоках

В настоящий момент можно выделить несколько средств цифровизации, которые позволяют повысить эффективность продвижения материального потока [4, 5, 9, 15–18].

Интернет вещей (Internet of Things) позволяет организовать взаимодействие между физическими объектами с целью сокращения влияния человеческого фактора, при этом формируется единая информационная сеть для эффективной координации и управления потоками.

Большие данные (Big Data) производят накопление и структурирование больших массивов данных в специализированной сфере деятельности.

Добыча данных (Data Mining) реализует поиск паттернов и закономерностей в больших массивах данных с помощью специализированных технологий.

Искусственный интеллект (Artificial Intelligence) генерирует варианты решения на базе данных собранных и обработанных другими цифровыми технологиями с целью оптимизация технологических, экономических процессов.

Блокчейн (Blockchain) производит шифрование последовательностей данных, отражающих содержание бизнес-процессов, обеспечивает контроль цифровых операций.

Роль цифровых технологий, несомненно, велика, но для различных предприятий процесс внедрения и эксплуатации таких систем в первую очередь определяется целями, задачами и возможностями каждого конкретного участника.

Выводы

Перманентность изменений внешней среды требует поиска оптимальных траекторий развития на стратегическом и операционном уровнях агентов логистического рынка с учетом организации процессов, функций, реализуемых агентом логистического рынка (и цепей поставок).

Самый большой импульс к развитию логистических технологий дает цифровая трансформация экономики и общества. При этом выбор стратегии развития и формирование соответствующей аналитической модели находится в компетенции менеджмента компании. Качественная оценка состояния и положения компании на рынке формирует запрос на глубинные изменения с использованием представ-

ленного формализованного методического аппарата исследования транспортно-логистического пространства. Необходимость в реструктуризации или в реинжиниринге, глубина проблем в развитии логистических систем зависит от макроизменений в экономике, а выбор программы (алгоритма) реструктуризации и реинжиниринга зависит от степени вовлеченности предприятия и организации в трансформационные процессы внутренней и внешней среды.

Как показывает анализ, вовлеченность в реализацию логистических целей агентов транспортно-логистического рынка и комплексный подход их анализа с использованием оптимизационных моделей увеличивает эффективность принимаемых решений, повышает конкурентоспособность экономики.

Список литературы

1 **Колобов, А. И.** Развитие логистических услуг в условиях изменений / А. И. Колобов, Э. А. Мамаев // Транспорт : наука, образование, производство : труды Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 26–28 апреля 2023 г. Т. 2. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2023. – С. 193–196. – ISBN 978-5-907295-89-6.

2 **Лёвин, Б. А.** Цифровая железная дорога: принципы и технологии / Б. А. Лёвин, В. Я. Цветков // Мир транспорта. – 2018. – Т. 16, № 3 (76). – С. 50–61. – DOI 10.30932/1992-3252-2018-16-3-5.

3 Инновационные процессы логистического менеджмента в интеллектуальных транспортных системах. Т. 1. / Л. А. Андреева, В. В. Багинова, А. С. Балалаев [и др.]. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2015. – 336 с. – ISBN 978-5-89035-867-7.

4 **Багинова, В. В.** Цифровые технологии транспортного холдинга / В. В. Багинова, Б. А. Левин, Э. А. Мамаев // Логистика и управление цепями поставок. – 2021. – № 6 (105). – С. 15–18. – ISSN 2587-6775.

5 **Мамаев, Э. А.** Логистика и транспорт в цифровой экономике / Э. А. Мамаев // Транспорт и логистика : инновационная инфраструктура, интеллектуальные и ресурсосберегающие технологии, экономика и управление : сборник научных трудов II международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 07–08 февраля 2018 г. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2018. – С. 8–12. – ISBN 978-5-88814-772-6.

6 Логистика : монография / В. В. Багинова [и др.] ; под общей редакцией В. В. Багиновой. – Москва : Прометей, 2020. – 292 с. – ISBN 978-5-00172-070-6.

7 **Мамаев, Э. А.** Модель активности агентов в транспортно-логистических и технологических системах / Э. А. Мамаев, А. Н. Гуда, К. А. Годованый // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 12 (84). – С. 246–259. – ISSN 2073-8633.

8 **Алибеков, Б. И.** Модели трансформации логистических систем / Б. И. Алибеков, Э. А. Мамаев // Транспорт и логистика : Развитие в условиях

References

1 **Kolobov, A. I.** Development of logistics services in conditions of change / A. I. Kolobov, E. A. Mamaev // Transport: science, education, production : Proceedings of the International Scientific and Practical conference, Rostov-on-Don, April 26–28, 2023. Vol. 2. – Rostov-on-Don : Rostov State Transport University, 2023. – P. 193–196. – ISBN 978-5-907295-89-6.

2 **Levin, B. A.** Digital railway: principles and technologies / B. A. Levin, V. Ya. Tsvetkov // Mir Transporta. – 2018. – Vol. 16, No. 3 (76). – P. 50–61. – DOI 10.30932/1992-3252-2018-16-3-5.

3 Innovative processes of logistics management in intelligent transport systems. Vol. 1. / L. A. Andreeva, V. V. Baginova, A. S. Balalae [et al.]. – Moscow : Training and methodological center for education in railway transport, 2015. – 336 p. – ISBN 978-5-89035-867-7.

4 **Baginova, V. V.** Digital technologies of transport holding company / V. V. Baginova, B. A. Levin, E. A. Mamaev // Logistics and supply chain management. – 2021. – No. 6 (105). – P. 15–18. – ISSN 2587-6775.

5 **Mamaev, E. A.** Logistics and transport in the digital economy / E. A. Mamaev // Transport and logistics : innovative infrastructure, intelligent and resource-saving technologies, economics and management : Collection of scientific papers of the II international scientific-practical conference, Rostov-on-Don, February 07–08, 2018. – Rostov-on-Don : Rostov State Transport University, 2018. – P. 8–12. – ISBN 978-5-88814-772-6.

6 Logistics: monograph / V. V. Baginova [et al.] ; under the general editorship of V. V. Baginova. – Moscow : Prometheus Publishing House, 2020. – 292 p. – ISBN 978-5-00172-070-6.

7 **Mamaev, E. A.** Model of agent activity in transport, logistics and technological systems / E. A. Mamaev, A. N. Guda, K. A. Golovany // Inzhenernyj Vestnik Dona. – 2021. – No. 12 (84). – P. 246–259. – ISSN 2073-8633.

8 **Alibekov, B. I.** Models of transformation of logical systems / B. I. Alibekov, E. A. Mamaev // Transport and logistics : Development in the

глобальных изменений потоков : сборник научных трудов VII международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 01–02 февраля 2023 г. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2023. – С. 25–27. – ISBN 978-5-907295-82-7.

9 **Алибеков, Б. И.** Оптимальное размещение и развитие структурированных объектов региональной транспортной системы / Б. И. Алибеков // Транспорт : наука, техника, управление : научный информационный сборник. – 2012. – № 2. – С. 3–8. – ISSN 0236-1914.

10 **Покровская, О. Д.** Принципы реализации комплексных транспортно-логистических услуг на железнодорожном транспорте и требования к ним / О. Д. Покровская // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2020. – Т. 17, № 3. – С. 288–303. – DOI 10.20295/1815-588X-2020-3-288-303.

11 **Напольских, Д. Л.** Методологические подходы к оптимизации пространственного размещения предприятий региональных промышленных кластеров / Д. Л. Напольских // Теоретическая и прикладная экономика. – 2018. – № 3. – С. 170–180. – ISSN 2409-8647.

12 Транспортно-логистические системы в условиях системных изменений в экономике / Э. А. Мамаев, А. Н. Гуда, В. А. Финоченко, К. А. Годованый // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 2 (86). – С. 145–154. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_2_145.

13 Перевозки грузов в железнодорожно-морском сообщении на юге России / К. В. Кудряшов, В. Н. Зубков, Э. А. Мамаев, Е. А. Чеботарева // Железнодорожный транспорт. – 2019. – № 4. – С. 4–10. – ISSN 0044-4448.

14 **Маколова, Л. В.** Экологизация транспортной деятельности на урбанизированных территориях на основе реинжиниринга инфраструктуры / Л. В. Маколова, Э. А. Мамаев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1 (89). – С. 86–94. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_86.

15 **Дмитриев, А. В.** Цифровые информационные технологии в экосистемах транспортно-логистического обслуживания / А. В. Дмитриев. – Санкт-Петербург : СПбГЭУ, 2021. – 160 с. – ISBN 978-5-7310-5328-0.

16 На основе логистической модели управления / А. Г. Черняев, В. Н. Зубков, Э. А. Мамаев, Е. А. Чеботарева // Железнодорожный транспорт. – 2017. – № 11. – С. 17–24. – ISSN 0044-4448.

context of global changes in flows : Collection of scientific papers of the VII International Scientific and practical conference, Rostov-on-Don, February 01–02, 2023. – Rostov-on-Don : Rostov State Transport University, 2023. – P. 25–27. – ISBN 978-5-907295-82-7.

9 **Alibekov, B. I.** Optimal placement and development of structured objects of the regional transport system / B. I. Alibekov // Transport : science, technology, management : scientific information collection. – 2012. – No. 2. – P. 3–8. – ISSN 0236-1914.

10 **Pokrovskaya, O. D.** Principles of implementation of integrated transport and logistics services in railway transport and requirements for them / O. D. Pokrovskaya // Proceedings of the Saint Petersburg University of Railway Engineering. – 2020. – Vol. 17, No. 3. – P. 288–303. – DOI 10.20295/1815-588X-2020-3-288-303.

11 **Napolskikh, D. L.** Methodological approaches to optimizing the spatial location of enterprises of regional industrial clusters / D. L. Napolskikh // Theoretical and applied economics. – 2018. – No. 3. – P. 170–180. – ISSN 2409-8647.

12 Transport and logistics systems in the context of systemic changes in the economy / E. A. Mamaev, A. N. Guda, V. A. Finochenko, K. A. Golovany // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2022. – No. 2 (86). – P. 145–154. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_2_145.

13 Cargo transportation in rail and sea communication in the south of Russia / K. V. Kudryashov, V. N. Zubkov, E. A. Mamaev, E. A. Chebotareva // Zheleznodorozhnyj transport. – 2019. – No. 4. – P. 4–10. – ISSN 0044-4448.

14 **Makolova, L. V.** Ecologization of transport activities in urbanized territories based on infrastructure reengineering / L. V. Makolova, E. A. Mamaev // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 1 (89). – P. 86–94. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_86.

15 **Dmitriev, A. V.** Digital information technologies in ecosystems of transport and logistics services / A. V. Dmitriev. – Saint Petersburg : Saint Petersburg State University of Economics, 2021. – 160 p. – ISBN 978-5-7310-5328-0.

16 Based on the logistic management model / A. G. Chernyaev, V. N. Zubkov, E. A. Mamaev, E. A. Chebotareva // Zheleznodorozhnyj transport. – 2017. – No. 11. – P. 17–24. – ISSN 0044-4448.

17 **Мамаев, Э. А.** Принципы и положения единого информационного пространства рынка транспортных услуг / Э. А. Мамаев, И. А. Порицкий // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 1 (24). – URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1497> (дата обращения 01.12.2023). – ISSN 2073-8633.

18 **Михайлюк, М. В.** Логистика Интернет-торговли как фактор развития многоканальных цепей поставок в системе товародвижения потребительского рынка : монография / М. В. Михайлюк. – Ростов на-Дону : РГУПС, 2018. – 232 с.

17 **Mamaev, E. A.** Principles and provisions of the unified information space of the transport services market / E. A. Mamaev, I. A. Poretsky // Inzhenerniy Vestnik Dona. – 2013. – No. 1 (24). – URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1497> (date of access: 12/01/2023). – ISSN 2073-8633.

18 **Mikhailyuk, M. V.** Logistics of online commerce as a factor in the development of multichannel supply chains in the consumer market distribution system : monograph / M. V. Mikhailyuk. – Rostov-on-Don : RSTU, 2018. – 232 p.

K. A. Godovany, V. V. Zyryanov, A. I. Kolobov, E. A. Mamaev

ABOUT THE MODELS OF TRANSFORMATION OF THE LOGISTICS OPERATOR'S ACTIVITIES

Abstract. Logistics operators play a significant role in the modern economy, forming not only the relevant service market, but also determining the pace and trends of development of the national economy. The changes and transformations of this market require their qualitative analysis, which are the subject of research in this article.

The paper provides an analysis of the economic, technological and informational transformations of the logistics market, as well as methodological approaches to their formalized representation in optimal planning and management models. A comparative analysis of different concepts of the study of changes in the work of a logistics operator is presented: from macroeconomic models of production and transport planning to models of reengineering of logistics processes at the operational level of the enterprise.

It is shown that the use of digital platforms and technologies for the development of individual services of the logistics market is an energy-efficient and resource-saving trend in the development of operational work of a logistics operator.

Keywords: logistics operator, enterprise assets, digital technologies, digital logistics, optimal planning and management, modeling.

For citation: About the models of transformation of the logistics operator's activities / K. A. Godovany, V. V. Zyryanov, A. I. Kolobov, E. A. Mamaev // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 1. – P. 55–65. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_55.

Сведения об авторах

Годованый Кирилл Александрович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), кафедра «Логистика и управление транспортными системами», старший преподаватель, e-mail: godcorp@yandex.ru

Зырянов Владимир Васильевич

Донской государственный технический университет (ДГТУ), кафедра «Организация перевозок и дорожного движения», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, e-mail: tolbaga@mail.ru

Information about the authors

Godovany Kirill Alexandrovich

Rostov State Transport University (RSTU), Chair «Logistics and Management of Transport Systems», Senior Lecturer, e-mail: godcorp@yandex.ru

Zyryanov Vladimir Vasilievich

Don State Technical University (DSTU), Chair «Transportation and Traffic Management», Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Chair, e-mail: tolbaga@mail.ru

Колобов Артем Игоревич

АО «РЖД Логистика»
филиал в г. Ростове-на-Дону,
директор филиала,
e-mail: KolobovAI@rzdlog.ru

Мамаев Энвер Агапашаевич

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Логистика и управление
транспортными системами»,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой,
e-mail: mamaev_enver@mail.ru

Kolobov Artem Igorevich

SC «Russian Railways Logistics»,
Rostov-on-Don Branch,
Head of the Branch,
e-mail: KolobovAI@rzdlog.ru

Mamaev Enver Agapashaevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Logistics and Management of Transport
Systems»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Head of the Chair,
e-mail: mamaev_enver@mail.ru

В. Н. Зубков, Н. Н. Мусиенко

АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ И МЕРЫ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ НА ПРИПОРТОВОЙ ГРУЗОВОЙ СТАНЦИИ НОВОРОССИЙСК

Аннотация. Выполнен анализ показателей припортовой грузовой станции Новороссийск и разработаны меры по их выполнению. Установлено, что основными причинами снижения объемов выгрузки явились ограничения, связанные с геополитическими событиями в стране, неблагоприятными погодными условиями в порту, отсутствием у получателей складских емкостей и морских судов, коронавирусной инфекцией в России и др. Это приводит к невыполнению простоя местных вагонов на станции Новороссийск, что потребовало проведения анализа и выявления причин невыполнения простоя местного вагона на ответственности ОАО «РЖД» по элементам: «от прибытия до подачи», «от окончания грузовой операции до уборки» и «от уборки до отправления». Среди основных причин невыполнения простоя местного вагона на ответственности ОАО «РЖД» можно выделить ожидание оформления переадресовки, а также простоя вагонов без оформления перевозочных документов ввиду запрета погрузки на Западно-Сибирскую дорогу и др. Также проведен анализ простоя местных вагонов на ответственности грузополучателей, который показал его завышение на подъездных путях всеми клиентами. Основными причинами невыполнения нормы простоя местных вагонов на ответственности грузополучателей являются: несвоевременный подход морских судов, неисправность погрузочно-выгрузочной техники и механизмов, прибытие поездов вне плана их подвода, наличие излишнего вагонопотока в адрес ряда предприятий, обслуживаемых станцией.

Ключевые слова: количественные и качественные показатели работы станции, простоя местного вагона, рабочий парк вагонов, причины невыполнения норм простоя вагонов, меры по сокращению простоя вагонов, эффективность использования вагонного парка.

Для цитирования: Зубков, В. Н. Анализ показателей и меры по их выполнению на припортовой грузовой станции Новороссийск / В. Н. Зубков, Н. Н. Мусиенко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1. – С. 66–78. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_66.

Введение

Объемы и доли выгрузки вагонов в среднем за сутки на припортовых станциях Северо-Кавказской железной дороги (СКЖД) за исследуемый период представлены на рис. 1. Как видно из рисунка, в настоящее время объемы выгрузки в вагонах по станции Новороссийск наибольшие и составляют 38 % от общего объема припортовых станций. Анализ показал, что на СКЖД за исследуемый период 2019–2023 годы в адрес станции Новороссийск отмечались случаи, когда вагонов поступало больше перерабатывающих способностей обслуживаемых предприятий, поэтому планируемые объемы выгрузки и нормы простоя вагонов не выполнялись. Невыполнение норм простоя на станции привело к завышению нормы рабочего парка вагонов на станции Новороссийск. Кроме того, при работе по «прямому» варианту «вагон – борт судна» вагоны подводятся с запасом, часть из них не вмещается в судовую партию и после завершения погрузки судна остается невостребованной, простаивая в ожидании подхода следующего судна. Кроме того, растет доля отставленных от движения поездов назначением на станцию Новороссийск из-за несоблюдения плана подвода поездов, что является одной из главных причин невыполнения количественных и качественных показателей работы станции. Одной из главных задач автоматизированных систем, обеспечивающих логистическое управление грузопотоками в крупных узлах, является обеспечение согласованного подвода грузов и подвижного состава к стыковым пунктам различных видов транспорта: портам, перегрузочным станциям, основным терминалам, крупным промышленным комплексам. На СКЖД около 70 % грузовых перевозок осуществляется в адрес портов Азово-Черноморского бассейна, что при неравномерном подводе экспортных грузов значительно влияет на выполнение количественных и качественных показателей.

Основная часть

В связи с этим и в целях совершенствования технологии работы станции Новороссийск произведен анализ факторов, влияющих на выполнение количественных и качественных показателей её работы.

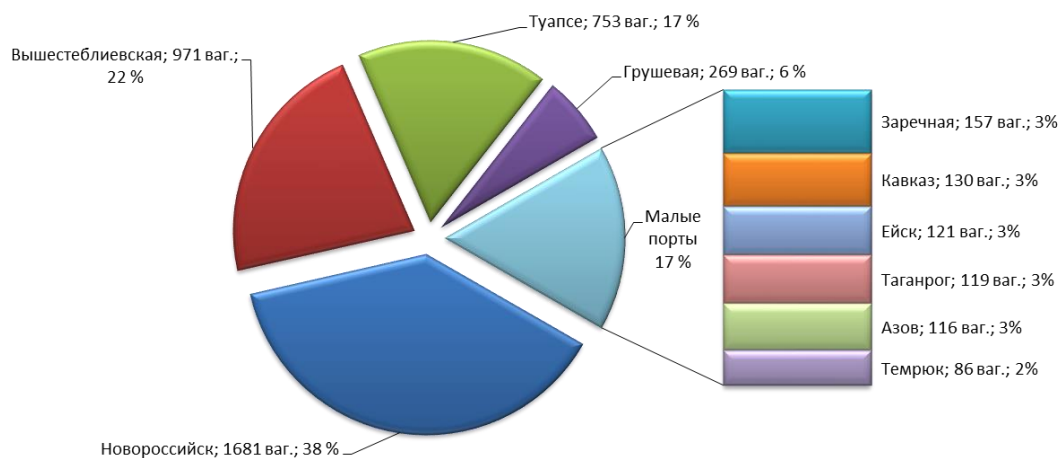


Рис. 1. Доли выгрузки припортовых станций СКЖД за декабрь 2020 года

Среднесуточный грузооборот за 2019–2020 годы в порту и на других подъездных путях, обслуживаемых станцией Новороссийск, представлен в табл. 1.

Таблица 1

Среднесуточный грузооборот в порту и на других подъездных путях, обслуживаемых станцией Новороссийск, за 2019–2020 годы

Погрузка, ваг/т	Выгрузка, ваг/т	Грузооборот, ваг/т	Погрузка, ваг/т	Выгрузка, ваг/т	Грузооборот, ваг/т	% к 2019 г.
12 месяцев 2019 г.			12 месяцев 2020 г.			
204,5	1534,9	1739,4	162,9	1505,8	1668,6	95,9
6654,8	99484	106138,9	4095,9	100052,7	104148,7	98,1

Динамика выгрузки в вагонах по грузовой станции Новороссийск ежемесячно за 2019–2021 гг. показала, что максимальный среднесуточный объем выгрузки по станции в 2019 году наблюдался в январе – 1749 ваг/сут, а наименьший в июне – 1255 ваг/сут, в 2020 году максимальный в декабре – 1681 ваг/сут, а наименьший в июле – 1171 ваг/сут (рис. 2).

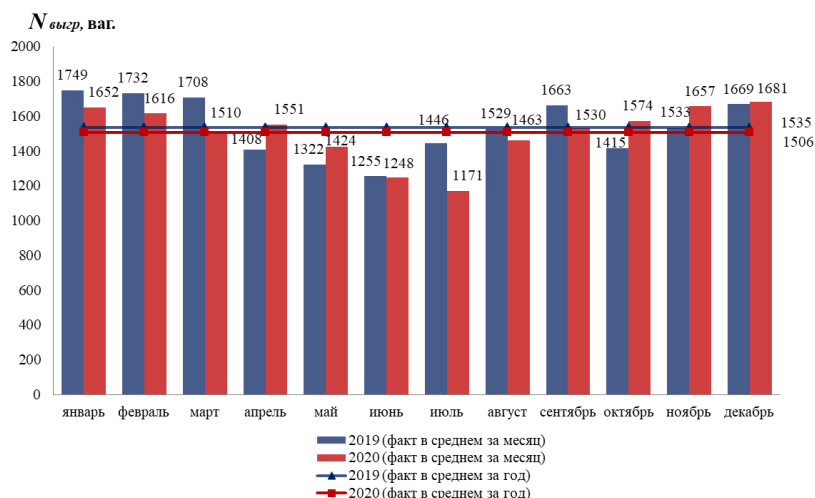


Рис. 2. Динамика среднесуточной выгрузки в вагонах по грузовой станции Новороссийск ежемесячно за 2019–2020 гг.

Анализ среднесуточной выгрузки за 2019–2020 годы показал, что снижение объемов в 2020 г. относительно аналогичного периода 2019 года отмечено по основным получателям: ОАО «НСПЗ» (–28 %), ОАО «НЛП» (–28,7 %), ОАО «Цемкомбинат» (–35,8 %), ПАО «НМТП» (–1 %), ООО «НМТ» (–18,7 %). Невыполнение планового задания произошло из-за недостаточного потока вагонов на станцию под выгрузку в адрес вышеуказанных предприятий прежде всего из-за коронавируса в России.

На станции Новороссийск за 12 месяцев 2021 года объемы выгрузки составили 1477,6 ваг/сут, что ниже плана на 81,8 ваг/сут (выполнение 94,8 %), и ниже уровня 2019 года на 28,2 ваг/сут (выполнение 98,1 %).

Невыполнение планового задания произошло также из-за снижения потока груза под выгрузку на следующие предприятия: ПАО «НМТП», ПАО «НКХП», ООО «НЗТ», АО «КСК». Динамика погрузки, выгрузки и грузооборота в вагонах на грузовой станции Новороссийск представлена на рис. 3.

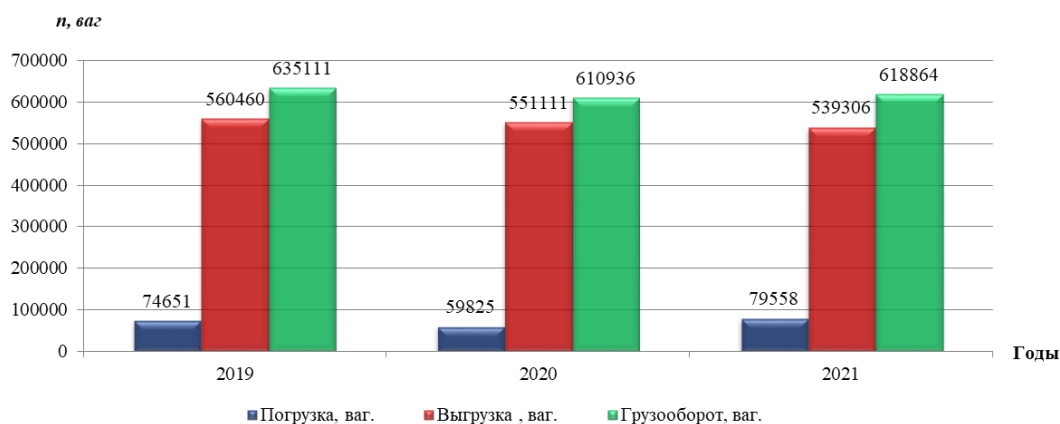


Рис. 3. Динамика погрузки, выгрузки и грузооборота в вагонах на грузовой станции Новороссийск

Выгрузка на припортовой станции Новороссийск в ноябре 2022 года составила 1 365 вагонов, что на 99 вагонов меньше среднесуточной выгрузки аналогичного периода 2021 года. Причиной снижения выгрузки явилось необеспечение грузополучателями в портах договорных норм на выгрузку из-за неблагоприятных погодных условий (в ноябре только в порту Новороссийск действовало 11 штормовых предупреждений общей продолжительностью более 11 суток (ветер 15–20 м/с при порывах до 24 м/с, высота волны до 4 метров)). Из-за коронавируса в 2020–2022 годах также отмечалось снижение погрузки на сети ОАО «РЖД» в адрес станции Новороссийск следующих грузов: руды, черных металлов и угля в адрес ПАО «НМТП»; черных металлов в адрес АО «Новороссийский судоремонтный завод»; мазута топочного и газойля в адрес ООО «Новороссийский мазутный терминал»; зерновых грузов в адрес ПАО «НКХП», ЗАО «КСК» и ООО «НЗТ».

Среднесуточная выгрузка по станции Новороссийск за 11 месяцев 2022 года составила 1 287 вагонов, что на 186 вагонов меньше среднесуточной выгрузки аналогичного периода 2021 года. Причиной снижения объема выгрузки относительно аналогичного периода 2021 года явились ограничения, связанные с геополитическими событиями, из-за отсутствия у получателей складских емкостей и флота, нормативных размеров движения грузовых поездов на основных направлениях из-за значительного увеличения пассажирских поездов (в т. ч. из-за закрытия воздушного пространства на юге страны (аэропорты Краснодар, Ростов-на-Дону, Анапа, Геленджик, Элиста, Симферополь).

В 2023 году объемы выгрузки сократились на 2 % по сравнению с 2022 годом. Возникали случаи задержки поездов по вине получателей, что приводило к необходимости пропуска поездов кружностью через Олейниково, из-за чего возникали дополнительные перепробеги вагонов на 367 км. Все это приводило к просрочке в доставке грузов и штрафным санкциям [1–3].

Анализ простоя местных вагонов на грузовой станции Новороссийск за 2019–2021 годы приведен на рис. 4.

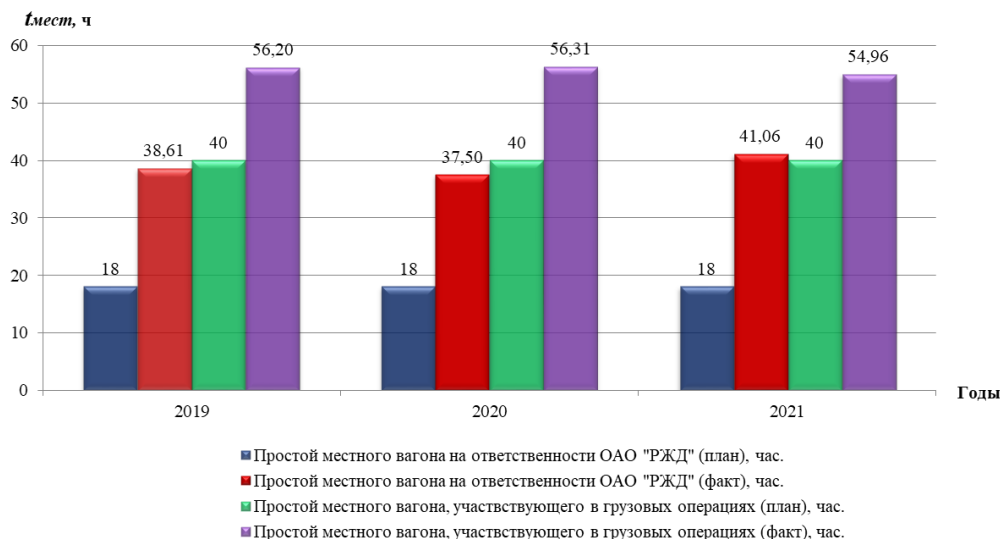


Рис. 4. Динамика простоя местного вагона

Так, за 12 месяцев 2020 года допущено превышение показателя простоя местного вагона на ответственности ОАО «РЖД» с учетом оформленных актов общей формы ГУ-23. При норме 18 ч, фактическое выполнение простоя вагонов составило 25,58 ч, т.е. +7,58 ч к плану, а к 2019 году снизилось на 1,11 ч.

Завышение простоя по элементам «от прибытия до подачи» и «от уборки до отправления» составило 5,12 ч в связи с выполнением договорных обязательств и невозможностью постановки данных вагонов на ответственный простой, превышение по элементу «от уборки до отправления» на 1,83 ч возникло в связи с простоем вагонов из-за ожидания оформления переадресовки, а также простоем вагонов без оформления перевозочных документов ввиду запрета погрузки на Западно-Сибирскую дорогу.

Простой местного вагона на ответственности ОАО «РЖД» за 12 месяцев 2021 года не был выполнен (при норме 18 ч – факт 33,41 ч). Анализ простоя местного вагона на ответственности ОАО «РЖД» по элементам в 2021 году представлен на рис. 5.

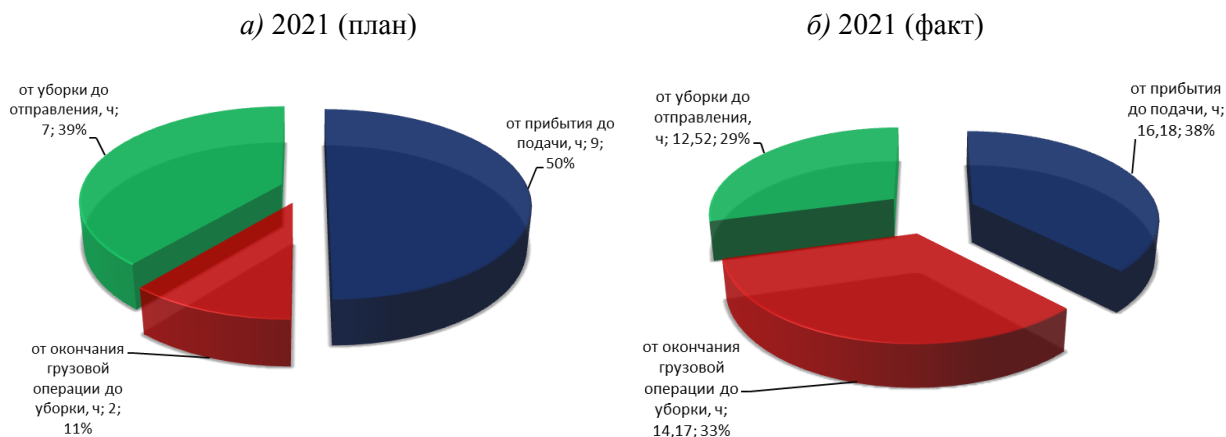


Рис. 5. Анализ простоя местного вагона на ответственности ОАО «РЖД» по элементам

Анализ времени нахождения вагонов на ответственности грузополучателя по припортовой станции Новороссийск показал превышение нормы времени нахождения вагонов по всем клиентам.

Ежесуточное наличие излишнего вагонного парка из-за невыполнения нормативной выгрузки, а также из-за штормовых предупреждений привело к дополнительным простоям вагонов на станции [4]. Превышение простоя на ряде предприятий произошло из-за ряда других причин, а именно: отсутствия планового объема груза для предприятий ОАО «НЗТ», ОАО «НКХП», ЗАО «КСК», ОАО «ИПП», ОАО «НСРЗ»; неисправности погрузочно-выгрузочной техники и механизмов (ОАО «НМТП», ОАО «НЗТ», ОАО «НУТЭП», ОАО «ИПП»); прибытия вагонов ранее графика движения или

вне плана подвода; наличия излишнего вагонопотока в адрес ОАО «ИПП», ОАО «Новороснефтесервис», ООО «Трансбункер», ОАО «Новоросцемент» по причине следования его в разборочных поездах с полезным грузом для других предприятий.

Годовой экономический эффект от сокращения простоя местных вагонов, участвующих в грузовых операциях на станции Новороссийск определяется по формуле

$$\mathcal{E}_{мест} = (t_{мест}^{факт} - t_{мест}^{план}) \cdot n_{мест} \cdot \ell_{ваг-ч} \cdot 12, \text{ руб.}, \quad (1)$$

где $t_{мест}^{план}$ – плановое значение простоя местного вагона, принимается равное $t_{мест}^{план} = 40$ ч;

$t_{мест}^{факт}$ – фактическое выполнение простоя местного вагона, которое составляет $t_{мест}^{факт} = 54,96$ ч;

$n_{мест}$ – количество местных вагонов за месяц, $n_{мест} = 50\,040$ ваг.;

$\ell_{ваг-ч}$ – расходная ставка вагоно-часа грузового вагона, = 60,82 руб/ваг (согласно единичных расходных ставок ОАО «РЖД» с учетом поправочного коэффициента).

Так как фактический простой вагонов больше, чем нормативный, определена величина возможного убытка.

$$\mathcal{E}_{мест}^{факт} = 54,96 \cdot 50040 \cdot 60,82 \cdot 12 = 2007204800 \text{ руб.}$$

$$\mathcal{E}_{мест}^{план} = 40 \cdot 50040 \cdot 60,82 \cdot 12 = 1460847744 \text{ руб.}$$

$$\mathcal{E}_{мест} = 2007204800 - 1460847744 = 546357056 \text{ руб.}$$

В случае сокращения этого превышения, если фактическое время простоя вагонов будет меньше или соответствовать планируемому, имеющийся убыток уменьшится на величину

$$\mathcal{E}_{мест} = \mathcal{E}_{мест}^{факт} - \mathcal{E}_{мест}^{план}. \quad (2)$$

Из-за завышения времени простоя вагонов на станции возрос рабочий парк вагонов станции (рис. 6).

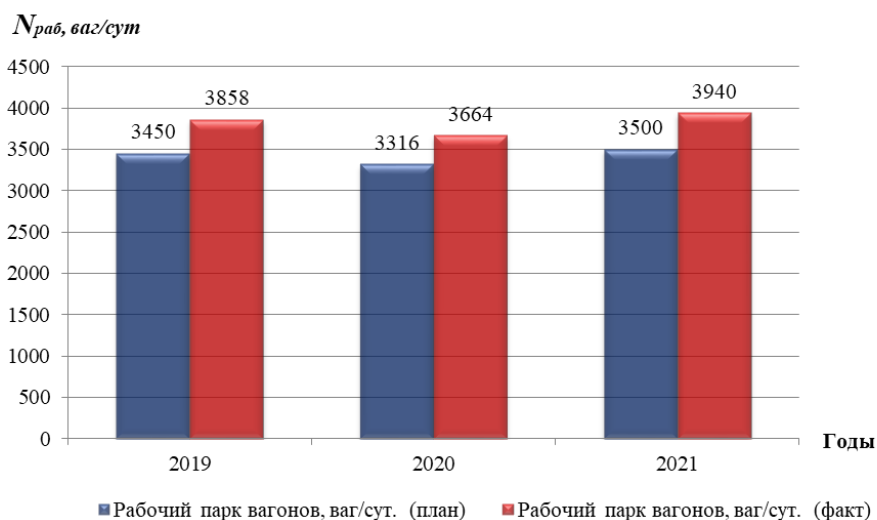


Рис. 6. Анализ рабочего парка грузовой станции Новороссийск

На увеличение рабочего парка станции влияют также вагоны, подведенные для окончания перевалки груза на судно при работе по «прямому» варианту «вагон – борт судна». Указанные вагоны подводятся с запасом, часть из них не вмещаются в судовую партию и после завершения погрузки судна остаются невостребованными и простаивают в ожидании подхода следующего судна. Как показал анализ, доля отставленных от движения поездов назначением на станцию Новорossiysk составила 32,8 поездов (57 %, рис. 7). За несвоевременную доставку грузов получатели предъявили претензии на сумму более 60 млн руб. [5].

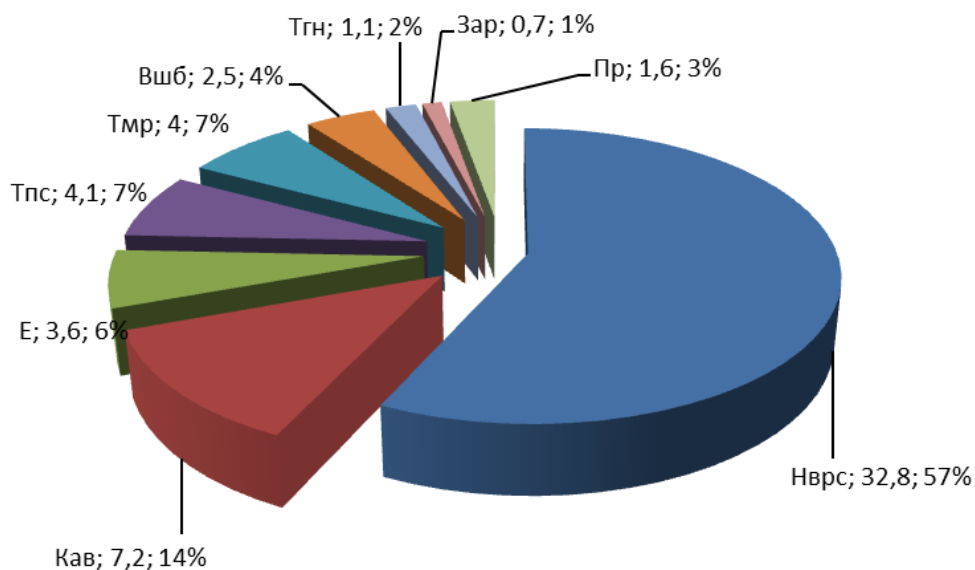


Рис. 7. Анализ рабочего парка грузовой станции Новоросийск

Расчет затрат ОАО «РЖД» на подъем задержанных поездов основан на данных Дирекций управления движением, тяги и инфраструктуры.

Результаты работы дороги в 2022 году показали, что 16 313,4 грузовых поездов было временно отставлено от движения, из них 57 % назначением на станцию Новоросийск. Определены расходы, связанные с подъемом 9298,6 поездов, временно отставленных от движения в 2022 году, назначением на станцию Новоросийск, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Расходы, связанные с подъемом поездов, временно отставленных от движения в 2022 году назначением на станцию Новоросийск

Станция	Поезда, задержанные от движения		(-/+) к 2021 г.	Дополнительные расходы, связанные с тягой брошенных поездов, млн руб.	Расходы, связанные со снижением скорости движения поездов и пропускной способности участков, млн руб.	Дополнительные расходы на техническое обслуживание брошенных поездов работниками вагонного хозяйства, млн руб.	Дополнительные расходы хозяйства управления движением, связанные с организацией «подъёма» брошенных поездов, млн руб.	Общие расходы на «отста новку» и «подъём» поездов, млн руб.	Расходы на отстановку и подъем одного состава поезда, тыс. руб.
	2021 г.	2022 г.							
Новоросийск	12584,4	9298,6	-3285,8	130,04	92,28	9,77	1,56	233,65	25,13

Общие расходы, связанные с отстоем и поднятием составов поездов в 2022 году, составили 233,65 млн руб., в том числе:

- расходы, связанные с тягой поездов, временно отставленных от движения – 130,04 млн руб.;
- расходы, связанные со снижением скорости доставки грузов – 92,28 млн руб.;
- расходы, связанные с техническим обслуживанием составов и полной проверкой тормозов временно остановленных поездов работниками вагонного хозяйства – 9,77 млн руб.;
- расходы работников Дирекции управления движением, связанные с организацией «подъёма» брошенных поездов, – 1,56 млн руб.

Среднее время на «подъём» одного задержанного поезда состоит из следующих элементов:

- прием поездного локомотива машинистом, $t_{лок}^{прием} = 0,67$ ч;
- подготовка поездного локомотива, $t_{лок}^{подг} = 0,5$ ч;

- перемещение поездного локомотива к месту «подъёма» грузового поезда, $t_{лок}^{след} = 2$ ч;
- подача поездного локомотива в голову стоящего состава, $t_{лок}^{подач} = 0,33$ ч;
- техническое обслуживание отставленного от движения состава осмотрщиками вагонов и проба автотормозов в грузовом поезде, $t_{бр.н.}^{ТО} = 1,83$ ч;
- снятие средств закрепления состава, $t_{закр.}^{сн} = 0,23$ ч.

Общее время, затраченное на перечисленные операции, составило 5,57 часа. Расходы, связанные с техническим обслуживанием брошенных поездов работниками локомотивного хозяйства, определяются по формуле:

$$R_{фот}^{тяги} = \frac{R_{нод} \cdot T_{лок\ бр}^{ср\ см}}{10^6}, \text{ руб.}, \quad (3)$$

где $T_{лок\ бр}^{ср\ см}$ – средняя часовая тарифная ставка локомотивной бригады, $T_{лок\ бр}^{ср\ см} = 793,54$ руб.

$R_{нод}$ – затраты поездо-часов на «подъём» брошенных составов поездов за год определяются по формуле:

$$R_{нод} = n_{бр}^n \cdot t_{нод}, \text{ поездо-час.}, \quad (4)$$

где $n_{бр}^n$ – число брошенных составов поездов, $n_{бр}^n = 9298,6$ составов поездов;

$t_{нод}$ – среднее время на «подъём» одного состава поезда, $t_{нод} = 5,57$ ч.

$$R_{нод} = 9298,6 \cdot 5,57 = 51793,20 \text{ поездо-час.}$$

$$R_{фот}^{тяги} = \frac{51793,20 \cdot 793,54}{10^6} = 41,1 \text{ млн руб.}$$

Страховые взносы составляют 30,4 % от фонда оплаты труда – 12,49 млн руб. Затраты на расходы электроэнергии, связанные с «подъемом» поездов, определяются по формуле:

$$R_{эл} = \frac{R_{нод} \cdot W_{эл} \cdot C_{эл}}{10^6}, \text{ руб.}, \quad (5)$$

где $W_{эл}$ – среднее потребление электроэнергии, $W_{эл} = 219,3$ кВт/ч;

$C_{эл}$ – стоимость 1 кВт/ч электроэнергии, $C_{эл} = 6,73$ руб.

$$R_{эл} = \frac{51793,20 \cdot 219,3 \cdot 6,73}{10^6} = 76,44 \text{ млн руб.}$$

Дополнительные расходы, связанные с тягой брошенных поездов, складываются из затрат на оплату труда осмотрщиков вагонов – 41,11 млн руб., на страхование – 12,49 млн руб. и электроэнергию – 76,49 млн руб. и равны 130,04 млн руб.

Расходы, связанные со снижением скорости доставки грузов, определяются по формуле

$$R_{скор} = t_{ном} \cdot f, \text{ руб.}, \quad (6)$$

где $t_{ном}$ – потери времени движения поездов в пути, $t_{ном} = 34001,24$ ч;

f – укрупненная расходная ставка, используемая в хозяйственной деятельности ОАО «РЖД», на занятие станционных путей, простой грузового вагона и среднего состава поезда, $f = 2714,03$ руб.

$$R_{скор} = 34001,24 \cdot 2714,03 = 92280436,39 \text{ руб.}$$

Расходы на оплату труда осмотрщиков вагонов, связанные с техническим обслуживанием и полной проверкой автотормозов брошенных составов поездов, рассчитываются по формуле (7):

$$R_{ФОТ}^{ваз} = \frac{n_{бр}^{ваз} \cdot t_{мех} + n_{бр}^{ваз} \cdot t_{мор}}{60} \cdot A_{осм}, \text{ руб.}, \quad (7)$$

где $n_{бр}^{ваз}$ – количество вагонов в поездах, отставленных от движения, $n_{бр}^{ваз} = 539318$ вагонов;

$A_{осм}$ – средняя заработная плата осмотрщиков за рассматриваемый период, $A_{осм} = 269,34$ руб./ч;

$t_{мех}$ – средняя норма времени, связанная с техническим обслуживанием одного вагона,

$$t_{\text{мех}} = 2,192 \text{ мин/ваг.};$$

$t_{\text{мор}}$ – средняя норма времени на полное опробование автотормозов, $t_{\text{мор}} = 0,621 \text{ мин/ваг.}$

$$R_{\text{ФОТ}}^{\text{ваг}} = \frac{539318 \cdot 2,192 + 539318 \cdot 0,621}{60} \cdot 269,34 = 6810165,73 \text{ руб.}$$

Расчет расходов на оплату труда работников вагонного хозяйства, связанных с их доставкой к месту подъема грузовых поездов (10 % от ФОТ):

$$R_{\text{досл}} = 0,1 \cdot Z_{\text{ФОТ}}^{\text{ваг}}, \text{ руб.} \quad (8)$$

$$R_{\text{досл}} = 6810165,73 \cdot 0,1 = 681016,57 \text{ руб.}$$

Итого расходы по фонду оплаты труда работников вагонного хозяйства:

$$R_{\text{ФЗП}} = R_{\text{ФОТ}}^{\text{ваг}} + R_{\text{досл}}, \text{ руб.} \quad (9)$$

$$R_{\text{ФЗП}} = 6810165,73 + 681016,57 = 7491182,3 \text{ руб.}$$

Страховые взносы составляют 30,4 % от фонда оплаты труда работников вагонного хозяйства – 2 277 319,42 руб. Дополнительные расходы, связанные с техническим обслуживанием и полной проверкой автотормозов отставленных от движения составов поездов работниками вагонного хозяйства, складываются из расходов на оплату труда – 7,49 млн руб. и страхование – 2,28 млн руб., что составляет 9,77 млн руб.

Дополнительные расходы хозяйства управления движением, связанные с организацией «подъёма» брошенных поездов, определяются по формуле (10):

$$R_{\text{движ}} = ((n_{\text{бр}}^n \cdot B) \cdot H), \text{ руб.}, \quad (10)$$

где B – трудозатраты, связанные с организацией «подъёма» одного поезда, $B = 0,85 \text{ чел-ч}$;

H – расходы на выполнение работ, связанных с организацией «подъёма» одного поезда, $H = 197,52 \text{ руб.}$

Дополнительные расходы на выполнение работ, связанных с организацией «подъёма» одного грузового поезда, включают в себя ввод сообщений в автоматизированные системы контроля и анализа продвижения поездов, оформление и передачу распоряжений или диспетчерских приказов, составление на брошенные поезда актов общей формы ГУ-23, в том числе:

– запрос причины неприема поезда станцией назначения, $t_{\text{пр непр}}^{\text{запрос}} = 10,5 \text{ руб.}$;

– согласование задержки состава поезда с руководством диспетчерского центра управления перевозками (ДЦУП), $t_{\text{задерж.п.}}^{\text{согл}} = 32,13 \text{ руб.}$;

– ввод данных в автоматизированную систему учета оперативных приказов на временную задержку поезда, $t_{\text{задерж.п.}}^{\text{ввод}} = 41,99 \text{ руб.}$;

– проставление штампа на каждом документе с указанием номера приказа, времени и даты отставления поезда, $t_{\text{задерж.п.}}^{\text{штамп}} = 66,85 \text{ руб.}$

$$R_{\text{движ}} = ((9298,6 \cdot 0,85) \cdot 197,52) = 1561160,55 \text{ руб.}$$

Общие расходы, связанные с отставлением и подъёмом брошенных поездов назначением на станцию Новороссийск в 2022 году, составили $R = 233,85 \text{ млн руб.}$, а расходы на задержку одного поезда равны

$$R_{1n} = \frac{R \cdot 1000}{n_{\text{бр}}^n}, \text{ руб.}, \quad (11)$$

$$R_{1n} = \frac{233,65 \cdot 1000}{9298,6} = 25,13 \text{ тыс. руб.}$$

Анализ плана подвода поездов позволил выявить неравномерность подвода поездов в адрес отдельных получателей в связи с несоблюдением расчетного интервала между прибытием поездов;

отсутствие информации о работе локомотивов; недостаточное деление выделенных номенклатур грузов на марки, сорта. Невыполнение плана подвода грузовых поездов на станцию Новороссийск является одной из главных причин невыполнения выгрузки, грузооборота и простоя вагонов [6–8].

По случаям несоблюдения плана подвода поездов на припортовые станции проводятся оперативные разборы, в результате которых устанавливаются причины, повлиявшие на его выполнение, а также степень ответственности причастных служб с дальнейшим предоставлением им материалов разборов для принятия мер. Это связано в основном с виной грузополучателя / грузоотправителя (50 %), отсутствием поездных локомотивов (31 %) и локомотивных бригад в узле (10 %), проведением «окон» (6 %), прочие причины (2 %), неисправностью локомотивов (1 %).

Выводы

Рассмотрены основные количественные и качественные показатели станции Новороссийск за 2019–2023 годы: среднесуточный грузооборот, погрузка и выгрузка припортовой по основным грузополучателям и номенклатуре грузов, простой местных вагонов. Проведенный анализ динамики количественных и качественных показателей работы станции показал, что основными причинами их невыполнения является слабое техническое развитие и оснащение, что требует увеличения количества путей в её парках. Для чего выполнен анализ путевого развития станции Новороссийск, который выявил недостаточную мощность сортировочного парка (рис. 8).

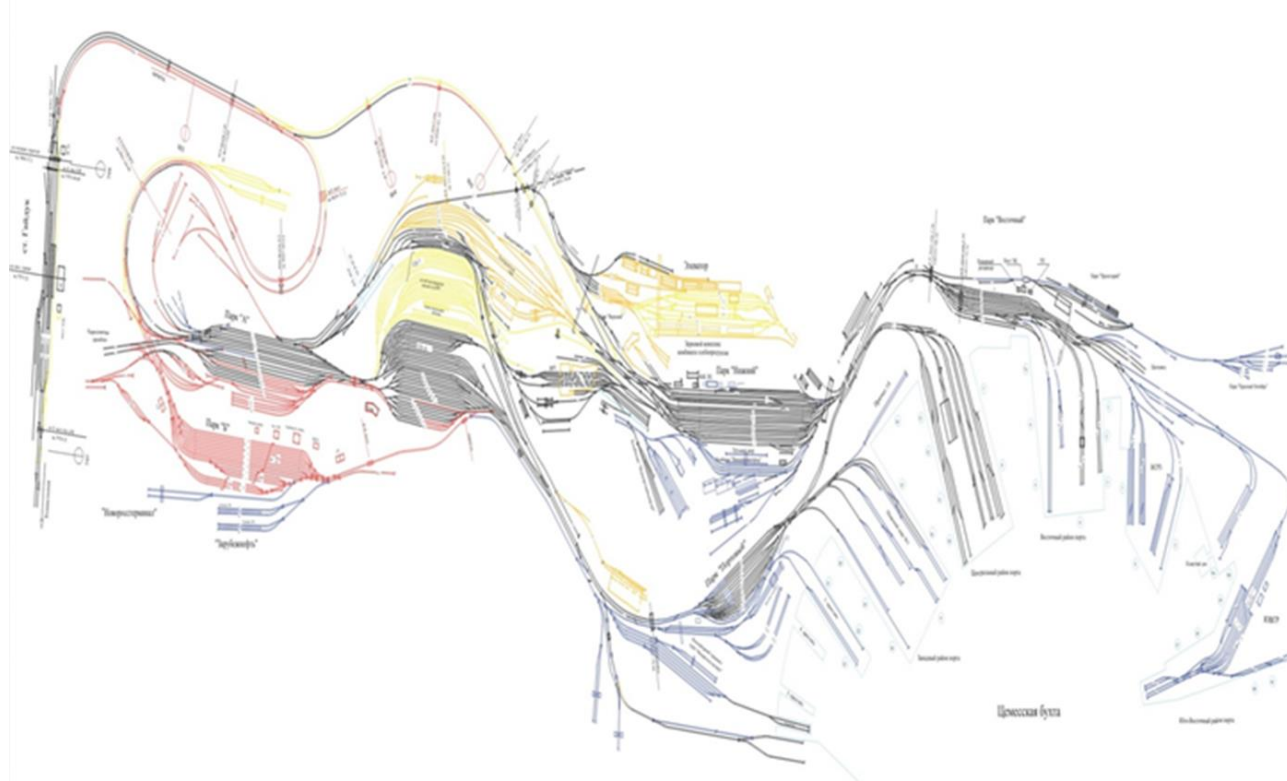


Рис. 8. Схема путевого развития грузовой станции Новороссийск

Имеющегося количества сортировочных путей недостаточно для подборки и формирования передач в адрес 50 подъездных путей предприятий. Хотя количество маршрутных поездов, которые следуют на станцию без переработки, увеличивается, но в то же время возрастает количество разборочных поездов и повторная переработка вагонов на горке. Для некоторых путей необщего пользования производится накопление и формирование передач по номенклатурам груза и количеству примыканий. Помимо этого, имеет место формирование двух групповых передач.

Анализ работы сортировочной горки показал, что наблюдается большой процент повторной переработки разборок из-за недостаточного количества путей сортировочного парка, недостаточной их длины, ожидание судна, таможенных документов и др. Выполнение вышеперечисленных задач даже при скользящей специализации путей сортировочного парка уже становится практически невозможным, что влечет за собой хаотичность в технологии работы станции, бесконечную повторную переработку, нарушение договорных отношений, а также ставит под угрозу безопасность движения поездов. По этой причине требуется

ускорить путевое развитие станции. Из-за прибытия грузов отдельных номенклатур без согласования с грузополучателем вагоны простаивают на станционных путях, завывая рабочий парк станции. В результате возникают дополнительные затраты, связанные с затруднениями в маневровой работе, а также потери от простоя местных вагонов.

Для улучшения технологии работы станции Новороссийск и освоения ожидаемого грузооборота предусмотреть: ускорение строительства парка «Б», включающего 20 сортировочных путей и 7 путей для приема поездов и сортировочную горку; частичную реконструкцию станции Гайдук; сооружение второго главного пути на участке парк «Б» – станция Гайдук; строительство соединительного пути на участке парк «Б» – выходная горловина парка «С»; строительство дополнительного сортировочного пучка парка С из 7 путей; строительство главного пути от блок-поста Кирилловский до парка «Нижний»; строительство соединительных путей между парками «Сортировочный» – «Портовый» – «Восточный»; строительство дополнительных путей в парках «Портовый» и «Восточный».

Для уменьшения объемов повторной сортировки в сортировочном парке уложить дополнительный пучок из 7 путей и съезд на спускной части горки для организации роспуска с 7 путей парка «А». В районном парке «Восточный» дополнительно укладываются два пути с устройством подпорной стенки. Увеличение подач вагонов в Западный район порта реализуется за счет укладки дополнительных путей в парке «Портовый». Между улицей Магистральная и существующим крайним путём парка можно уложить два выставочных пути с устройством забора вдоль улицы Магистральной и выносом существующего трубопровода. Для организации параллельности внутрисканционного движения груженых и порожних вагонов предусматривается укладка дополнительных соединительных путей между парками «Б», «Портовый», «Восточный» и «Нижний».

В статье представлены основные технологические мероприятия, направленные на сокращение простоя вагонов на станции Новороссийск: запрещение перевозки грузов свыше перерабатывающей способности грузовых фронтов получателей, а также дополнительных объемов перевозок внешнеторговых грузов без согласия дороги назначения. Также необходимо предусмотреть: автоматизацию подбора групп вагонов для повышения качества поездообразования и процента маршрутизации поездов в адрес припортовой станции Новороссийск; интеграцию информационных систем АСУ МР, ДИЛС и АСУ СТ в части планирования подачи-уборки вагонов на подъездные пути припортовых станций, подвязки локомотивов и локомотивных бригад под поезда, включенные в план подвода на припортовые станции; формирование рекомендаций по подъему отставленных от движения поездов (график подъема) в случае возникновения технологической возможности на станции назначения по их приему. Для повышения весовых норм для маневрового движения рассмотреть возможность замены парка маневровых локомотивов по станции Новороссийск на однотипные, более мощные (типа ТЭМ-21). В настоящее время изменен принцип подбора вагонов для грузовых фронтов порта Новороссийск. Полная информация о грузе и его назначении в АСУ станций Батайск и Краснодар-Сортировочный обеспечит перенос на них части работы станции Новороссийск. При вводе новых мощностей в перспективе грузооборот увеличится до 50–60 млн тонн в год, возможности узла будут полностью исчерпаны, поэтому потребуется подводить поезда с необходимым грузом в установленное время и в нужном количестве в соответствии с дорожной информационно-логистической системой (ДИЛС). При этом для сокращения продолжительности операций на станции необходимо увеличить процент маршрутизации на подходах к станции, максимально подбирать их по получателям конкретных грузов.

Кроме вышеперечисленного необходимо пересмотреть технологию работы по обработке поездов с организацией параллельного выполнения технологических операций, используя «Нормы оперативного времени и нормативы численности рабочих на пунктах технического обслуживания грузовых вагонов» (осмотр 1 вагона – 5,01 чел/мин по отправлению и 2,32 чел/мин по прибытии), при необходимости – с корректировкой штатной численности осмотровиков-ремонтников вагонов, что позволит сократить время на обработку поезда и, как следствие, простой местного вагона на ответственности ОАО «РЖД».

Реализация предложенных мероприятий позволит улучшить эксплуатационную работу станции и порта, обеспечить выполнение объема выгрузки и нормы простоя местных вагонов. Опыт переустройства и совершенствования ее технологии работы станции Новороссийск в условиях роста объемов перевозок может быть использован в других транспортных узлах для обеспечения перевозочного процесса и совершенствования технологии в условиях интеграции в области информационного взаимодействия железных дорог между собой и с морскими портами [9–11].

Список литературы

- 1 **Аношкин, К. В.** Выполнение сроков доставки грузов и порожних вагонов как мера повышения конкурентоспособности железных дорог / К. В. Аношкин, В. Н. Зубков, Н. Н. Мусиенко // Транспорт и логистика : Развитие в условиях глобальных изменений потоков : Сборник научных трудов VII международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 01–02 февраля 2023 года. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2023. – С. 39–43. – EDN HJJEAU.
- 2 Оценка выполнения сроков доставки грузов на юге России / П. В. Куренков, И. А. Солоп, Е. А. Чеботарева, В. Т. Волов // Экономика железных дорог. – 2023. – № 7. – С. 13–25. – EDN QBTQFT.
- 3 **Зубков, В. Н.** Анализ и меры по сокращению оборота вагона на Северо-Кавказской железной дороге / В. Н. Зубков, Н. Н. Мусиенко, О. А. Ворон, И. Д. Долгий // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2. – С. 197–205 – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_197.
- 4 **Елисеев, С. Ю.** Сокращение простоев грузовых вагонов в ожидании погрузки / С. Ю. Елисеев, А. А. Шатохин // Транспорт : наука, техника, управление. – 2016. – № 5. – С. 19–22. – ISSN 1992-3252.
- 5 **Аношкин, К. В.** Анализ задержанных грузовых поездов в пути следования на припортовые станции Северо-Кавказской железной дороги и меры по снижению их числа / К. В. Аношкин, В. Н. Зубков, Н. Н. Мусиенко // Сборник научных трудов «Транспорт : наука, образование, производство» : труды Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 26–28 апреля 2023 года. Том 2. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2023. – С. 113–117. – EDN QNZXVN.
- 6 **Кучинский, Д. Г.** Планирование и логистическое управление цепью поставок грузов в порты азовочерноморского бассейна / Д. Г. Кучинский, К. В. Кудряшов, В. Н. Зубков // Железнодорожный транспорт. – 2019. – № 9. – С. 4–8. – ISSN 0044-4448.
- 7 Перспективы технологии на железнодорожном транспорте : монография / А. Г. Черняев, В. Н. Зубков, Н. Н. Мусиенко, Е. В. Рязанова ; ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов-на-Дону, 2019. – 143 с. – ISBN 978-5-88814-978-2.
- 8 Логистическое моделирование процесса мультимодальных грузоперевозок через порты Азово-Черноморского бассейна / Е. А. Чеботарева, П. В. Куренков, А. С. Кравец [и др.] // Логистика. – 2022. – № 10. – С. 14–20. –

References

- 1 **Anoshkin, K. V.** Fulfillment of delivery terms of cargo and empty wagons as a measure of increasing the competitiveness of railways / K. V. Anoshkin, V. N. Zubkov, N. N. Musienko // Transport and logistics : Development in the context of global changes in flows : Collection of scientific papers of the VII International Scientific and Practical Conference, Rostov-on-Don, 01–02 February 2023. – Rostov-on-Don, RSTU, 2023. –P. 39–43. – EDN HJJEAU.
- 2 Assessment of the fulfillment of the terms of cargo delivery in the South of Russia / P. V. Kurenkov, I. A. Solop, E. A. Chebotareva, V. T. Volov // Economy of railways. – 2023. – No. 7. – P. 13–25. – EDN QBTQFT.
- 3 **Zubkov, V. N.** Analysis and measures to reduce the turnover of wagons on the North Caucasus Railway / V. N. Zubkov, N. N. Musienko, O. A. Voron, I. D. Dolgiy // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 2. – P. 197–205 – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_197.
- 4 **Eliseev, S. Y.** Reduction of downtime of freight cars waiting for loading / S. Y. Eliseev, A. A. Shatohin // Transport: science, technology, management. – 2016. – No. 5. – P. 19–22. – ISSN 1992-3252.
- 5 **Anoshkin, K. V.** Analysis of delayed freight trains en route to the port stations of the North Caucasus Railway and measures to reduce their number / K. V. Anoshkin, V. N. Zubkov, N. N. Musienko // Collection of scientific papers "Transport : science, education, production" : proceedings of the International Scientific and Practical Conferences, Rostov-on-Don, April 26–28, 2023. Volume 2. – Rostov-on-Don : Rostov State University of Railway Transport, 2023. – P. 113–117. – EDN QNZXVN.
- 6 **Kuchinsky, D. G.** Planning and logistics management of the cargo supply chain to the ports of the Azov Black Sea basin / D. G. Kuchinsky, K. V. Kudryashov, V. N. Zubkov // Rail transport. – 2019. – No. 9. – P. 4–8. – ISSN 0044-4448.
- 7 Prospects of technology in railway transport : monograph / A. G. Chernyaev, V. N. Zubkov, N. N. Musienko, E. V. Ryazanova; FGBOU VO RSTU. – Rostov-on-Don, 2019. – 143 p. – ISBN 978-5-88814-978-2.
- 8 Logistic modeling of the process of multimodal cargo transportation through the ports of the Azov-Black Sea basin / E. A. Chebotareva, P. V. Kurenkov, A. S. Kravets [et al.] // Logistics. – 2022. –

DOI 10.54959/22197222_2022_10_38.

9 **Govorukha, S. A.** Main Directions for Improving the Operational Work of the North Caucasian Traffic Control Directorate / S. A. Govorukha, V. N. Zubkov, N. N. Musienko // In : Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles. Part of the Lecture Notes in Networks and Systems book series (LNNS, vol. 509) / A. Guda (ed.). – Springer, Cham., 2022. – Vol 509. – P. 115–126. – DOI 10.1007/978-3-031-11058-0_12.

10 **Zubkov, V. N.** The Prospective Model of Organization of Freight Transportation on the North Caucasian Railway Range / V. N. Zubkov, N. N. Musienko, K. V. Anoshkin // In : Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles. Part of the Lecture Notes in Networks and Systems book series (LNNS, vol. 510) / A. Guda (ed.). – Springer, Cham., 2022. – Vol 509. – P. 543–554. – DOI 10.1007/978-3-031-11051-1_54.

11 **Zubkov, V. N.** Increasing the capacity of the stressed sections of the north Caucasus railway in the south of Russia / V. N. Zubkov, E. A. Chebotareva, E. V. Ryazanova // Transportation Research Procedia : 10th International Scientific Siberian Transport Forum, TransSiberia 2022, Novosibirsk, 02–05 March 2022. – 2022. – Vol. 63. – P. 1717–1726. – DOI 10.1016/j.trpro.2022.06.186.

No. 10. – P. 14–20. – DOI 10.54959/22197222_2022_10_38.

9 **Govorukha, S. A.** Main Directions for Improving the Operational Work of the North Caucasian Traffic Control Directorate / S. A. Govorukha, V. N. Zubkov, N. N. Musienko // In : Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles. Part of the Lecture Notes in Networks and Systems book series (LNNS, vol. 509) / A. Guda (ed.). – Springer, Cham., 2022. – Vol 509. – P. 115–126. – DOI 10.1007/978-3-031-11058-0_12.

10 **Zubkov, V. N.** The Prospective Model of Organization of Freight Transportation on the North Caucasian Railway Range / V. N. Zubkov, N. N. Musienko, K. V. Anoshkin // In : Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles. Part of the Lecture Notes in Networks and Systems book series (LNNS, vol. 510) / A. Guda (ed.). – Springer, Cham., 2022. – Vol 509. – P. 543–554. – DOI 10.1007/978-3-031-11051-1_54.

11 **Zubkov, V. N.** Increasing the capacity of the stressed sections of the north Caucasus railway in the south of Russia / V. N. Zubkov, E. A. Chebotareva, E. V. Ryazanova // Transportation Research Procedia : 10th International Scientific Siberian Transport Forum, TransSiberia 2022, Novosibirsk, 02–05 March 2022. – 2022. – Vol. 63. – P. 1717–1726. – DOI 10.1016/j.trpro.2022.06.186.

V. N. Zubkov, N. N. Musienko

ANALYSIS OF INDICATORS AND MEASURES FOR THEIR IMPLEMENTATION AT THE NOVOROSIYSK PORT CARGO STATION

Abstract. The analysis of the indicators of the Novorossiysk port cargo station was carried out and measures for their implementation were developed. It was found that the main reasons for the decrease in unloading volumes were restrictions related to geopolitical events in the country, adverse weather conditions in the port, the lack of storage tanks and sea vessels for recipients, coronavirus infection in Russia, etc. This leads to non-fulfillment of the downtime of local wagons at the Novorossiysk station, which required an analysis and identification of the reasons for non-fulfillment of the downtime of a local wagon on the responsibility of JSC "Russian Railways" according to the elements: "from arrival to delivery", "from the end of the cargo operation to cleaning" and "from cleaning to departure". Among the main reasons for non-fulfillment of the downtime of a local carriage on the responsibility of JSC "Russian Railways": waiting for the registration of redirection, as well as the downtime of wagons without registration of transportation documents due to the prohibition of loading on the West Siberian Road, etc. An analysis of the downtime of local wagons on the responsibility of the consignees was also carried out, which showed its overestimation on the access roads by all customers. The main reasons for non-compliance with the standard of downtime of local wagons on the responsibility of the consignees are: untimely approach of ships, malfunction of loading and unloading equipment and mechanisms, arrival of trains outside the plan of their supply, the presence of excessive car traffic to a number of enterprises serviced by the station.

Keywords: quantitative and qualitative indicators of the station operation, idle time of the local car, the working fleet of cars, the reasons for non-fulfillment of idle time of cars, measures to reduce idle time of cars, the efficiency of the use of the car fleet.

For citation: Zubkov, V. N. Analysis of indicators and measures for their implementation at the Novorossiysk port cargo station / V. N. Zubkov, N. N. Musienko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 1. – P. 66–78. – DOI 10.46973/0201–727X_2024_1_66.

Сведения об авторах

Зубков Виктор Николаевич

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Управление эксплуатационной работой»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: uer@rgups.ru

Мусиенко Нина Николаевна

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Управление эксплуатационной работой»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: uer@rgups.ru

Information about the authors

Zubkov Viktor Nikolayevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Operational Work Management»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: uer@rgups.ru

Musienko Nina Nikolayevna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Operational Work Management»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: uer@rgups.ru

В. С. Колокольников, Т. А. Фалалеева

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ПОЕЗДОПОТОКА НА ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ СТАНЦИИ И ПЕРЕГОНОВ

Аннотация. В настоящее время растет доля поездов повышенного веса и длины. Возникает необходимость изучения влияния изменения структуры поездопотока на пропускную способность и инфраструктуру участка.

С помощью имитационного моделирования исследуется пропускная способность участка при пропуске разнородного потока в условиях изменяющейся инфраструктуры. Исследуется вопрос определения необходимого количества удлинённых путей для обработки потока поездов заданной структуры. Выявляется целесообразность введения жесткой специализации путей станции. Определяется пропускная способность станции при разном количестве удлинённых путей, объеме входного потока и соотношения струй в нем. Рассчитаны коэффициенты, приводящие расчетную пропускную способность к полученной в результате моделирования. Определен уровень допустимой полезной загрузки путей грузового удлинённого парка. На основании экспериментов сделан вывод: чем более разнообразен по структуре поездопоток, тем менее плотным он должен быть. За счет регулирования размеров входного потока удастся улучшить использование инфраструктуры станции.

Ключевые слова: анализ задержек, пропускная способность, имитационное моделирование, путевое развитие, неравномерность движения, разнородный поток.

Для цитирования: Колокольников, В. С. Влияние структуры поездопотока на пропускную способность станции и перегонов / В. С. Колокольников, Т. А. Фалалеева // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1. – С. 79–89. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_79.

Введение

С увеличением объемов перевозок растут требования к надежности работы железных дорог. Задержки поездопотока на ключевых станциях оказывают негативное влияние на весь перевозочный процесс: увеличиваются сроки доставки грузов, повышаются издержки. Определяющим фактором безостановочной работы транспортной магистрали и продвижения поездов по ней является слаженная работа составляющих частей на протяжении всего участка.

Организация устойчивого пропуска поездопотока по магистрали относится к наиболее сложным задачам, решаемым на этапе проектирования и реконструирования, и включает в себя выбор подходящей инфраструктуры. Неверное определение пропускной способности элементов и результирующей способности участка приводит к простоям вагонов, задержкам поездов и невозможности освоить заданный поток.

Одной из основных проблем на сегодняшний день является несовпадение расчетной пропускной способности с фактической.

Согласно [1] результирующая пропускная способность расчетного участка принимается по элементу с наименьшим значением пропускной способности. Учитываемыми факторами являются «*емкости путевого развития и длины станционных путей, технически допустимые уровни использования мощности устройств при беспрепятственном приеме поездов*».

Однако не всегда прием поездов осуществляется беспрепятственно. Размеры пропущенного потока напрямую зависят не только от качественного взаимодействия элементов инфраструктуры железной дороги, но и от его структуры.

Существующие категории поездов имеют различную технологию обработки, скорость и приоритетность в движении, а порой требуют специализированного комплекса сооружений. В связи с этим входной поток с отличительной характеристикой на одной и той же инфраструктуре ведет себя иначе, что сказывается на пропускной способности.

Теория

При расчете перерабатывающей способности парков станции предполагается, что все пути могут быть заняты обработкой составов, однако не в полной мере учитывается ритм поступления поездов с перегона, их задержки, простои, структура поездопотока. Фактическое использование путей сильно отличается от расчетного. Для более точного описания перевозочного процесса станцию и пути парков можно выразить комбинацией канала и бункера [2]. Тогда при обработке составов парки выполняют роль канала и роль бункера – во время межоперационных простоев.

В периоды, когда простои поездов на путях станции увеличиваются, то есть пути начинают выполнять роль бункера в большей степени, при неизменной инфраструктуре возрастает потребность в технологических каналах. Из-за их нехватки поезда начинают останавливаться на предшествующем элементе – перегоне. В данном случае он будет выполнять роль бункера с маленькой емкостью, вместимость которого определяется числом блок-участков (не учитывая возможный тяжелый продольный профиль пути, при котором это число снизится). Причем управлять потоком, задерживая определенные категории поездов для пропуска поездов с приоритетом, на нем невозможно, в связи с чем последовательность продвижения поездов по перегону неизменна – очередность поступления совпадает с её выходом. При невозможности станцией принять первый поезд с перегона последующий поток также задерживается, что приводит к снижению пропускной способности участка.

Для нормальной работы перегона, с которого поступают поезда, последующий бункер (станция) должен обеспечивать стабильную заданную емкость и иметь резерв, способный справиться с потоком в пиковые моменты [3]. Но иметь большие резервы невыгодно в связи с большими затратами на их организацию и содержание, поэтому следует вводить мероприятия по временному увеличению полезного использования пропускной способности. В данном случае можно рассмотреть два режима работы: принимать поездопоток на станцию схода при наличии бункера достаточной емкости, в ином случае, управлять потоком. Для этого, используя инфраструктуру предшествующего бункера (если он имеется для определенной категории потока и недалеко расположен), подводить поезда в нужный момент, когда станция готова его принять.

Эксперименты

Рассмотрим работу участковой станции Н. Для явного определения влияния разнородного потока на пропускную способность схема станции и технология работы упрощены. Исключены факторы, вызывающие известные задержки: враждебные передвижения при маневровой работе с маршрутами подачи/уборки локомотивов, нехватка локомотивных бригад, бригад для ТО и т. д.

Технологическая цепочка по обработке поездопотока состоит из приема поезда с нечетного направления Б через горловину в соответствующий парк станции, обработки и отправления через четную горловину на перегон А (рис. 1).

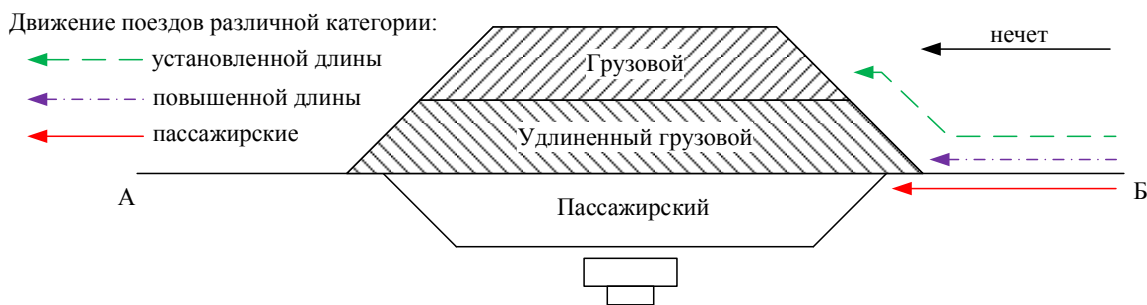


Рис. 1. Схема станции Н «в рыбах» с прилегающими перегонами

На рассматриваемых железнодорожных перегонах отсутствуют «окна», движение поездов на станцию осуществляется непрерывно и только в нечетном направлении. На станции имеется 19 путей, для пассажирских поездов выделено 3 пути, для грузовых – 16. По участку движутся три категории поездов. Для их приема и обработки используются парки: пассажирский, грузовой, обрабатывающий транзитные поезда установленной длины, и удлиненный грузовой парк с увеличенной вместимостью путей для приема и обработки длинносоставных поездов.

В серии экспериментов меняется соотношение числа длинносоставных и поездов установленной длины до тех пор, пока модель справляется с заданным потоком. Число длинных путей увеличивается в

момент, когда станция не принимает суммарно более одного поезда, при этом сохраняется начальное число путей. Для всех экспериментов число пассажирских поездов постоянно – 24 поезда в сутки.

Построение базовой имитационной модели осуществляется с помощью Системы автоматизированного построения имитационных моделей железнодорожных станций и узлов ИСТРА – САПР [4–6]. Расписание поездопотока задается через гистограмму с интервалом поступления в 10 минут. Со станции поезда отправляются в порядке готовности с минимальным интервалом в 10 минут. Пассажирские поезда имеют приоритет в движении.

Временные характеристики технологических операций для каждой категории поездов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные

Категория поездов	Время, мин		
	прибытия	осмотра	отправления
Установленной длины	10	85÷125	5
Повышенной длины	10	100	5
Пассажирские	8	20	4

Для пропуска 143 поездов только одной категории – установленной длины – задействуется 14 путей станции. При изменении процентного соотношения потока (добавив 24 пассажирских поезда с приоритетом в движении) простои на станциях увеличиваются. А для обработки 119 поездов установленной длины требуется уже 16 путей. Это происходит в связи с тем, что грузовые поезда, при условии их готовности к отправлению, вынуждены терять свою нитку отправления, отдавая её пассажирским.

Из-за возникших очередей по отправлению перегон А становится «узким» местом [7, 8]. Ввиду чего очереди по отправлению поездов со станции возрастают, пути парков заняты не только технологическими операциями, но и простоем в ожидании отправления.

Заметив такую взаимосвязь решено провести ряд экспериментов с поэтапным вводом категории поездов с отличительными параметрами – длинносоставные поезда, которые для исключения перекрытия горловины обрабатываются только на путях грузового удлиненного парка.

Соотношение струй поездопотока меняется, количество длинных поездов увеличивается. Число пассажирских поездов остается неизменным, их появление в течение суток случайно, а прием и обработка осуществляются в отдельно выделенном парке с тремя путями. Ввиду того что число пассажирских поездов неизменно, время приема и обработки строго регламентировано, а из-за приоритетности в движении задержки у данной категории поездов не возникает, в дальнейшем рассмотрении и расчетах они отражаться не будут.

При расчете по утвержденной методике возможное число пропущенных поездов через грузовой удлиненный парк за сутки при наличии одного длинного пути определяется по формуле (1):

$$N_{\text{д}}^{1n} = \frac{1440m}{t_{\text{обр}}^{\text{д}}} = \frac{1440 \cdot 1}{115} = 12,5 \approx 12 \text{ поездов повышенной длины,} \quad (1)$$

где m – число путей в удлиненном грузовом парке;

$t_{\text{обр}}^{\text{д}}$ – время обработки одного поезда увеличенной длины.

Для освоения заданного числа поездов повышенной длины должна быть строго соблюдена организация поездопотока на участке – каждые 2 часа должен поступать 1 длинный поезд. То есть на каждые 11 поездов установленной длины приходится 1 поезд повышенной длины.

Появление длинносоставного поезда значительно раньше вызовет его задержку на перегоне и невозможность принимать на станцию другие категории поездов. В случае когда поезд появится позже выделенной для него нитки, полезное использование удлиненного пути сократится, что приведет к снижению пропускной способности не только станции, но и перегона (рис. 2).

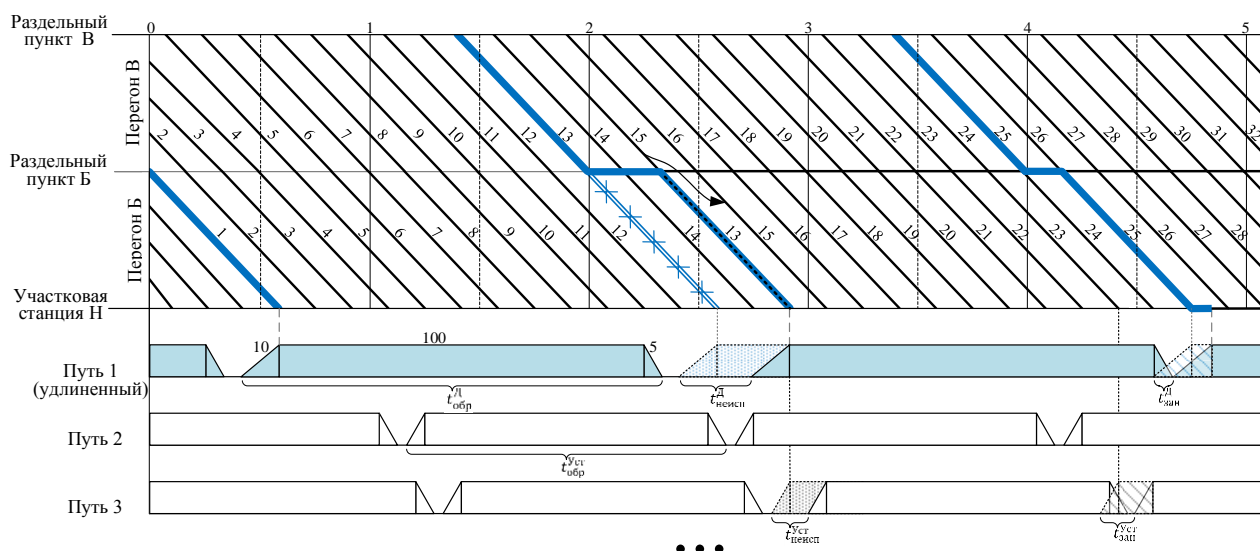


Рис. 2. Влияние несвоевременного приема поезда повышенной длины станцией на пропускную способность участка

На рис. 2 видно, что удлиненный поезд № 13 остановился на раздельном пункте Б. Из-за чего не был отправлен в свою нитку. Ввиду отсутствия в этот момент времени готового к отправлению поезда нитка пропала. Кроме того, при плотном движении поездов по участку несвоевременное отправление длинносоставного поезда с раздельного пункта Б вызывает необходимость занять нитку отправления грузового поезда установленной длины № 15. За счет этого происходит смещение отправления последующих поездов с вынужденной остановкой на раздельном пункте Б (или на перегоне) при наличии свободной инфраструктуры на участковой станции Н.

Возникает время $t_{неисп.}^Д$, когда удлиненный путь не используется из-за не прибывшего вовремя длинносоставного поезда. А в момент времени, когда прибывает следующий длинносоставный поезд № 25, удлиненный путь ещё занят временем обработки предыдущего поезда повышенной длины $t_{обр.}^Д$. В этот промежуток времени $t_{зан}^Д$ последующий поезд не может быть принят на станцию и вынужден простаивать на перегоне Б, дожидаясь освобождения пути подходящей длины. Задержка последующих поездов увеличивается, т. к. они не могут занимать пути грузового парка из-за занятого участка перед станцией.

Из-за занятия длинносоставным поездом грузовой нитки на путях грузового парка также возникает сначала время неиспользования пути $t_{неисп.}^Уст$, а затем $t_{зан}^Уст$, когда из-за занятого пути обработкой предыдущего поезда текущий поезд принять и обработать невозможно.

Стоит отметить, что инфраструктуру предшествующего раздельного пункта можно использовать, когда на рассматриваемой станции отсутствует возможность в данный момент принять поезд данной категории. Данный вариант возможен при наличии подходящего путевого развития для размещения рассматриваемой категории поездов и обоснованности потери ниток.

Результаты

На самом деле поезда движутся по участку в последовательности их готовности к продвижению с учетом приоритетных поездов. Это приводит к неравномерному распределению разных категорий поездов в общем потоке.

Помимо этого, длительные задержки на пути (более 5 мин) вызывают простой последующего длинносоставного поезда перед входным светофором станции, а также невозможности принять другие категории поездов, несмотря на свободную инфраструктуру парков. При плотном потоке (поступление поездов каждые 10 минут) задержки по приему поездов к концу суток только увеличиваются. Узким элементом становятся не только пути грузового удлиненного парка, но и перегон Б, на котором простаивают поезда в ожидании их приема на станцию.

Согласно рис. 2 в модели с одним длинным путем задано расписание прибытия 12 длинных поездов каждые 2 часа. Даже при задании жестких ниток для длинных поездов не всегда удается осво-

ить заданный поток, поскольку поезда занимают пути дольше, чем время их обработки. Это происходит из-за простоев, связанных с ожиданием нитки по отправлению (рис. 3). Также простой в ожидании отправления вызван влиянием движения поездов с приоритетным передвижением.

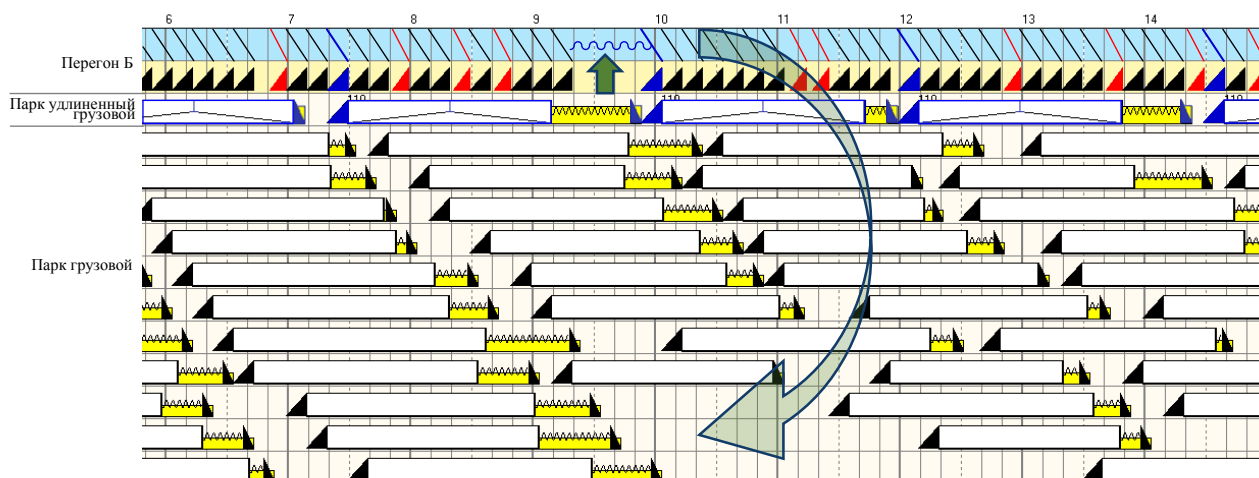


Рис. 3. Фрагмент графика исполненной работы (задержка приема грузовых поездов из-за невозможности принять удлиненный грузовой)
прием и обработка поездов различных категорий: красный – пассажирские, черный – установленной длины, синий – повышенной длины

Выявленная причина не позволяет освоить заданный поездопоток, перерабатывающая способность станции снижается.

В среднем на 30 расчетов из 12 заданных поездов повышенной длины удастся принять лишь 10,7, а отправить на 1 поезд меньше. Сложившаяся ситуация оказывает влияние и на категорию поездов установленной длины – 9 непринятых поездов (рис. 4).

Прибыло		Отправлено	
поездов категории	кол-во	поездов категории	кол-во
Повышенной длины	10,7	Повышенной длины	9,7
Установленной длины	98,2	Установленной длины	101,8
Пассажирские	23,9	Пассажирские	23,5

Непринятые поезда		
поездов категории	кол-во	из-за путей парка
Повышенной длины	1	удлиненного грузового
Установленной длины	9	грузового, удлиненного грузового

Прибыло / Отправлено и простой по паркам						
парк	прибыло (в)	отправлено (в)	простой	ср.кол-во зан путей	кол-во путей	заполнение
Удлиненный грузовой	1173.33	1085.33	2.08	0.96	1	0.89
Грузовой	6874	7107.33	2.25	10.02	15	0.4

Рис. 4. Усредненные данные за 30 прогонов

Из данных рис. 4 видно, что заполнить длинный путь удастся на 89 % за сутки, в течение которых он занят технологическими операциями лишь 19,55 ч, а 3,57 ч отводится на простой поездов. Несмотря на высокое использование данного пути и задание жесткого расписания прибытия поездов увеличенной длины, обработать заданные размеры движения не удастся. Ввиду отсутствия свободной нитки для отправления длинносоставный поезд не был отправлен со станции после его обработки (рис. 3). Удлиненный путь занят простоем поезда до того момента, пока не наступит очередь его отправления. В этот период времени следующий длинносоставный поезд, пришедший согласно заданному расписанию, не может быть принят на станцию. Возникает ситуация, описанная на рис. 3, когда из-за

невозможности принять на станцию удлиненный поезд появляются задержки поездов других категорий, для обработки которых инфраструктура свободна. Несмотря на невысокую загрузку путей грузового парка (40 %), в среднем 9 поездов установленной длины принять и обработать не получается.

Для выявления реальной перерабатывающей способности с разным числом длинных путей проведены эксперименты, число длинносоставных поездов увеличивалось до тех пор, пока на станции число принятых поездов меньше 1.

Когда поток неравномерен по своей структуре, друг за другом могут поступать поезда различной категории, которые имеют неодинаковое время и технологию обработки, а порой требующие приема на специализированные пути.

Рассмотрены модели, в которых технологией станции разрешено принимать в грузовой удлиненный парк и поезда установленной длины при условии нехватки путей в соответствующем парке.

При сгущении поездов установленной длины сначала занимается грузовой парк, но при плотном поступлении может начать задействоваться парк с длинными путями, тогда, в момент, когда начальные грузовые поезда обработаны и отправлены, длинные пути ещё заняты обработкой, в этот момент начинают поступать поезда повышенной длины, но из-за отсутствия подходящей инфраструктуры возникают простои у входного светофора (рис. 5).

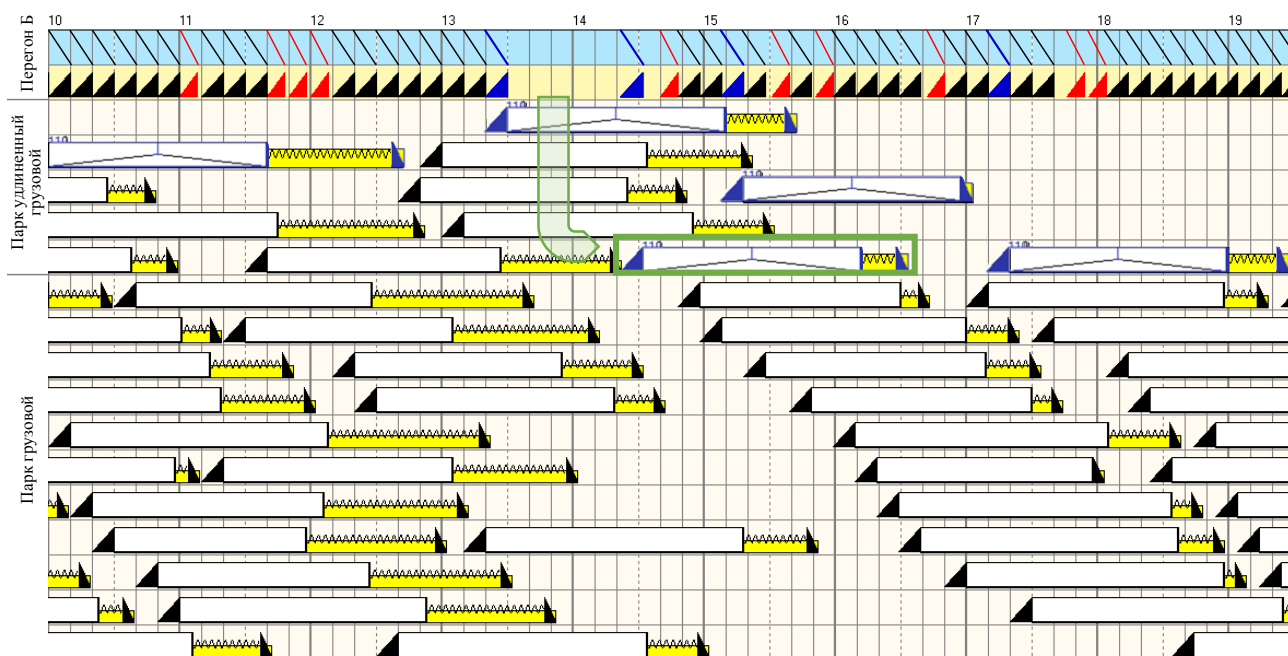


Рис. 5. Фрагмент графика выполненной работы (невозможность принять длинносоставный поезд из-за занятости длинных путей грузовыми поездами установленной длины)

При исследовании графиков выполненной работы (рис. 5), выявлено, что в момент поступления с перегона рассматриваемого длинносоставного поезда все пять удлиненных путей заняты, причем на четырех из них обрабатываются грузовые поезда установленной длины, так как пути в парке, выделенном для их обработки, заняты.

В пиковый момент времени подходящая инфраструктура используется другой категорией поездов, длинносоставный поезд вынужден простаивать на перегоне почти час, что вызывает задержку приёма других категорий поездов. Кроме того, задержки на перегоне оказывают влияние и на продвижение поездопотока по участку.

При поддержании стабильной загрузки перегона Б должно выполняться условие в пропуске по нему 143 поездов в сутки, из которых 24 – пассажирских. Заданное и пропущенное число длинносоставных поездов через грузовой удлиненный парк значительно меньше расчетного (рис. 6). На станции с 8 удлиненными путями из 119 грузовых поездов удается принять и обработать в среднем лишь 18,9 поездов повышенной длины. Из-за невозможности пропустить большее число удлиненных поездов основной категорией обработки в рассматриваемом парке являются грузовые поезда, а загрузка его путей растет с увеличением количества удлиненных путей и не превышает значения 55 %.

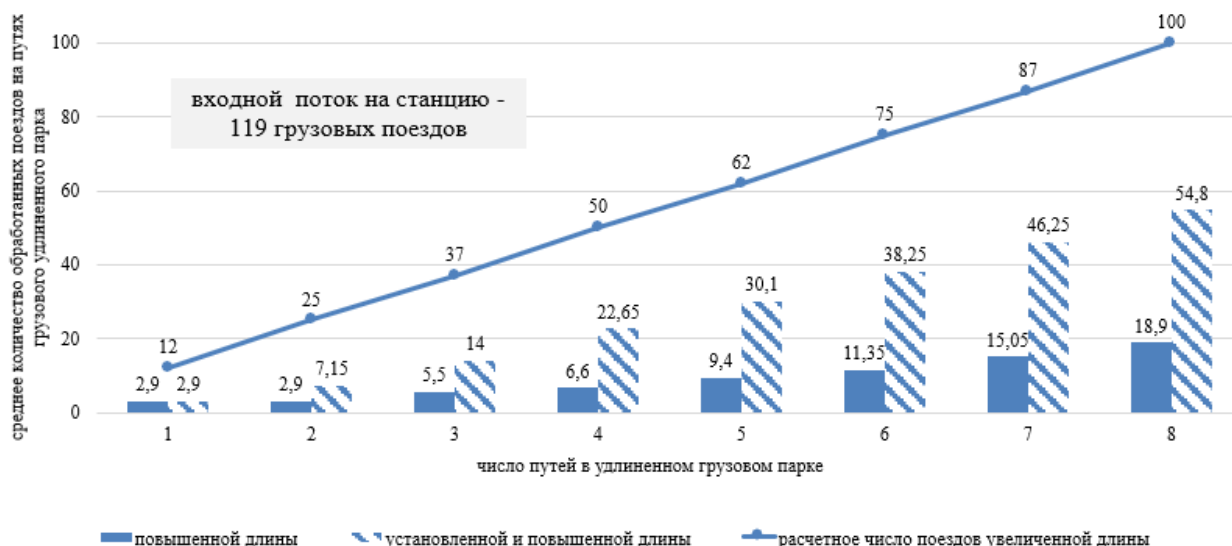


Рис. 6. Расчетные и фактические размеры пропущенных поездов через грузовой удлиненный парк в зависимости от числа путей

В связи с этим решено рассмотреть модели, когда транзитные поезда не могут занимать длинные пути (рис. 7). В ряде экспериментов удается пропустить большее число поездов повышенной длины, но суммарный обрабатываемый поездопоток по сравнению с моделями, в которых грузовые поезда могут занимать парк с длинными путями, уменьшается. Теперь задержки по приему всех категорий поездов возникают уже из-за недостаточной мощности грузового парка, а поезда установленной длины вынуждены простаивать на перегоне в ожидании освобождения путей. Кроме того, из-за ввода жесткой специализации путей парков при большом количестве путей в удлиненном грузовом парке большое число грузовых поездов принять и обработать в грузовом парке не удастся. При небольшом проценте поездов повышенной длины данный вариант технологии нецелесообразен из-за невозможности обработать заданное число поездов установленной длины.

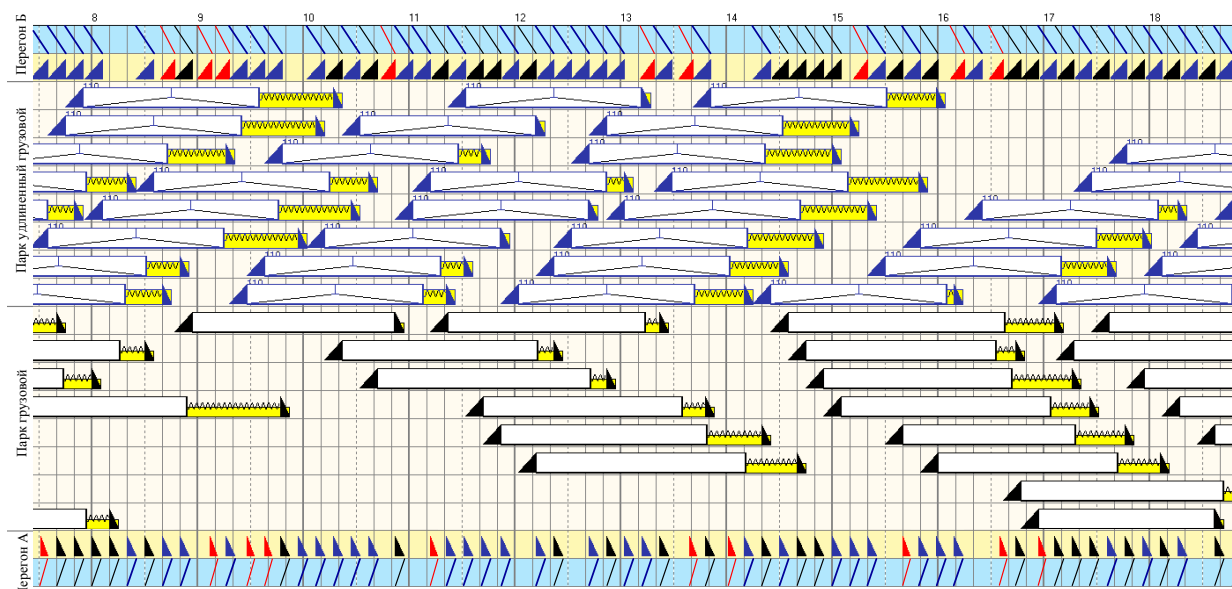


Рис. 7. Фрагмент графика исполненной работы (влияние разнородного потока на перерабатывающую способность)

При продолжительных задержках скапливается очередь на перегоне, в которой помимо длинносоставных поездов могут находиться поезда других категорий – пассажирские и грузовые установленной длины, они не могут быть пропущены по каналу, несмотря на то что на станции инфраструктура для их обработки существует и в данный момент времени не используется (рис. 5, 7), т. е. отсутствует возможность задействовать резервы.

По причине невозможности станции переработать поездопоток снижается пропускная способность и перегона. Несмотря на избыточность инфраструктуры станции происходят задержки по приему поездов из-за несогласованного подвода поездопотока.

На перерабатывающую способность станции оказывает влияние пропускная способность горловин, парков станции. Считается, что фактическое время занятия инфраструктуры складывается из времени на выполнение технологических операций и межоперационными простоями. Однако и это время значительно отличается от расчетного ввиду неучтенных задержек по причине нехватки путей подходящей длины в момент поступлений длинносоставных поездов.

Далее проводятся аналогичные эксперименты с изменяемым числом заданных поездов. Снизив изначальный грузовой поездопоток со 119 до 99 единиц, удается задать и пропустить большее число поездов по сравнению с тем, когда поток более плотный (рис. 8 и 6 соответственно).

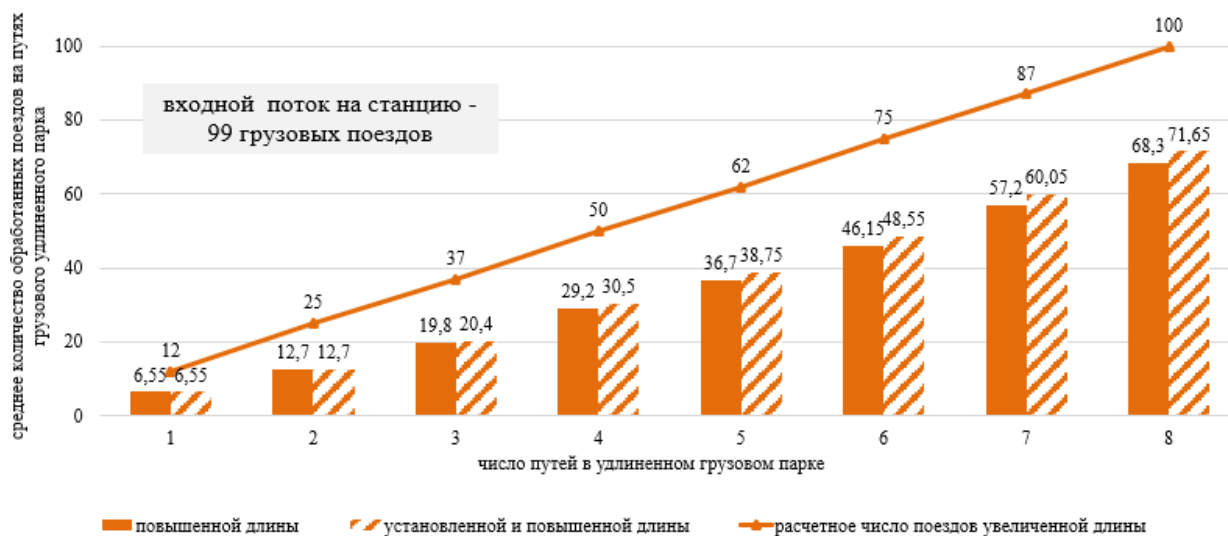


Рис. 8. Расчетные и фактические размеры пропущенных поездов через грузовой удлиненный парк в зависимости от числа путей при пропуске сниженного потока

За счет сокращения размера входного поездопотока по участку удается понизить плотность поступления поездов с перегона на станцию, за счет чего на путях грузового удлиненного парка удается принять и обработать большее число поездов (рис. 8), что приводит к увеличению пропускной способности участка.

Теперь на станции с 8 удлиненными путями из 99 грузовых поездов удается принять и обработать в среднем 68,3 поезда повышенной длины. За счет возможности принять большее число длинносоставных поездов процентное соотношение категорий обрабатываемых поездов улучшилось. В данном случае выделенные категории поездов обрабатываются в парках с более подходящей инфраструктурой.

При уменьшенном входном потоке также не удастся пропустить расчетное число обработанных поездов. В этом случае уровень допустимой полезной загрузки станции можно выразить с помощью коэффициента γ , тогда действительную пропускную способность путей удлиненного грузового парка можно рассчитать по формуле (2) [9, 10]:

$$\tilde{U} = \gamma \cdot U, \quad (2)$$

где γ – коэффициент допустимой загрузки путей удлиненного грузового парка;

U – расчетное число обработанных поездов повышенной длины согласно инструкции.

По результатам эксперимента был рассчитан коэффициент, приводящий расчетное число поездов повышенной длины к фактическому для моделей с максимальным и сниженным входным потоком (табл. 2).

Таблица 2

**Расчетные показатели по обработанным поездам увеличенной длины
в условиях изменения характеристики потока**

Количество путей в парке грузовом удлиненном	Расчетное число обработанных поездов повышенной длины согласно инструкции	Максимальный поток (рис. 6)		Сниженный поток (рис. 8)	
		Фактическое число обработанных поездов повышенной длины	Коэффициент фактической загрузки путей парка грузового удлиненного при заданном потоке	Фактическое число обработанных поездов повышенной длины	Коэффициент фактической загрузки путей парка грузового удлиненного при заданном потоке
1	12	2,90	0,24	6,55	0,55
2	25	2,90	0,12	12,70	0,51
3	37	5,50	0,15	19,80	0,54
4	50	6,60	0,13	29,20	0,58
5	62	9,40	0,15	36,70	0,60
6	75	11,35	0,15	46,15	0,62
7	87	15,05	0,17	57,20	0,66
8	100	18,90	0,19	68,30	0,68

Замечено, что уровень полезной загрузки путей меняется в зависимости от характеристики потока, а повысить действительную пропускную способность без вложений в инфраструктуру возможно за счет управления струями потока.

При пропуске нескольких категорий поездов с различными параметрами хорошая загрузка инфраструктуры достигается при невысокой загрузке станции, когда за счет снижения потока возникают резервы.

Но когда загрузка путей станции становится максимальной, для освоения заданного потока необходимо организовывать технологию работы объекта таким образом, чтобы в этот период времени по участку продвигались поезда преимущественно одной категории.

Выводы

Если по расчетам станция и перегоны позволяют пропускать увеличенный поток, то при совместной работе возникает взаимовлияние, которое снижает суммарную пропускную способность. Нельзя занять канал или бункер, приблизив его перерабатывающую/пропускную способность к 100 %, без учета пропускной способности соседних элементов в узвязке.

На фактическую пропускную способность оказывает влияние число струй с различными характеристиками (технология и время обработки, потребность в разной инфраструктуре).

На исследуемом объекте удается за счет снижения заданного потока увеличить число принятых поездов, тем самым повысить фактическую перерабатывающую способность станции.

Изменение структуры потока вызывает необходимость изменять инфраструктуру или характеристики потока. В момент интенсивного движения по участку требуется уменьшать разнородность потока, делая его по структуре более однородным. Для этого отдельные категории поездов можно замедлять на предшествующих раздельных пунктах с доступной в данный момент времени емкостью, а потом подводить к данной станции в более подходящий момент.

Список литературы

1 Инструкция по расчету пропускной и провозной способностей железных дорог ОАО «РЖД» (с изм., внесенными распоряжениями ОАО «РЖД» от 14.02.2023 N 324/p) // Экономика железных дорог. – 2023. – № 5. – ISSN 1727-6500.

References

1 Instructions for calculating the throughput and carrying capacity of railways of JSC "Russian Railways" (as amended by the orders of JSC "Russian Railways" dated 02/14/2023 N 324/r). // Railway economics. – 2023. – No. 5. – ISSN 1727-6500.

- 2 **Козлов, П. А.** Теоретические основы, организационные формы, методы оптимизации гибкой технологии транспортного обслуживания заводов черной металлургии : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / П. А. Козлов. – Москва, 1987. – 393 с.
- 3 Повышение экономической эффективности функционирования существующих систем железнодорожного транспорта за счет применения уточненного подхода к расчету перерабатывающей способности обслуживающих устройств / Е. Н. Тимухина, Н. В. Кашеева, В. С. Колокольников, А. А. Кошечев // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 2 (49). – С. 26–33. – EDN WJIUUQ.
- 4 **Козлов, П. А.** Расчет параметров проектируемых транспортных узлов / П. А. Козлов, В. П. Козлова // Железнодорожный транспорт. – 2008. – № 7. – С. 36–39. – EDN HTQLFJ.
- 5 Об использовании моделей оптимального управления транспортными потоками / П. А. Козлов, В. С. Колокольников, Н. А. Тушин, О. В. Осокин // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 1 (41). – С. 60–69. – DOI 10.20291/2079-0392-2019-1-60-69.
- 6 **Колокольников, В. С.** Сравнение современных методов расчета железнодорожных станций / В. С. Колокольников, И. А. Ковалев // Инновационный транспорт. – 2015. – № 1 (15). – С. 80–82. – EDN TMMIWB.
- 7 **Козлов, П. А.** Структурно-функциональное исследование железнодорожных станций / П. А. Козлов, В. С. Колокольников, Н. А. Тушин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2016. – № 4 (64). – С. 86–91. – EDN XGRSZZ.
- 8 **Козлов, П. А.** Определение параметров парков и горловин станции с учетом их взаимодействия / П. А. Козлов, В. С. Колокольников, Н. А. Тушин // Транспорт Урала. – 2017. – № 1 (52). – С. 3–7. – DOI 10.20291/1815-9400-2017-1-3-7.
- 9 **Колокольников, В. С.** Структурно-функциональная оптимизация полигонов на сети железных дорог : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук : 05.22.08 / Колокольников Виталий Сергеевич. – Екатеринбург, 2021. – 302 с. – EDN KJVWYC.
- 10 **Козлов, П. А.** Расчет и оптимизация полигонов железнодорожного транспорта / П. А. Козлов, В. С. Колокольников // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 3 (71). – С. 113–120. – EDN XZOBKP.
- 2 **Kozlov, P. A.** Theoretical foundations, organizational forms, methods of optimization of flexible technology for transport services of ferrous metallurgy plants : dis. doctor of Technical Sciences / P. A. Kozlov. – Moscow, 1987. – 393 p.
- 3 Increase of existing railway transport systems economic efficiency by the use of refined approach to calculate capacity of serving facilities / E. N. Timukhina, N. V. Kashcheeva, V. S. Kolokolnikov, A. A. Koshcheev // Bulletin of the Siberian State University of Railway Engineering. – 2019. – No. 2 (49). – P. 26–33. – EDN WJIUUQ.
- 4 **Kozlov, P. A.** Calculation of the parameters of the projected transport hubs / P. A. Kozlov, V. P. Kozlova. // Railway transport. – 2008. – No. 7. – P. 36–39. – EDN HTQLFJ.
- 5 On using effective management models for transport flows / Kozlov, P. A., V. S. Kolokolnikov, N. A. Tushin, O. V. Osokin // Vestnik USURT. – 2019. – No. 1 (41). – P. 60–69. – DOI 10.20291/2079-0392-2019-1-60-69.
- 6 **Kolokolnikov, V. S.** Comparison of modern railway station design methods / V. S. Kolokolnikov, I. A. Kovalev // Innovacionnyj transport. 2015. – No. 1 (15). – P. 80–82. – EDN TMMIWB.
- 7 **Kozlov, P. A.** Structural and functional studies of railway stations / P. A. Kozlov, V. S. Kolokolnikov, N. A. Tushin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2016. – No. 4 (64). – P. 86–91. – EDN XGRSZZ.
- 8 **Kozlov, P. A.** Defining the parameters of the tracks and of the station necks considering their interaction / P. A. Kozlov, V. S. Kolokolnikov, N. A. Tushin // Transport of the Urals. – 2017. – No. 1 (52). – P. 3–7. – DOI 10.20291/1815-9400-2017-1-3-7.
- 9 **Kolokolnikov, V. S.** Structural and functional optimization of polygons on the railway network : diss. ... Doctor of Technical Sciences : 05.22.08 / Kolokolnikov Vitaly Sergeevich. Yekaterinburg, 2021. – 302 p. – EDN KJVWYC.
- 10 **Kozlov, P. A.** Calculation and optimization of railway polygons / P. A. Kozlov., V. S. Kolokolnikov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2018. – No. 3 (71). – P. 113–120. – EDN XZOBKP.

V. S. Kolokolnikov, T. A. Falaleeva

THE INFLUENCE OF THE TRAIN FLOW STRUCTURE ON THE CAPACITY OF THE STATION AND OF THE ADJOINING SPAN

Abstract. Currently, the proportion of trains of increased weight and length is growing. There is a need to study the impact of changes in the structure of train traffic on the capacity and infrastructure of the site.

With the help of simulation modeling, the throughput of the site is investigated when passing a heterogeneous flow in a changing infrastructure. The issue of determining the required number of elongated tracks to handle the flow of trains of a given structure is being investigated. The expediency of introducing strict specialization of the station's tracks is revealed. The capacity of the station is determined with a different number of elongated paths, the volume of the input stream and the ratio of jets in it. The coefficients that bring the calculated throughput to the one obtained as a result of the simulation are calculated. The level of permissible payload of the tracks of the extended cargo fleet has been determined. Based on the experiments, it was concluded that the more diverse the train traffic is in structure, the less dense it should be. By adjusting the size of the input stream, it is possible to improve the use of the station infrastructure.

Keywords: delay analysis, throughput capacity, simulation model, track development, irregularity of movement, heterogeneous flow.

For citation: Kolokolnikov, V. S. The influence of the train flow structure on the capacity of the station and of the adjoining span / V. S. Kolokolnikov, T. A. Falaleeva // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 1. – P. 79–89. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_79.

Сведения об авторах

Колокольников Виталий Сергеевич
Уральский государственный университет
путей сообщения (УрГУПС),
кафедра «Управление эксплуатационной
работой»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: VKolokolnikov@usurt.ru

Фалалеева Татьяна Андреевна
Уральский государственный университет
путей сообщения (УрГУПС),
кафедра «Управление эксплуатационной
работой»,
аспирант,
e-mail: TFalaleeva@usurt.ru

Information about the authors

Kolokolnikov Vitaliy Sergeevich K
Ural State University of Railway Transport (USURT)
Chair «Operations Management Department»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: VKolokolnikov@usurt.ru

Falaleeva Tatiana Andreevna
Ural State University of Railway Transport (USURT)
Chair «Operations Management Department»,
Postgraduate Student,
e-mail: TFalaleeva@usurt.ru

Н. А. Осинцев, А. Н. Рахмангулов, П. Н. Мишкурин, С. Н. Корнилов, М. С. Мельников

КОНЦЕПЦИЯ ГИБРИДНОЙ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ МОДЕЛИ УСТОЙЧИВОЙ ЦЕПИ ПОСТАВОК *

Аннотация. Предложена концепция гибридной модели устойчивой цепи поставок на основе комбинирования многокритериальных методов принятия решений с имитационным моделированием. Показана возможность использования имитационного моделирования для описания функциональных зависимостей между индикаторами устойчивой цепи поставок, параметрами и показателями логистических потоков при реализации инструментов «зеленой» логистики. Комбинация моделей необходима для прогнозирования и оптимизации значений параметров и показателей логистических потоков в соответствии с выбранными вариантами комплекса инструментов «зеленой» логистики и с учетом ограниченных по запасам логистических ресурсов. Предлагаемый подход позволит повысить устойчивость цепей поставок в результате выбора и реализации инструментов «зеленой» логистики.

Ключевые слова: устойчивое развитие, «зеленая» логистика, устойчивая цепь поставок, концепция, многокритериальная модель, имитационная модель, гибридная модель.

Для цитирования: Концепция гибридной многокритериальной модели устойчивой цепи поставок / Н. А. Осинцев, А. Н. Рахмангулов, П. Н. Мишкурин [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1. – С. 90–104 – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_90.

Введение

Изменчивость и неопределенность множества факторов эффективности функционирования цепей поставок усложняют принятие управленческих решений. Каждый участник цепи поставок по-разному оценивает влияние факторов и условий внешней среды. Такие оценки не всегда совпадают с эффективной интенсивностью и силой воздействия факторов, оказывающих различное влияние на элементы цепей поставок. В результате усложняется принятие решений по взаимодействию элементов цепи поставок, что снижает их эффективность и устойчивость [1].

Необходимость оценки множества индикаторов и показателей в процессе формирования и управления цепями поставок привела к активному обсуждению в научной среде проблемы разработки новых моделей принятия решений по совершенствованию транспортно-логистической деятельности и повышению устойчивости цепей поставок. Такие модели должны учитывать сложность структуры цепей поставок, многофакторность, динамичность и неопределенность среды их функционирования, многокритериальность задач, решаемых при формировании и развитии цепей. Это возможно путем комбинирования различных методов и моделей – математических, имитационных, многокритериальных методов принятия решений и использования современных информационных технологий и программного обеспечения.

В таблице 1 представлены результаты анализа существующих подходов к моделированию устойчивых цепей поставок. В области математического моделирования выделяют методы многокритериальной оптимизации устойчивых цепей поставок [2–4] на основе использования смешанного целочисленного нелинейного программирования [5–6], смешанного целочисленного линейного программирования [7–8], смешанного целочисленного линейного дробного программирования [9], двухуровневой маршрутизации с временными окнами [10], многокритериального анализа [11–13], классификационного анализа [14], нечеткого многоцелевого линейного программирования [15–17], стохастической двухцелевой оптимизации [18]. Решение задач многокритериальной оптимизации осуществляется с использованием эpsilon-метода [8–9], оптимизации Парето [5, 19], общей алгебраической системы моделирования (GAMS) [7, 20, 21], комбинирования метода многокритериальной оптимизации роя частиц (MOPSO) и адаптированного многокритериального поиска переменных окрестностей (AMOVNS) [10, 22], методов расчета показателя условной стоимости риска (CVaR) [24], генетических алгоритмов

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-10038. – URL: <https://rscf.ru/project/23-21-10038>.

[3, 4, 16, 17], гибридного структурного моделирования [15], комбинирования методов многокритериального анализа принятия решений и методов моделирования структурными уравнениями (SEM) [11], гибридной многокритериальной оптимизации [2, 13], комбинированной структурной оптимизации [23], комбинирования методов многокритериального анализа принятия решений и метода анализа иерархий [12].

Таблица 1

**Результаты литературного обзора существующих математических моделей
устойчивых цепей поставок**

Источник	Тип модели	Используемые в моделях методы (подходы)	Цель моделирования	Аспекты устойчивого развития
1	2	3	4	5
[5]	Смешанное целочисленное нелинейное программирование (MINLP)	Оптимизация Парето	Максимизация доходности при минимальном воздействии на окружающую среду	Экономические, экологические
[6]		–	Максимизация прибыли и рабочих мест при минимизации воздействия на окружающую среду	Экономические, экологические, социальные
[24]	Смешанное целочисленное линейное программирование (MILP)	Метод расчета показателя условной стоимости риска (CVaR)	Максимизация доходности при минимальном воздействии на окружающую среду	Экономические, экологические
[7]		Использование алгебраической системы моделирования (GAMS)	Минимизация затрат в цепях поставок на основе управления жизненным циклом	Экономические, экологические
[11]	Аналитический сетевой процесс (ANP)	Многокритериальный анализ (MCDA)	Предпроектное обоснование параметров устойчивой цепи поставок	Экономические, экологические, социальные
[20]	Многоцелевое смешанно-целочисленное нелинейное программирование (MO-MINLP)	Использование алгебраической системы моделирования (GAMS)	Максимизация доходности от продажи готовой продукции с учетом логистических издержек, переработки и утилизации продукции	Экономические, экологические
[8]	Многоцелевое смешанное целочисленное линейное программирование (MO-MILP)	Эпсилон-метод	Минимизация общих издержек с учетом снижения выбросов парниковых газов в течение жизненного цикла цепи поставок и создании рабочих мест	Экономические, экологические, социальные
[25]	Многоцелевое смешанное целочисленное программирование (MO-MIP)	Ускоренный алгоритм декомпозиции Бендера (BDA)	Минимизация общих издержек и негативного воздействия на окружающую среду при повышении социальной ответственности	Экономические, экологические, социальные
[9]	Смешанное целочисленное линейное дробное программирование (MILFP)	Эпсилон-метод	Минимизация затрат и негативного воздействия на окружающую среду	Экономические, экологические
[10]	Двухуровневая маршрутизация с временными окнами (2E-LRPTW)	Многокритериальный гибридный алгоритм (MHPV: MOPSO-AMOVNS)	Проектирование и оптимизация цепей поставок на основе оценки экономических и экологических факторов	Экономические, экологические

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5
[15]	Нечеткое многоцелевое линейное программирование (Fuzzy MOLP)	Гибридное структурное моделирование, нечеткая логика и метод анализа иерархий (FANP)	Минимизация издержек на основе оценки экономических, социальных и экологических факторов	Экономические, экологические, социальные
[21]	Анализ свертки нечетких данных (Fuzzy DEA)	Использование алгебраической системы моделирования (GAMS)	Оценка и выбор поставщиков в устойчивых цепях поставок	Экономические, экологические, социальные
[14]	Матрицы перекрестного воздействия (MIC) и классификационный анализ (MAC)	Комбинированный метод MICMAC	Анализ и тестирование взаимосвязей устойчивых («зеленых») цепей поставок	Экономические, экологические, социальные
[16]	Нечеткая многокритериальная оптимизация (Fuzzy MO)	Генетические алгоритмы	Общая оптимизация прибыли при повышении безопасности труда и оперативности обработки заказов	Экономические, экологические, социальные
[17]			Управление устойчивой цепью поставок в условиях неопределенности параметров внутренней и внешней сред	Экономические, экологические, социальные
[13]			Оценка элементов устойчивой цепи поставок и выбор поставщиков	Экономические, экологические, социальные
[12]		Гибридная модель. Комбинирование многокритериальных методов принятия решений	Выбор инструментов «зеленой» логистики для достижения целей устойчивого развития при управлении цепями поставок	Экономические, экологические, социальные
[23]	Многокритериальная оптимизация (MO)	Динамическое структурное моделирование и многокритериальная оптимизация	Определение оптимальных значений параметров устойчивых цепей поставок	Экономические, экологические, социальные
[3], [4]		Генетические алгоритмы (недоминирующая сортировка (NSGA-II), многообъектный (MOGA-II), гибридный (HYBRID))	Минимизация объема выбросов углекислых газов при транспортировке и общих затрат в распределительной цепочке	Экономические, экологические
[22]		Многокритериальный гибридный алгоритм (MHPV: MOPSO-AMOVNS)	Минимизация общих затрат и снижение негативного воздействия на окружающую среду	Экономические, экологические
[19]		Оптимизация Парето	Комплексная минимизация общих затрат, числа несчастных случаев и объема выбросов парниковых газов	Экономические, экологические, социальные

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5
[18]	Стохастическая двухцелевая оптимизация	–	Минимизация общих логистических издержек на основе расчета совокупной стоимости достижения целей устойчивого развития	Экономические, экологические, социальные

Результаты проведенного анализа показывают, что в последнее десятилетие возрастает интерес к анализу и оценке индикаторов устойчивых цепей поставок. Наблюдается использование как одиночных, так и комбинированных математических моделей для снижения издержек, управления рисками, достижения целей экономики замкнутого цикла и устойчивого развития. Для повышения точности модельных значений индикаторов цепей поставок, параметров и показателей логистических потоков предлагается использовать метод имитационного моделирования. Данный метод позволяет устанавливать зависимости индикаторов цепей поставок от принимаемых решений по повышению устойчивости цепей поставок и прогнозировать их изменение с учетом таких решений.

Инструменты имитационного моделирования обладают необходимым потенциалом для создания высокоточных моделей динамических цепей поставок [26]. Выделяют несколько подходов к построению имитационных моделей устойчивых цепей поставок на основе использования системно-динамической парадигмы моделирования [27–31], дискретно-событийного моделирования [32–36], агентного моделирования [37], моделирования в геоинформационных системах [38], комбинирования системной динамики и методов многокритериального анализа [39], комбинирования агентного моделирования и оптимизаторов сложных систем [40], комбинирования системной динамики и дискретно-событийного моделирования [41], комбинирования агентного и дискретно-событийного моделирования [42]. Наиболее распространенными программными инструментами построения имитационных моделей являются STELLA [27], Simulink [28], VENSIM [29–39], iThink [31], ARENA [33], Monte Carlo Simulation [34–35], AnyLogic [41], Simio [42], и специализированные: ALADIN [46], PROSIM [32], AnyLogistix [41] (табл. 2).

Таблица 2

Результаты литературного обзора существующих имитационных моделей устойчивых цепей поставок

Источник	Парадигма имитационного моделирования	Среда моделирования	Цель моделирования	Аспекты устойчивого развития
1	2	3	4	5
[27]	Системная динамика	STELLA	Моделирование горнодобывающего предприятия на основе теории пика Хабберта	Экономические, экологические
[28]	Системная динамика	Simulink	Анализ операций в замкнутых цепях поставок и выбор стратегий на основе использования метода «N на бесконечности»	Экономические, экологические
[29]	Системная динамика	VENSIM	Выбор устойчивых поставщиков при сохранении стратегической эффективности	Экономические, экологические
[30]			Оценка системного поведения замкнутой цепи поставок с учетом удовлетворенности заказчиков и показателя «зеленого» имиджа	Экономические, экологические
[31]	Системная динамика	iThink	Изучение влияния использования мультимодальных перевозок на эффективность систем управления запасами на основе использования экономических и экологических параметров	Экономические, экологические

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5
[32]	Дискретно-событийная	PROSIM	Повышение удовлетворенности клиентов и эффективности транспортного обслуживания при одновременном снижении объема выбросов углекислого газа	Экономические, экологические, социальные
[33]	Дискретно-событийная	Arena	Анализ целесообразности использования технологии радиочастотной идентификации при проектировании замкнутой цепи поставок	Экономические, экологические
[34]	Дискретно-событийная	Monte Carlo Simulation	Управление рисками в операционных сетях «зеленых» цепей поставок	Экономические, экологические
[35]			Минимизация транспортных расходов и снижение объема выбросов углекислого газа	Экономические, экологические
[36]	Дискретно-событийная	AnyLogistix	Минимизация логистических издержек и отходов в цепи поставок	Экономические, экологические
[37]	Агентная	ALADIN	Анализ величины издержек в цепи поставок, оценка качества продукции, энергопотребления и выбросов углекислого газа	Экономические, экологические
[38]	GIS-based simulation		Оценка спроса и предложения электроэнергии	Экономические, экологические
[39]	Системная динамика и Fuzzy MCDM	VENSIM	Поиск эффективных сценариев функционирования устойчивой цепи поставок	Экономические, экологические, социальные
[40]	Комбинирование агентного моделирования и оптимизации		Минимизация логистических издержек и негативного воздействия на окружающую среду	Экономические, экологические
[41]	Комбинирование системной динамики и дискретно-событийного моделирования	AnyLogic	Минимизация логистических издержек и объемов выбросов углекислого газа	Экономические, экологические
[42]	Комбинирование агентного и дискретно-событийного моделирования	Simio	Минимизация логистических издержек и негативного воздействия на окружающую среду с учётом численности рабочих мест	Экономические, экологические, социальные

В имитационных моделях описываются диапазоны и типы экономических параметров цепей поставок на основе комбинирования методов математического моделирования [43]. Широкое применение нашли системно-динамические модели устойчивых цепей поставок. Использование системно-динамического подхода позволило целостно исследовать влияние экономических и экологических факторов [27–31]. В свою очередь, использование дискретно-событийного подхода позволило повысить точность использования логистических ресурсов элементов цепи поставок [32, 33], более точно описать зависимости экономических, социальных и экологических факторов и динамических процессов в элементах цепей поставок [34, 37, 38]. Комбинирование парадигм имитационного моделирования позволило повысить точность прогнозирования индикаторов устойчивой цепи поставок на стратегическом [41] и тактическом [42] уровнях управления. Наблюдаются попытки комплексного использования методов многокритериальной оптимизации и имитационного моделирования [39–40].

Однако для эффективной реализации концепции устойчивого развития в логистической деятельности и управлении цепями поставок необходимо применять многокритериальные методы принятия управленческих решений по изменению параметров логистических потоков на основе измерения и оценки их экономических, социальных и экологических показателей [44]. В последнее десятилетие

на транспорте и в логистике активно развивается научное и практическое направление по разработке и совершенствованию методов многокритериального принятия решений (*Multi-criteria Decision Making – MCDM*) [45–46]. Выбор наиболее эффективного и надежного MCDM- метода достигается в результате принятия управленческих решений по совершенствованию транспортно-логистической деятельности, основанных на использовании так называемых гибридных MCDM-имитационных моделей [13]. Сложность построения высокоточных MCDM-имитационных моделей устойчивых цепей поставок заключается в отсутствии комплексного подхода к оценке фактических и модельных данных параметров логистических потоков.

Обзор и анализ моделей устойчивых цепей поставок позволяют говорить об интеграции аспектов устойчивого развития в практику управления цепями поставок. В зависимости от целей моделирования используются различные методы и модели – математические, имитационные, многокритериальные методы принятия решений, как одиночные, так и в комбинациях друг с другом. Вместе с тем наблюдается фрагментарность связей между экологическими, социальными и экономическими индикаторами оценки устойчивости цепей поставок, вызванная сложностью, динамичностью объекта исследования и влиянием на него множества факторов, наличием разнообразных ограничений и противоречивостью целей устойчивого развития. Это снижает эффективность оценки и реализации решений по повышению устойчивости цепей поставок. Требуется разработка единого подхода по повышению устойчивости цепей поставок, в основу которого будут положены существующие решения и комплекс моделей по управлению цепями поставок, сочетающий в себе метод имитационного моделирования с методами точной оптимизации и приближенными многокритериальными методами принятия решений.

Гибридная многокритериальная модель устойчивой цепи поставок

Для достижения целей устойчивого развития при управлении цепями поставок разработана концепция, в основу которой заложена идея формирования баланса экономической, экологической и социальной устойчивости цепи с использованием принципов и инструментов «зеленой» логистики и гибридной многокритериальной модели. Предлагаемая концепция обеспечивает соблюдение следующих условий:

- согласование целей устойчивого развития с целями цепей поставок [12, 44, 47];
- использование системы принципов «зеленой» логистики в качестве основы управления устойчивыми цепями поставок [12];
- использование инструментов «зеленой» логистики при принятии решений по повышению устойчивости цепей поставок [12];
- комбинирование многокритериальных методов принятия решений с имитационным моделированием для повышения эффективности управления устойчивыми цепями поставок [12, 44].

Основными положениями концепции являются:

1 Устойчивое развитие цепей поставок достигается приведением в соответствие целей и задач цепей поставок целям и задачам «зеленой» логистики на всех этапах доставки продукции от закупки до сбыта.

2 Формирование и устойчивое развитие цепей поставок основано на использовании системы принципов «зеленой» логистики, представляющей собой синтез принципов устойчивого развития с логистическими принципами.

3 Повышение устойчивости цепей поставок обеспечивается реализацией системы инструментов «зеленой» логистики – специфических способов и решений по воздействию на элементы цепей и логистические потоки.

4 Логистические потоки в зависимости от степени их детализации на разных уровнях системы управления представляются дискретными или непрерывными. Дискретные логистические потоки образованы совокупностью отдельных объектов (элементов или струй), и параметры их моделирования используются для принятия решений по реализации инструментов «зеленой» логистики на оперативном уровне управления. Представление логистических потоков как непрерывных используется на стратегических и тактических уровнях управления.

5 Управление устойчивыми цепями поставок основано на комбинировании многокритериальных моделей принятия решений с имитационным моделированием (см. рисунок). Многокритериальные модели используются для оценки состояния элементов цепей поставок, анализа параметров и показателей логистических потоков, ранжирования и выбора инструментов «зеленой» логистики. Ими-

тационное моделирование используется для определения зависимостей между параметрами логистических потоков и индикаторами функционирования устойчивых цепей поставок при реализации инструментов «зеленой» логистики.

6 Повышение точности прогнозирования значений индикаторов функционирования устойчивых цепей поставок достигается на основе использования комплексного подхода к оценке фактических и модельных данных параметров, и показателей логистических потоков. Комбинирование методов математического и имитационного моделирования позволяет оценивать реализуемость инструментов «зеленой» логистики и находить оптимальные значения параметров и показателей логистических потоков с учетом ограниченных логистических ресурсов.

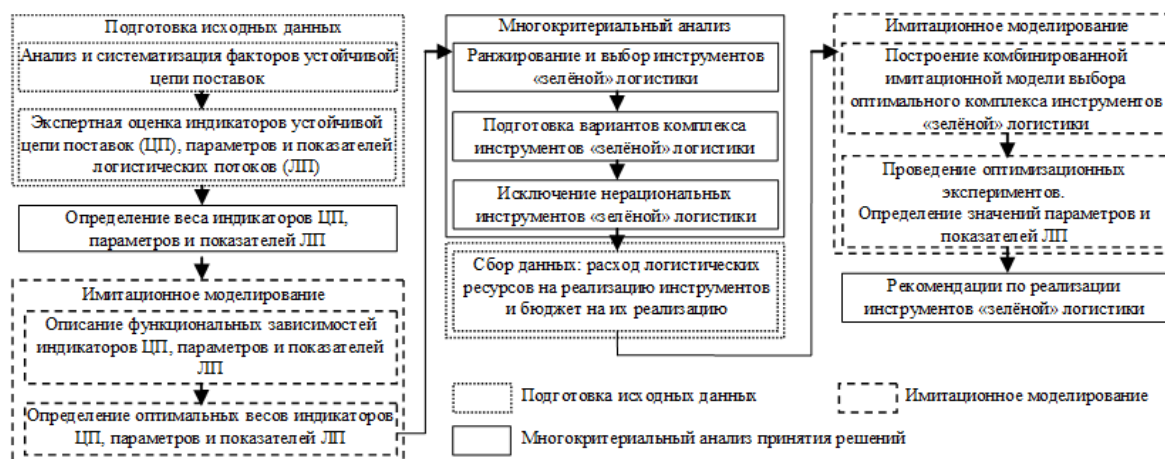


Схема концепции гибридной многокритериальной модели устойчивой цепи поставок

Соблюдение представленных условий и положений предполагается осуществлять в пять основных этапов комбинирования методов многокритериального анализа и имитационного моделирования:

1 *Подготовка исходных данных.* Для оценки устойчивости цепей поставок предлагается двухуровневая система оценки. На первом уровне выполняется комплексная оценка устойчивости цепи поставок, на втором – комплексная оценка логистических потоков на соответствие аспектам устойчивого развития и качества управления потоками. Компонентами первого уровня выступают следующие группы индикаторов устойчивых цепей поставок: инфраструктурные (оценка элементов транспортно-логистической инфраструктуры, задействованной в продвижении потоков); организационно-технологические (оценка степени развития технологий, организации взаимодействия элементов цепей поставок при переработке и продвижении потоков); экономические (показатели, определяющие экономическую эффективность как отдельных элементов, так и цепи поставок в целом); социальные (оценка стейкхолдеров цепи поставок и социально-экономических аспектов функционирования цепей); экологические (оценка влияния цепей поставок на окружающую среду); политические (оценка геополитических и санкционных ограничений по продвижению потоков и функционированию элементов цепей поставок); потоковые (характеристика материального потока цепи поставок).

Компонентами второго уровня являются параметры и показатели логистических потоков [12]: управляемые (физические) параметры (параметры потоков, характеризующие их интенсивность и направления изменения потоков в пространстве и во времени); экономические показатели (эффективность использования всех видов ресурсов цепи поставок при управлении потоками); энергоэкологические показатели (эффективность использования энергии в процессе продвижения логистических потоков и их влияние на окружающую среду); показатели качества (оценка сохранности и своевременности продвижения и переработки потоков, а также качество управления потоками); статистические показатели (отражают закономерности изменения управляемых параметров логистических потоков и цепи поставок).

2 *Определение значимости индикаторов цепи поставок, параметров и показателей логистических потоков.* Данный этап обосновывается различной важностью тех или иных параметров и показателей, их неоднородностью, влиянием параметров (показателей) друг на друга, использованием интегральных показателей, а также особенностью применения различных многокритериальных методов и моделей принятия решений. Определение веса (весовых коэффициентов) индикаторов цепи поста-

вок, параметров и показателей логистических потоков основано на привлечении экспертов и использовании дискретных методов многокритериального анализа. Основным недостатком дискретных методов многокритериального анализа является зависимость от субъективных экспертных оценок, что является ограничением точности выбора управленческих решений. Для повышения точности весовых коэффициентов предлагается использовать метод имитационного моделирования.

3 *Оптимизация весовых коэффициентов индикаторов цепей поставок, параметров и показателей логистических потоков.* В настоящее время программы имитационного моделирования обладают необходимым потенциалом для создания высокоточных моделей оценки функциональных зависимостей индикаторов устойчивых цепей поставок, параметров и показателей логистических потоков на основе использования развитых инструментов визуального построения моделей и проблемно ориентированных библиотек стандартных объектов моделирования. Уточненные функциональные зависимости могут быть использованы при корректировке весов индикаторов, параметров и показателей, которые определены на предыдущем этапе предлагаемой гибридной многокритериальной модели. Функциональные зависимости в имитационной модели предлагается описывать системной динамикой. В свою очередь, корректировку весов индикаторов, параметров и показателей предлагается осуществлять на основе использования в имитационной модели алгоритмов оптимизации.

4 *Ранжирование и выбор инструментов «зеленой» логистики.* Методика ранжирования и выбора инструментов «зеленой» логистики основана на использовании моделей и методов многокритериального принятия решений. Оптимальная комбинация инструментов «зеленой» логистики для конкретной цепи поставок определяется с учетом имеющихся материальных, финансовых, информационных ресурсов и ресурсов услуг. Полученное множество вариантов комбинации инструментов «зеленой» логистики проверяется на оптимальность использования логистических ресурсов по их реализации с помощью имитационной модели.

5 *Прогнозирование и оптимизация.* Оценка эффективности реализации инструментов «зеленой» логистики в цепи поставок предлагается осуществлять на основе использования имитационного моделирования большей детализации и методов оптимизации. При описании устойчивых цепей поставок в комбинированных аналитико-имитационных моделях приняты следующие допущения [12]:

- каждый элемент логистического потока характеризуется определенным качественным свойством и обладает количественной величиной;
- в зависимости от качественных свойств элементов потока и особенностей расчета количественных параметров различают четыре вида логистических потоков: 1) материальный поток описывает объемы грузопотоков по струям; 2) поток услуг – работы, выполняемые по переработке и продвижению материального потока; 3) финансовый поток – объем финансовых средств, необходимых для продвижения материального потока; 4) информационный поток – сообщения и события, циркулирующие в системе функционирования цепи поставок;
- материальный поток представляет собой объединение нескольких элементов потока. Поток характеризуется маршрутом – последовательностью элементов цепи поставок, через которые проходит поток;
- элемент цепи поставок (логистический элемент) выполняет следующие функции: задержка логистического потока на время выполнения технологической операции; хранение запаса в случае задержки логистического элемента переработкой предыдущего потока;
- связи между инфраструктурными элементами цепи поставок описываются неориентированным графом маршрутизации;
- в процессе реализации инструмента «зеленой» логистики цепь поставок потребляет следующие виды ограниченных логистических ресурсов: материальные (транспортно-логистическая инфраструктура, подвижной состав, технические средства, трудовые ресурсы), финансовые (текущие затраты), информационные (количество управленческой информации) и ресурсы услуг (объем и качество работ).

Результатом решения гибридной многокритериальной модели устойчивой цепи поставок является оптимальный комплекс инструментов «зеленой» логистики в условиях неопределенности параметров и показателей ЛП и ограничений ресурсов (табл. 3). Комбинирование методов многокритериального анализа и имитационного моделирования позволит установить зависимости между индикаторами оценки устойчивости цепей поставок, параметрами и показателями логистических потоков, а также оценить эффективность реализации инструментов «зеленой» логистики в условиях ограничения логистических ресурсов.

Таблица 3

Общая характеристика гибридной модели устойчивой цепи поставок

Вид модели	Основное назначение	Результаты моделирования
Комплекс многокритериальных моделей принятия решений	- определение значимости индикаторов устойчивой цепи поставок; - определение значимости параметров и показателей логистических потоков; - оценка состояния элементов устойчивой цепи поставок; - ранжирование инструментов «зеленой» логистики	- весовые коэффициенты индикаторов устойчивой цепи поставок; - весовые коэффициенты параметров и показателей логистических потоков; - ранги значимости элементов цепи поставок; - ранги инструментов «зеленой» логистики
Имитационная модель оценки функциональных зависимостей	- уточнение функциональных зависимостей индикаторов устойчивой цепи поставок, параметров и показателей логистических потоков; - корректирование весов индикаторов устойчивой цепи поставок, параметров и показателей логистических потоков на основе использования алгоритмов оптимизации в рамках имитационной модели	- оптимальные весовые коэффициенты индикаторов устойчивой цепи поставок; - оптимальные весовые коэффициенты параметров и показателей логистических потоков
Комбинированная аналитико-имитационная модель	- оптимизация состава инструментов «зеленой» логистики и определение параметров и показателей логистических потоков в цепи поставок	- оптимальный комплекс инструментов «зеленой» логистики; - оптимальные значения параметров и показателей логистических потоков

Заключение

Предложена концепция гибридной многокритериальной модели устойчивой цепи поставок, основанная на комбинации многокритериальных методов принятия решений и метода имитационного моделирования. Теоретически показана возможность оценки эффективности реализации инструментов «зеленой» логистики для достижения целей устойчивого развития цепи поставок на основе прогнозирования и оптимизации значений параметров и показателей логистических потоков с учетом ограниченных логистических ресурсов. Использование предлагаемой концепции позволит: во-первых, установить влияние инструментов «зеленой» логистики на индикаторы устойчивости цепей поставок, а также параметры и показатели логистических потоков; во-вторых, повысить точность описания функциональных зависимостей между индикаторами устойчивой цепи поставок и параметрами и показателями логистических потоков; в-третьих, повысить точность поиска оптимальных значений параметров и показателей логистических потоков по критерию достижения целей устойчивого развития. Разработанную гибридную модель предлагается использовать для оценки эффективности решений по устойчивому развитию цепей поставок, а также для прогнозирования параметров и показателей логистических потоков и принятия управленческих решений. Дальнейшим направлением развития предлагаемой концепции является исследование методов комбинированной многокритериальной оптимизации для оценки эффективности инструментов «зеленой» логистики в устойчивых цепях поставок.

Список литературы

- 1 **Осинцев, Н. А.** Оценка устойчивости цепей поставок на основе серого реляционного анализа / Н. А. Осинцев, А. Н. Рахмангулов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2023. – № 3 (21). – С. 180–196. – DOI 10.18503/1995-2732-2023-21-3-180-196.
- 2 **Govindan, K.** Bi-objective integrating sustainable order allocation and sustainable supply chain network strategic design with stochastic demand using a novel robust hybrid multi-objective metaheuristic /

References

- 1 **Osintsev, N. A.** Supply chain sustainability assessment based on gray relational analysis / N. A. Osintsev, A. N. Rakhmangulov // Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University. – 2023. – No. 3 (21). – P. 180–196. – DOI 10.18503/1995-2732-2023-21-3-180-196.
- 2 **Govindan, K.** Bi-objective integrating sustainable order allocation and sustainable supply chain network strategic design with stochastic demand using a novel robust hybrid multi-objective metaheuristic

K. Govindan, A. Jafarian, V. Nourbakhsh // *Computers & Operations Research*. – 2015. – No. 62. – P. 112–130. – ISSN 1873-765X.

3 **Validi, S.** A solution method for a two-layer sustainable supply chain distribution model / S. Validi, A. Bhattacharya, P. J. Byrne // *Computers & Operations Research*. – 2015. – No. 54. – P. 204–217. – ISSN 1873-765X.

4 **Validi, S.** A case analysis of a sustainable food supply chain distribution system – A multi-objective approach / S. Validi, A. Bhattacharya, P. Byrne // *International Journal of Production Economics*. – 2014. – No. 152. – P. 71–87. – ISSN 1873-7579.

5 **Guillén-Gosálbez, G.** Optimal design and planning of sustainable chemical supply chains under uncertainty / G. Guillén-Gosálbez, I. E. Grossmann // *AIChE Journal*. – 2009. – No. 1 (55). – P. 99–121. – ISSN 0001-1541.

6 **Rahimi, M.** A stochastic risk-averse sustainable supply chain network design problem with quantity discount considering multiple sources of uncertainty / M. Rahimi, V. Ghezavati, F. Asadi // *Computers & Industrial Engineering*. – 2019. – No. 130. – P. 430–449. – DOI 10.1016/j.cie.2019.02.037.

7 Mathematical programming model of biodiesel supply chain in Colombia / J. A. Aranda, M. J. Bar´on, I. Huertas, J. A. Orjuela // *Ingeniería*. – 2014. – No. 1 (19). – P. 19–49. – ISSN 1405-7743.

8 Optimal design of sustainable cellulosic biofuel supply chains: multiobjective optimization coupled with life cycle assessment and input–output analysis / F. You, L. Tao, D. J. Graziano, S. W. Snyder // *AIChE Journal*. – 2012. – No. 4 (58). – P. 1157–1180. – ISSN 0001-01541.

9 Design of sustainable product systems and supply chains with life cycle optimization based on functional unit : general modeling framework, mixed-integer nonlinear programming algorithms and case study on hydrocarbon biofuels / D. Yue, M. A. Kim, F. You // *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. – 2013. – No. 8 (1). – P. 1003–1014. – ISSN 2168-0485.

10 Two-echelon multiple-vehicle location–routing problem with time windows for optimization of sustainable supply chain network of perishable food / K. Govindan, A. Jafarian, R. Khodaverdi, K. Devika // *International journal of production economics*. – 2014. – No. 152. – P. 9–28. – ISSN 1873-7579.

11 **Büyüközkan, G.** Designing a sustainable supply chain using an integrated analytic network process and goal programming approach in quality function deployment / G. Büyüközkan, Ç. Berkol // *Expert Systems with Applications*. – 2011. – No. 11 (38). – P. 13731–13748. – ISSN 1873-6793.

/ K. Govindan, A. Jafarian, V. Nourbakhsh // *Computers & Operations Research*. – 2015. – No. 62. – P. 112–130. – ISSN 1873-765X.

3 **Validi, S.** A solution method for a two-layer sustainable supply chain distribution model / S. Validi, A. Bhattacharya, P. J. Byrne // *Computers & Operations Research*. – 2015. – No. 54. – P. 204–217. – ISSN 1873-765X.

4 **Validi, S.** A case analysis of a sustainable food supply chain distribution system – A multi-objective approach / S. Validi, A. Bhattacharya, P. Byrne // *International Journal of Production Economics*. – 2014. – No. 152. – P. 71–87. – ISSN 1873-7579.

5 **Guillén-Gosálbez, G.** Optimal design and planning of sustainable chemical supply chains under uncertainty / G. Guillén-Gosálbez, I. E. Grossmann // *AIChE Journal*. – 2009. – No. 1 (55). – P. 99–121. – ISSN 0001-1541.

6 **Rahimi, M.** A stochastic risk-averse sustainable supply chain network design problem with quantity discount considering multiple sources of uncertainty / M. Rahimi, V. Ghezavati, F. Asadi // *Computers & Industrial Engineering*. – 2019. – No. 130. – P. 430–449. – DOI 10.1016/j.cie.2019.02.037.

7 Mathematical programming model of biodiesel supply chain in Colombia / J. A. Aranda, M. J. Bar´on, I. Huertas, J. A. Orjuela // *Ingeniería*. – 2014. – No. 1 (19). – P. 19–49. – ISSN 1405-7743.

8 Optimal design of sustainable cellulosic biofuel supply chains: multiobjective optimization coupled with life cycle assessment and input–output analysis / F. You, L. Tao, D. J. Graziano, S. W. Snyder // *AIChE Journal*. – 2012. – No. 4 (58). – P. 1157–1180. – ISSN 0001-01541.

9 Design of sustainable product systems and supply chains with life cycle optimization based on functional unit : general modeling framework, mixed-integer nonlinear programming algorithms and case study on hydrocarbon biofuels / D. Yue, M. A. Kim, F. You // *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. – 2013. – No. 8 (1). – P. 1003–1014. – ISSN 2168-0485.

10 Two-echelon multiple-vehicle location–routing problem with time windows for optimization of sustainable supply chain network of perishable food / K. Govindan, A. Jafarian, R. Khodaverdi, K. Devika // *International journal of production economics*. – 2014. – No. 152. – P. 9–28. – ISSN 1873-7579.

11 **Büyüközkan, G.** Designing a sustainable supply chain using an integrated analytic network process and goal programming approach in quality function deployment / G. Büyüközkan, Ç. Berkol // *Expert Systems with Applications*. – 2011. – No. 11 (38). – P. 13731–13748. – ISSN 1873-6793.

12 **Осинцев, Н. А.** Методологические основы устойчивого развития логистических цепей грузопотоков : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук : 2.9.9 / Осинцев Никита Анатольевич. – Москва, 2023. – 360 с.

13 A novel hybrid method using fuzzy decision making and multi-objective programming for sustainable-reliable supplier selection in two-echelon supply chain design / E. B. Tirkolaee, A. Mardani, Z. Dashtian, M. Soltani, G. W. Weber // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – No. 250. – P. 119517. – DOI 10.1016/j.jclepro.2019.119517.

14 Sustainable supply chain management : framework and further research directions / S. J. Childe, S. F. Wamba, A. Gunasekaran, R. Dubey, K. Shibin, T. Papadopoulos // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – No. 142. – P. 1119–1130. – ISSN 1879-1786.

15 **Jakhar, S. K.** Performance evaluation and a flow allocation decision model for a sustainable supply chain of an apparel industry / S. K. Jakhar // *Journal of Cleaner Production*. – 2015. – No. 87. – P. 391–413. – ISSN 1879-1786.

16 Fuzzy multi-objective sustainable and green closed-loop supply chain network design / H. Soleimani, K. Govindan, H. Saghafi, H. Jafari // *Computers & Industrial Engineering*. – 2017. – No. 109. – P. 191–203. – ISSN 1879-0550.

17 Sustainable fertilizer supply chain network design using evolutionary-based resilient robust stochastic programming / M. Rabbani, S. M. H. Molana, S. M. Sajadi, M. H. Davoodi // *Computers & Industrial Engineering*. – 2022. – No. 174. – P. 108770. – DOI 10.1016/j.cie.2022.108770.

18 **Jabbarzadeh, A.** Resilient and sustainable supply chain design: sustainability analysis under disruption risks / A. Jabbarzadeh, B. Fahimnia, F. Sabouhi // *International Journal of Production Research*. – 2018. – No. 17 (56). – P. 5945–5968. – DOI 10.1080/00207543.2018.1461950.

19 **Orjuela-Castro, J. A.** Identifying trade-offs between sustainability dimensions in the supply chain of biodiesel in Colombia / J. A. Orjuela-Castro, J. A. Aranda-Pinilla, C. E. Moreno-Mantilla // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2019. – No. 161. – P. 162–169. – DOI 10.1016/j.compag.2018.03.009.

20 **Corsano, G.** Optimal design for sustainable bioethanol supply chain considering detailed plant performance model / G. Corsano, A. R. Vecchietti, J. M. Montagna // *Computers & Chemical Engineering*. – 2011. – No. 8 (35). – P. 1384–1398. – ISSN 1873-4375.

12 **Osintsev, N. A.** Methodological foundations of sustainable development of logistics chains of cargo flows : dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences : 2.9.9 / Osintsev Nikita Anatolievich. – Moscow, 2023. – 360 p.

13 A novel hybrid method using fuzzy decision making and multi-objective programming for sustainable-reliable supplier selection in two-echelon supply chain design / E. B. Tirkolaee, A. Mardani, Z. Dashtian, M. Soltani, G. W. Weber // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – No. 250. – P. 119517. – DOI 10.1016/j.jclepro.2019.119517.

14 Sustainable supply chain management : framework and further research directions / S. J. Childe, S. F. Wamba, A. Gunasekaran, R. Dubey, K. Shibin, T. Papadopoulos // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – No. 142. – P. 1119–1130. – ISSN 1879-1786.

15 **Jakhar, S. K.** Performance evaluation and a flow allocation decision model for a sustainable supply chain of an apparel industry / S. K. Jakhar // *Journal of Cleaner Production*. – 2015. – No. 87. – P. 391–413. – ISSN 1879-1786.

16 Fuzzy multi-objective sustainable and green closed-loop supply chain network design / H. Soleimani, K. Govindan, H. Saghafi, H. Jafari // *Computers & Industrial Engineering*. – 2017. – No. 109. – P. 191–203. – ISSN 1879-0550.

17 Sustainable fertilizer supply chain network design using evolutionary-based resilient robust stochastic programming / M. Rabbani, S. M. H. Molana, S. M. Sajadi, M. H. Davoodi // *Computers & Industrial Engineering*. – 2022. – No. 174. – P. 108770. – DOI 10.1016/j.cie.2022.108770.

18 **Jabbarzadeh, A.** Resilient and sustainable supply chain design: sustainability analysis under disruption risks / A. Jabbarzadeh, B. Fahimnia, F. Sabouhi // *International Journal of Production Research*. – 2018. – No. 17 (56). – P. 5945–5968. – DOI 10.1080/00207543.2018.1461950.

19 **Orjuela-Castro, J. A.** Identifying trade-offs between sustainability dimensions in the supply chain of biodiesel in Colombia / J. A. Orjuela-Castro, J. A. Aranda-Pinilla, C. E. Moreno-Mantilla // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2019. – No. 161. – P. 162–169. – DOI 10.1016/j.compag.2018.03.009.

20 **Corsano, G.** Optimal design for sustainable bioethanol supply chain considering detailed plant performance model / G. Corsano, A. R. Vecchietti, J. M. Montagna // *Computers & Chemical Engineering*. – 2011. – No. 8 (35). – P. 1384–1398. – ISSN 1873-4375.

- 21 A new fuzzy DEA model for evaluation of efficiency and effectiveness of suppliers in sustainable supply chain management context / M. Azadi, M. Jafarian, R. F. Saen, S. M. Mirhedayatian // *Computers & Operations Research*. – 2015. – No. 54. – P. 274–285. – ISSN 1873-765X.
- 22 Impact of supply chain management practices on sustainability / K. Govindan, S. G. Azevedo, H. Carvalho, V. Cruz-Machado // *Journal of Cleaner production*. – 2014. – No. 85. – P. 212–225. – ISSN 1879-1786.
- 23 Optimization of network redundancy and contingency planning in sustainable and resilient supply chain resource management under conditions of structural dynamics / A. Pavlov, D. Ivanov, D. Pavlov, A. Slinko // *Annals of Operations Research*. – 2019. – P. 1–30. – DOI 10.1007/s10479-019-03182-6.
- 24 **Da Silva, C.** Environmental monetization and risk assessment in supply chain design and planning / C. Da Silva, A. P. Barbosa-Povoa, A. Carvalho // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – No. 270. – P. 121552. – DOI 10.1016/j.jclepro.2020.121552.
- 25 **Pishvae, M. S.** An accelerated Benders decomposition algorithm for sustainable supply chain network design under uncertainty : A case study of medical needle and syringe supply chain / M. S. Pishvae, J. Razmi, S. A. Torabi // *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*. – 2014. – No. 67. – P. 14–38. – ISSN 1878-5794.
- 26 **Hoffa-Dabrowska, P.** Simulation modeling of the sustainable supply chain / P. Hoffa-Dabrowska, K. Grzybowska // *Sustainability*. – 2020. – No. 15 (12). – P. 6007. – DOI 10.3390/su12156007.
- 27 **Tao, Z.** What is the limit of Chinese coal supplies – A STELLA model of Hubbert Peak / Z. Tao, M. Li // *Energy Policy*. – 2007. – No. 6 (35). – P. 3145–3154. – ISSN 1873-6777.
- 28 **Huang, X. Y.** Dynamic models of closed-loop supply chain and robust H_∞ control strategies / X. Y. Huang, N. N. Yan, R. Z. Qiu // *International Journal of Production Research*. – 2009. – No. 9 (47). – P. 2279–2300. – ISSN 1366-588X.
- 29 **Orji, I. J.** An innovative integration of fuzzy-logic and systems dynamics in sustainable supplier selection : A case on manufacturing industry / I. J. Orji, S. Wei // *Computers & Industrial Engineering*. – 2015. – No. 88. – P. 1–12. – ISSN 1879-0550.
- 30 **Golroudbary, S. R.** System dynamics model for optimizing the recycling and collection of waste material in a closed-loop supply chain / S. R. Golroudbary, S. M. Zahraee // *Simulation Modelling Practice and Theory*. – 2015. – No. 53. – P. 88–102. – ISSN 1569-190X.
- 21 A new fuzzy DEA model for evaluation of efficiency and effectiveness of suppliers in sustainable supply chain management context / M. Azadi, M. Jafarian, R. F. Saen, S. M. Mirhedayatian // *Computers & Operations Research*. – 2015. – No. 54. – P. 274–285. – ISSN 1873-765X.
- 22 Impact of supply chain management practices on sustainability / K. Govindan, S. G. Azevedo, H. Carvalho, V. Cruz-Machado // *Journal of Cleaner production*. – 2014. – No. 85. – P. 212–225. – ISSN 1879-1786.
- 23 Optimization of network redundancy and contingency planning in sustainable and resilient supply chain resource management under conditions of structural dynamics / A. Pavlov, D. Ivanov, D. Pavlov, A. Slinko // *Annals of Operations Research*. – 2019. – P. 1–30. – DOI 10.1007/s10479-019-03182-6.
- 24 **Da Silva, C.** Environmental monetization and risk assessment in supply chain design and planning / C. Da Silva, A. P. Barbosa-Povoa, A. Carvalho // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – No. 270. – P. 121552. – DOI 10.1016/j.jclepro.2020.121552.
- 25 **Pishvae, M. S.** An accelerated Benders decomposition algorithm for sustainable supply chain network design under uncertainty : A case study of medical needle and syringe supply chain / M. S. Pishvae, J. Razmi, S. A. Torabi // *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*. – 2014. – No. 67. – P. 14–38. – ISSN 1878-5794.
- 26 **Hoffa-Dabrowska, P.** Simulation modeling of the sustainable supply chain / P. Hoffa-Dabrowska, K. Grzybowska // *Sustainability*. – 2020. – No. 15 (12). – P. 6007. – DOI 10.3390/su12156007.
- 27 **Tao, Z.** What is the limit of Chinese coal supplies – A STELLA model of Hubbert Peak / Z. Tao, M. Li // *Energy Policy*. – 2007. – No. 6 (35). – P. 3145–3154. – ISSN 1873-6777.
- 28 **Huang, X. Y.** Dynamic models of closed-loop supply chain and robust H_∞ control strategies / X. Y. Huang, N. N. Yan, R. Z. Qiu // *International Journal of Production Research*. – 2009. – No. 9 (47). – P. 2279–2300. – ISSN 1366-588X.
- 29 **Orji, I. J.** An innovative integration of fuzzy-logic and systems dynamics in sustainable supplier selection : A case on manufacturing industry / I. J. Orji, S. Wei // *Computers & Industrial Engineering*. – 2015. – No. 88. – P. 1–12. – ISSN 1879-0550.
- 30 **Golroudbary, S. R.** System dynamics model for optimizing the recycling and collection of waste material in a closed-loop supply chain / S. R. Golroudbary, S. M. Zahraee // *Simulation Modelling Practice and Theory*. – 2015. – No. 53. – P. 88–102. – ISSN 1569-190X.

31 External integration mechanisms effect on the logistics performance of fruit supply chains. A dynamic system approach / J. A. Orjuela-Castro, A. L. Caicedo-Otavo, A. F. Ruiz-Moreno, W. Adarme-Jaimes // *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. – 2016. – No. 2 (10). – P. 311–322. – ISSN 2011-2173.

32 **Longo, F.** Sustainable supply chain design : an application example in local business retail / F. Longo // *Simulation*. – 2012. – No. 12 (88). – P. 1484–1498. – ISSN 1741-3133.

33 **Kumar, A.** RFID-enabled process reengineering of closed-loop supply chains in the healthcare industry of Singapore / A. Kumar, S. Rahman // *Journal of Cleaner Production*. – 2014. – No. 85. – P. 382–394. – ISSN 1879-1786.

34 **Mangla, S. K.** Monte Carlo simulation based approach to manage risks in operational networks in green supply chain / S. K. Mangla, P. Kumar, M. K. Barua // *Procedia Engineering*. – 2014. – No. 97. – P. 2186–2194. – ISSN 1877-7058.

35 Sustainability dimensions and PM 2.5 in supply chain logistics / J. Hong, C. Alzaman, A. Diabat, A. A. Bulgak // *Annals of Operations Research*. – 2019. – No. 275. – P. 339–366. – DOI 10.1007/s10479-018-3077-7.

36 **Ivanov, D.** Revealing interfaces of supply chain resilience and sustainability : a simulation study / D. Ivanov // *International Journal of Production Research*. – 2018. – No. 10 (56). – P. 3507–3523. – DOI 10.1080/00207543.2017.1343507.

37 **Van der Vorst, J.** Simulation modelling for food supply chain redesign; integrated decision making on product quality, sustainability and logistics / Jack Van der Vorst, S. O. Tromp, D. J. Zee // *International Journal of Production Research*. – 2009. – No. 23 (47). – P. 6611–6631. – ISSN 1366-588X.

38 **Eising, J. W.** Towards smart grids : Identifying the risks that arise from the integration of energy and transport supply chains / J. W. Eising, T. Van Onna, F. Alkemade // *Applied Energy*. – 2014. – No. 123. – P. 448–455. – ISSN 0306-2619.

39 **Moradi, S.** System dynamics modeling and fuzzy MCDM approach as support for assessment of sustainability management on the example of transport sector company / S. Moradi, G. Sierpiński, H. Masoumi // *Energies*. – 2022. – No. 15 (13). – P. 4917. – DOI 10.3390/en15134917.

40 **Sahay, N.** Supply chain management using an optimization driven simulation approach / N. Sahay, M. Ierapetritou // *AIChE Journal*. – 2013. – No. 2 (59). – P. 4612–4626.

31 External integration mechanisms effect on the logistics performance of fruit supply chains. A dynamic system approach / J. A. Orjuela-Castro, A. L. Caicedo-Otavo, A. F. Ruiz-Moreno, W. Adarme-Jaimes // *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. – 2016. – No. 2 (10). – P. 311–322. – ISSN 2011-2173.

32 **Longo, F.** Sustainable supply chain design : an application example in local business retail / F. Longo // *Simulation*. – 2012. – No. 12 (88). – P. 1484–1498. – ISSN 1741-3133.

33 **Kumar, A.** RFID-enabled process reengineering of closed-loop supply chains in the healthcare industry of Singapore / A. Kumar, S. Rahman // *Journal of Cleaner Production*. – 2014. – No. 85. – P. 382–394. – ISSN 1879-1786.

34 **Mangla, S. K.** Monte Carlo simulation based approach to manage risks in operational networks in green supply chain / S. K. Mangla, P. Kumar, M. K. Barua // *Procedia Engineering*. – 2014. – No. 97. – P. 2186–2194. – ISSN 1877-7058.

35 Sustainability dimensions and PM 2.5 in supply chain logistics / J. Hong, C. Alzaman, A. Diabat, A. A. Bulgak // *Annals of Operations Research*. – 2019. – No. 275. – P. 339–366. – DOI 10.1007/s10479-018-3077-7.

36 **Ivanov, D.** Revealing interfaces of supply chain resilience and sustainability : a simulation study / D. Ivanov // *International Journal of Production Research*. – 2018. – No. 10 (56). – P. 3507–3523. – DOI 10.1080/00207543.2017.1343507.

37 **Van der Vorst, J.** Simulation modelling for food supply chain redesign; integrated decision making on product quality, sustainability and logistics / Jack Van der Vorst, S. O. Tromp, D. J. Zee // *International Journal of Production Research*. – 2009. – No. 23 (47). – P. 6611–6631. – ISSN 1366-588X.

38 **Eising, J. W.** Towards smart grids : Identifying the risks that arise from the integration of energy and transport supply chains / J. W. Eising, T. Van Onna, F. Alkemade // *Applied Energy*. – 2014. – No. 123. – P. 448–455. – ISSN 0306-2619.

39 **Moradi, S.** System dynamics modeling and fuzzy MCDM approach as support for assessment of sustainability management on the example of transport sector company / S. Moradi, G. Sierpiński, H. Masoumi // *Energies*. – 2022. – No. 15 (13). – P. 4917. – DOI 10.3390/en15134917.

40 **Sahay, N.** Supply chain management using an optimization driven simulation approach / N. Sahay, M. Ierapetritou // *AIChE Journal*. – 2013. – No. 2 (59). – P. 4612–4626.

41 Bi-objective Decision Support Tool Based on System Dynamics and Discrete Event Modelling for Sustainable Supply Chain / J. Yu, T. Hieu, S. Gray, A. A. Encinas-Oropesa // Journal of Circular Economy. – 2023. – P. 1–20. – DOI 10.55845/SDDH3833.

42 **Vieira, A. A. C.** A multi-objective simulation-based decision support tool for wine supply chain design and risk management under sustainability goals / A. A. C. Vieira, J. R. Figueira, R. Fragoso // Expert Systems with Applications. – 2023. – P. 120757. – DOI 10.1016/j.eswa.2023.120757.

43 **Chanchaichujit, J.** Sustainable supply chain management: A literature review of recent mathematical modelling approaches / J. Chanchaichujit, Q. C. Pham, A. Tan // International Journal of Logistics Systems and Management. – 2019. – No. 4 (33). – P. 467–496. – DOI 10.1504/IJLSM.2019.101794.

44 **Осинцев, Н. А.** Концепция системы управления логистическими потоками в «зеленых» цепях поставок / Н. А. Осинцев // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 2 (46). – С. 81–92. – DOI 10.20291/2079-0392-2020-2-81-92.

45 **Осинцев, Н. А.** Мультикритериальные методы принятия решений на транспорте и в логистике / Н. А. Осинцев // Транспорт Урала. – 2021. – № 4 (71). – С. 4–17. – DOI 10.20291/1815-9400-2021-4-3-17.

46 **Осинцев, Н. А.** Многокритериальные методы принятия решений в «зеленой» логистике / Н. А. Осинцев // Мир транспорта. – 2021. – № 5 (96). – С. 105–114. – DOI 10.30932/1992-3252-2021-19-5-13.

47 Logistic flow control system in green supply chains / N. Osintsev, A. Rakhmangulov, A. Śladkowski, N. Dyorina // Ecology in Transport : Problems and Solutions. – 2020. – P. 311–380. – ISBN 978-3-030-42322-3.

41 Bi-objective Decision Support Tool Based on System Dynamics and Discrete Event Modelling for Sustainable Supply Chain / J. Yu, T. Hieu, S. Gray, A. A. Encinas-Oropesa // Journal of Circular Economy. – 2023. – P. 1–20. – DOI 10.55845/SDDH3833.

42 **Vieira, A. A. C.** A multi-objective simulation-based decision support tool for wine supply chain design and risk management under sustainability goals / A. A. C. Vieira, J. R. Figueira, R. Fragoso // Expert Systems with Applications. – 2023. – P. 120757. – DOI 10.1016/j.eswa.2023.120757.

43 **Chanchaichujit, J.** Sustainable supply chain management: A literature review of recent mathematical modelling approaches / J. Chanchaichujit, Q. C. Pham, A. Tan // International Journal of Logistics Systems and Management. – 2019. – No. 4 (33). – P. 467–496. – DOI 10.1504/IJLSM.2019.101794.

44 **Osintsev, N. A.** The concept of a logistics flow management system in “green” supply chains / N. A. Osintsev // Bulletin of the Ural State Transport University. – 2020. – No. 2 (46). – P. 81–92. – DOI 10.20291/2079-0392-2020-2-81-92.

45 **Osintsev, N. A.** Multicriteria methods of decision-making in transport and logistics / N. A. Osintsev // Transport of the Urals. – 2021. – No. 4 (71). – P. 4–17. – DOI 10.20291/1815-9400-2021-4-3-17.

46 **Osintsev, N. A.** Multi-criteria decision-making methods in “green” logistics / N. A. Osintsev // World of Transport. – 2021. – No. 5 (96). – P. 105–114. – DOI 10.30932/1992-3252-2021-19-5-13.

47 Logistic flow control system in green supply chains / N. Osintsev, A. Rakhmangulov, A. Śladkowski, N. Dyorina // Ecology in Transport : Problems and Solutions. – 2020. – P. 311–380. – ISBN 978-3-030-42322-3.

N. A. Osintsev, A. N. Rakhmangulov, P. N. Mishkurov, S. N. Kornilov, M. S. Melnikov

THE CONCEPT OF HYBRID MULTICRITERIA MODEL OF SUSTAINABLE SUPPLY CHAIN

Abstract. The paper proposed the concept of a hybrid model of sustainable supply chain based on the combination of multi-criteria decision-making methods with simulation modeling. The possibility of using simulation modeling to describe functional dependencies between the indicators of sustainable supply chain, parameters, and indicators of logistics flows in the implementation of green logistics instruments is shown. The combination of models is necessary to forecast and optimize the values of parameters and indicators of logistics flows in accordance with the selected options of the set of green logistics instruments and considering the limited logistics resources. The proposed approach will improve the sustainability of supply chains as a result of the selection and implementation of green logistics tools.

Keywords: sustainable development, green logistics, sustainable supply chain, concept, multi-criteria model, simulation model, hybrid model.

For citation: The concept of hybrid multicriteria model of sustainable supply chain / N. A. Osintsev, A. N. Rakhmangulov, P. N. Mishkurov [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 1. – P. 90–104. – DOI 10.46973/0201–727X_2024_1_90.

Сведения об авторах

Осинцев Никита Анатольевич

Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова (МГТУ им. Г. И. Носова),
кафедра «Логистика и управление транспортными системами»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: osintsev@magtu.ru

Рахмангулов Александр Нельевич

Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова (МГТУ им. Г. И. Носова),
кафедра «Логистика и управление транспортными системами»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: ran@magtu.ru

Мишкuroв Павел Николаевич

Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова (МГТУ им. Г. И. Носова),
кафедра «Логистика и управление транспортными системами»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: p.mishkurov@magtu.ru

Корнилов Сергей Николаевич

Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова (МГТУ им. Г. И. Носова),
кафедра «Логистика и управление транспортными системами»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: sn_kornilov@magtu.ru

Мельников Михаил Сергеевич

Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова (МГТУ им. Г. И. Носова),
кафедра «Логистика и управление транспортными системами»,
магистрант,
e-mail: andruxa645@mail.ru

Information about the authors

Osintsev Nikita Anatolievich

Nosov Magnitogorsk State Technical University (NMSTU),
Chair «Logistics and Transport Systems Management»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: osintsev@magtu.ru

Rakhmangulov Aleksander Nelievich

Nosov Magnitogorsk State Technical University (NMSTU),
Chair «Logistics and Transport Systems Management»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: ran@magtu.ru

Mishkurov Pavel Nikolayevich

Nosov Magnitogorsk State Technical University (NMSTU),
Chair «Logistics and Transport Systems Management»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: p.mishkurov@magtu.ru

Kornilov Sergey Nikolayevich

Nosov Magnitogorsk State Technical University (NMSTU),
Chair «Logistics and Transport Systems Management»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: sn_kornilov@magtu.ru

Melnikov Mikhail Sergeevich

Nosov Magnitogorsk State Technical University (NMSTU),
Chair «Logistics and Transport Systems Management»,
Master's Student,
e-mail: andruxa645@mail.ru

С. А. Сагайдак, Т. О. Графова, А. В. Муравьев

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛОГИСТИЧЕСКОГО АУДИТА В ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИХ КОМПАНИЯХ

Аннотация. Аудит логистики считается эффективным инструментом управления компанией, предназначенным для анализа и контроля эффективности и экономичности логистической деятельности. С каждым днем все больше компаний включают логистический аудит в свою практику, поскольку он является эффективным средством в современной динамичной деловой среде: помогает оценить состояние и эффективность управления логистикой компании, выявить области для улучшения и корректировки процессов, что способствует повышению качества и производительности логистической системы в целом. Кроме того, это повышает конкурентоспособность компании. В этой статье сделан акцент на внедрении аудита в транспортные компании, поскольку ранее он применялся в основном в производственных компаниях для оптимизации логистических производственных процессов. В статье описывается процесс проведения аудита и анализируются основные процессы, связанные с логистикой в транспортной компании.

Ключевые слова: логистика, аудит, логистическая система, внутренний контроль, транспортная сеть.

Для цитирования: Сагайдак, С. А. Использование логистического аудита в транспортно-логистических компаниях / С. А. Сагайдак, Т. О. Графова, А. В. Муравьев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1. – С. 105–112. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_105.

Введение

Комитет спонсорских организаций Комиссии Тредвея (COSO) предлагает пять видов внутреннего контроля, чтобы помочь компаниям разработать собственный эффективный механизм внутреннего контроля.

Один из этих видов – контрольная среда. Она включает в себя структуру и рамки программы внутреннего контроля, в том числе процессы и структуры, лежащие в основе компании. Контрольная среда также включает в себя ценности и этические принципы, которых организация придерживается, а также параметры выполнения обязанностей совета директоров. Проще говоря, контрольная среда – это культура, которую компания создаёт вокруг внутреннего контроля. Руководство, менеджеры и руководители подразделений должны пояснять важность внутреннего контроля, а все процессы должны проходить в рамках контрольной среды.

Оценка рисков. Для построения эффективной системы внутреннего контроля компания должна понимать, какие риски она контролирует, с какими внутренними и внешними рисками она сталкивается. Правильная оценка рисков предполагает выявление рисков во всех областях бизнеса, как внутренних, так и внешних, а затем определение путей их снижения до приемлемого уровня. В настоящее время все больше компаний прибегают к логистическому аудиту, поскольку в условиях современной конкуренции именно эффективность, прибыльность компании и ее рейтинг среди конкурентов действительно имеют значение. Данный вид аудита позволяет вовремя планировать и более эффективно организовывать деятельность компании [1].

Основная цель логистического контроля зависит от конкретных потребностей компании. Объем аудита определяется размером компании, ее продукцией и технологической деятельностью. При проведении аудита важно сосредоточиться на точной подготовке и организации проверки. Для повышения профессионализма логистических служб в Российской Федерации регулярно проводятся встречи для владельцев транспортно-логистических компаний.

Логистический аудит – это процедура анализа и планирования, которая направлена на управление логистическими функциями компании. Анализ в свою очередь основан на стандартизации и включает в себя конкретные методы проведения аудита, цели и результаты. Важно отметить, что логистический аудит не только оценивает состояние логистической деятельности компании, но и предоставляет процедуры и рекомендации по улучшению ситуации. Главная цель аудита состоит в диагно-

стике логистической системы компании и разработке программы для улучшения ее функционирования. Эта программа может включать в себя кардинальные изменения в логистических процессах и немедленные организационные меры. Методы аудита включают его методологическую структуру, которая обеспечивает сопоставимость результатов повторного аудита, объективность и независимость аудитора, конфиденциальность деловой информации и проверяемость данных. В ходе аудита проверяются как количественные показатели (измеряемые параметры логистических процессов), так и качественные показатели (например, компетентность сотрудников и уровень коммуникации между подразделениями).

Статистический анализ

Далее был проведен статистический анализ по данным консалтинговой компании Oliver Wyman среди крупных транспортно-логистических компаний в Российской Федерации и в мире. Было установлено следующее: конкуренцию на российском рынке транспортно-логистических услуг в основном определяют российские транспортные компании и экспедиторы. В сегменте 3PL услуг основную роль играют западные логистические провайдеры с богатым опытом обслуживания крупных производственных и торговых компаний по всему миру. Объемы операций западных провайдеров на российском рынке напрямую зависят от активности их постоянных клиентов в России.

Всего примерно 110 российских компаний (включая федеральных и региональных логистических операторов) и 40 западных компаний могут предоставлять комплексные 3PL услуги с высокой добавленной стоимостью. В 2019 году общая выручка логистических операторов составила \$4,8 млрд, а доходы, исключая транспортные услуги сторонних перевозчиков, – \$2,3 млрд.

За последние несколько лет средние темпы роста ведущих логистических компаний (российских и зарубежных) превысили 26 %, а для ТОП-20 компаний этот показатель был еще выше – более 30 %. Основными факторами роста стали привлечение новых клиентов и открытие дополнительных операционных площадок при повышении цен на услуги. В лидерах роста находятся компании, предоставляющие услуги экспресс-доставки, и операторы, работающие в сфере перевозок автомобилей и комплектующих для сборочных предприятий в России [2].

На рис. 1 и 2 показана структура рынка транспортно-логистических услуг в мире и Российской Федерации.

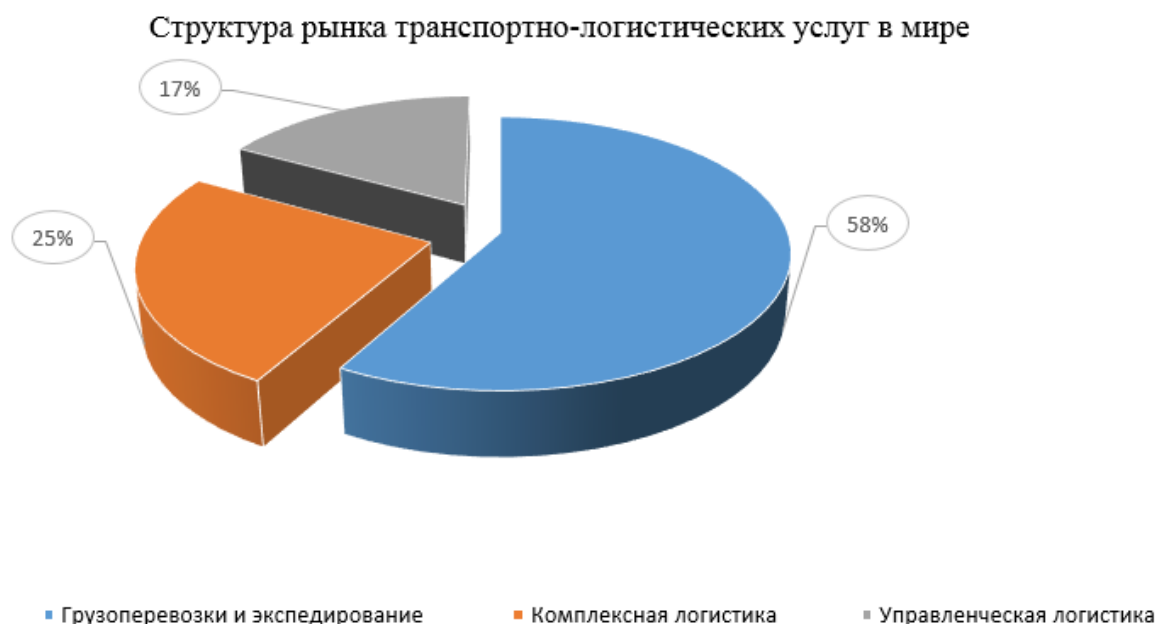


Рис. 1. Структура рынка транспортно-логистических услуг в мире

Структура рынка транспортно-логистических услуг в РФ



Рис. 2. Структура рынка транспортно-логистических услуг в РФ

По оценкам консалтинговой компании Oliver Wyman объем мирового рынка транспортно-логистических услуг составляет около 2 трлн евро. Ключевыми игроками на нем являются автотранспортные компании, на которые приходится более 60 % всех грузоперевозок.

Учетные процессы влияют на технологическую, производственную и хозяйственную деятельность компании. Поэтому имеет смысл изучать и оптимизировать эти процессы, чтобы снизить экономические затраты без ущерба для качества продукции. Логистика требует системного подхода, где элементы и взаимосвязи определяются процессами движения материалов от источника до потребителя, которые включают в себя потоки материалов, экономику и информацию, взаимодействующих друг с другом [3]. Логистическая система устанавливает отношения между производителем и потребителем, а также обеспечивает транспортировку и хранение материалов от места производства до потребителя.

Теоретическая основа

По мнению Барто Ньездельски, логистический аудит – это оценка организации, конкретного процесса или системы. Он считает, что важнейшим аспектом аудита является то, что он основан на непредвзятом изучении, которое позволит получить объективную точку зрения. В организации аудит может проводиться непосредственно либо соответствующим отделом, либо группой внутреннего аудита, либо внешней специализированной компанией.

Процесс логистического аудита включает представление методологии аудита, подготовку к аудиту, определение целей, обработку результатов и оценку документов, а также представление и обсуждение результатов. Аудитор формулирует план изменений в логистике и предлагает компании реализовать приоритетные меры. Отчет о логистическом аудите включает описание текущего состояния сектора, оценку ситуации и потенциала сектора, а также предложения по внесению изменений для реализации потенциала, если таковой имеется [4].

По мнению Ж. А. Мингалева и П. А. Кузнецова, логистический аудит является формой контроля, представляющей собой независимую экспертную оценку движения материального потока, проходящего через предприятие, а также оценку обеспечения его всеми необходимыми ресурсами. Это «зеркало правды» в процессе реализации деятельности предприятия, выявляющее «узкие места» и различного рода отклонения фактического положения дел от планируемых показателей работы предприятия. Результаты логистического аудита позволяют проводить коррекцию логистических схем, таких как снабжение, производство, реализация, транспорт, складирование, и принимать управленческие решения по повышению эффективности их функционирования [5].

Примером транспортно-логистической компании, специализирующейся на автомобильных перевозках, является компания с собственными транспортными средствами и отделами логистики, подбора персонала и отделом продаж. На рис. 3 показана цепь транспортной сети, которая подразумевает

под собой ряд пошаговых действий (инструкций), которые ясно показывают всю цепь транспортной сети от момента поступления заказа до конечной точки его выполнения [6].

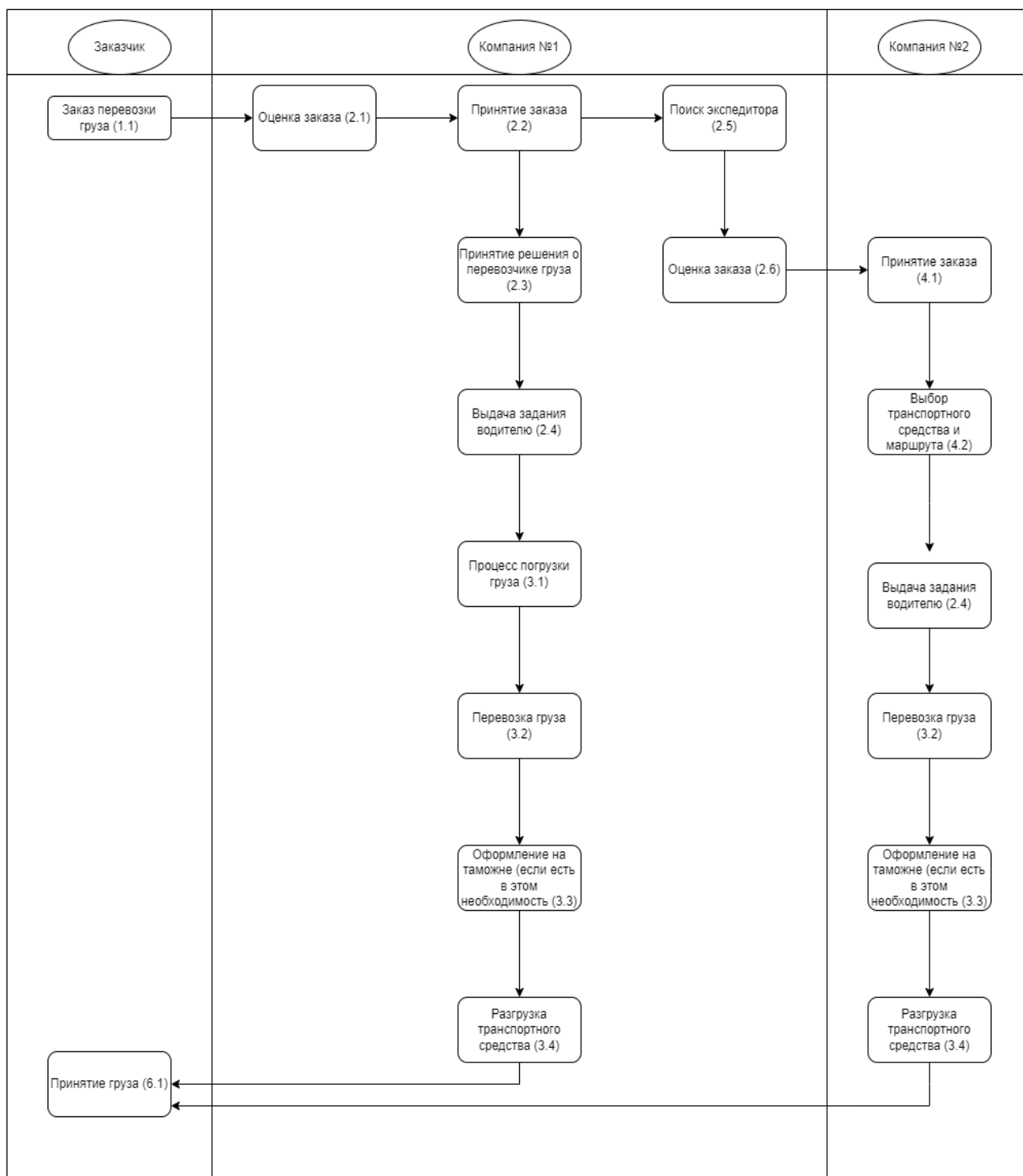


Рис. 3. Цепь транспортной цепи

Цепь транспортной сети включает следующие шаги (рис. 3):

Шаг 1.1: Клиент размещает заказ на перевозку по определенной цене и на определенных условиях. Заказ может быть сделан по телефону, факсу или электронной почте.

Шаг 1.2: Заказ проверяется отделом продаж, и принимается решение о его принятии (шаг 2.1). Заказ либо принимается (шаг 2.1), либо нет.

Шаг 2.1: На стороне транспортной компании отдел продаж принимает заказ и на следующем шаге 2.2 решает, будет ли он выполнять заказ своими транспортными средствами или передаст его

другому перевозчику. В случае нового и непроверенного клиента коммерческий отдел запрашивает рекомендации от клиентов других компаний. Если заказчик хочет проверить перевозчика, он может запросить у него рекомендации и убедиться в их пригодности.

Шаг 2.3: Коммерческий отдел принимает решение о том, что заказ будет обрабатываться внутри компании, и отправляет его грузоотправителю. Грузоотправитель должен выбрать наиболее подходящего перевозчика и наиболее подходящий транспортный маршрут. При дорогостоящих поставках заказчик должен также подтвердить предлагаемый вид транспорта и маршрут (по телефону или электронной почте). В случае, если отдел продаж решает обратиться к услугам другого перевозчика, выполняются следующие шаги: 2.5 и 2.6 (см. рис. 3). Остальные шаги, а именно шаги 4.1–5.4 (см. рис. 3), являются аналогичными предыдущим шагам 2.4–3.4, которые описаны ниже.

Шаг 2.4: Когда транспортное средство и маршрут перевозки подтверждаются, диспетчер назначает водителя. Водитель получает маршрут перевозки и отправляется в путь [7].

Шаг 3.1: Прибыв на погрузочную площадку, водитель перегоняет автомобиль, проверяет погрузку и крепление груза. Он также получает связанные с перевозкой документы, такие как товарно-транспортная накладная CMR (при международной перевозке) или коносамент (при национальной или международной перевозке), а также таможенные документы [8].

Шаг 3.2: Осуществление перевозки товара возлагается на водителя. Во время перевозки груз может быть подвергнут таможенному оформлению, если это необходимо (шаг 3.3) (см. рис. 3).

Также дополнительно оплачиваются различные лицензии и сертификаты, включая лицензию ЕКМТ, лицензию на международные перевозки, книжку МДП, сертификат происхождения и другие подобные документы.

Шаг 3.4: Перед тем как покинуть автомобиль для его разгрузки, водитель передает заказчику копии транспортных и таможенных документов, а также уведомляет отправителя о готовности разгрузки груза.

По завершении перевозки водитель передает оригиналы всех документов в финансовый отдел компании. После обработки представленных документов финансовый отдел направляет заказчику утвержденные оригиналы документов. Заключительным шагом является выставление счета на оплату [9].

Основным процессом, приводящим к получению прибыли и удовлетворению потребностей клиентов в транспортной компании, является собственно перевозка грузов из пункта А в пункт Б. Компания А продает товар компании В, а компания С организует транспортировку товара из пункта отправления в пункт назначения (рис. 4).

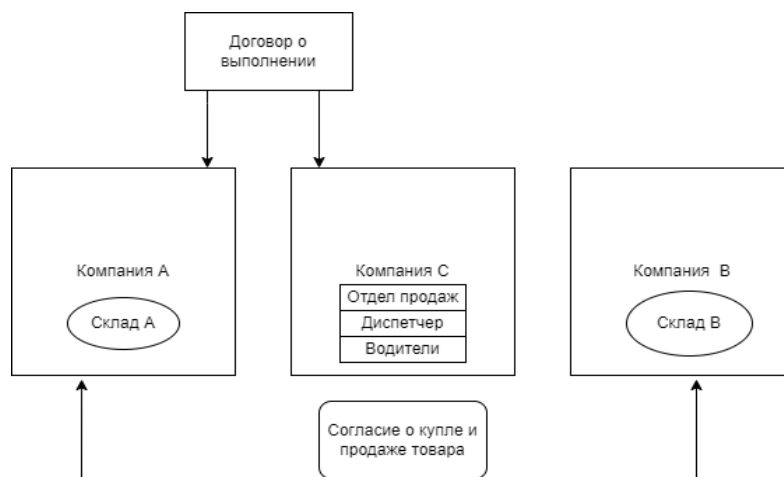


Рис. 4. Уровни управления логистическими операциями

Результаты

Согласно данным консалтинговой компании Oliver Wyman, результаты статистики указывают, что для того чтобы логистический аудит являлся эффективным и полезным инструментом в системе управления транспортно-логистической компании, он должен соответствовать трем основным аспектам:

1 Он должен определять ключевые данные, которые необходимы для эффективного управления затратами, надежностью, продолжительностью цикла и качеством услуг.

2 Детализация окружающей среды компании является первым шагом в разработке логистической стратегии компании.

3 Гибкость и способность адаптироваться к изменениям рынка являются неотъемлемыми качествами логистической системы компании.

Существуют два вида логистического контроллинга: стратегический и оперативный. Стратегический контроллинг направлен на оценку выполнения логистической стратегии предприятия и использование индикаторов для раннего выявления расхождений между запланированными и фактическими показателями. Оперативный контроллинг нацелен на достижение краткосрочных целей, таких как повышение скорости оборота запасов. Он включает систему учета и контроля текущих показателей материального потока, а также принятие своевременных решений по оптимизации затрат и прибыли.

На рис. 5 представлена схема последовательности проведения логистического аудита, состоящего из шести этапов. Каждый этап имеет свои цели, которые преследуются в процессе, и ожидаемые результаты по окончании этапа.

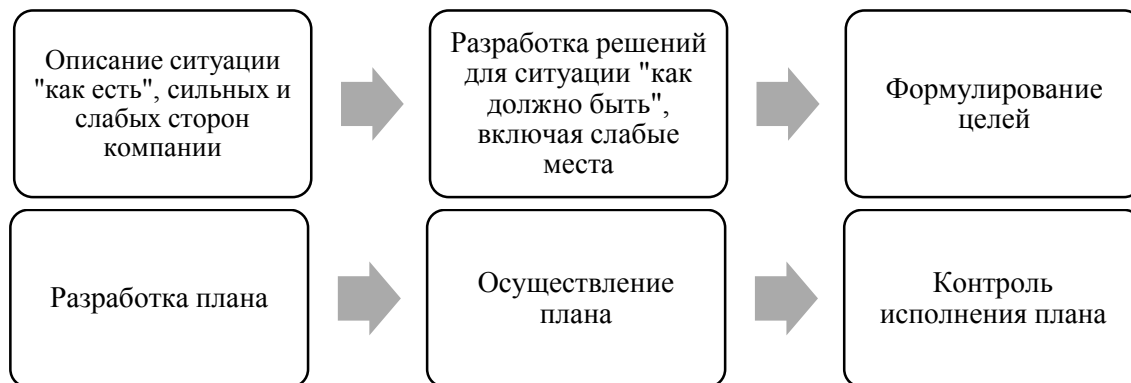


Рис. 5. Схема последовательности проведения логистического аудита

Основу логистического аудита составляет переход от общих целей и бизнес-процессов к разбору причин низкой эффективности и производительности, которые в дальнейшем будут детально изучены в компании. В ходе проведения аудита определяются сильные и слабые места системы логистики, выявляются как положительные, так и отрицательные тенденции, создается прогноз дальнейшего роста и оптимизации, определяются моменты нерационального использования ресурсов компании.

Выводы

Логистический аудит грузовых перевозок, как правило, охватывает как входящие, так и исходящие перевозки, а также другие виды деятельности, связанные с логистикой, такие как управление запасами, складирование или соблюдение торгового законодательства. Типичные результаты относятся к стратегии поиска поставщиков логистических услуг (не ограничиваясь ими), эффективности соблюдения таможенных требований, управлению HTS, оптимизации и консолидации перевозок, управлению заказами и запасами, взаимодействию логистических систем, упорядочению и унификации процессов, ограничению и регулированию перевозок премиум-класса, стратегии портфолио поставщиков логистических услуг и управлению контрактами [10].

Следует отметить, что аудит логистики грузовых перевозок выявит надлежащие методы работы и возможности улучшения или оптимизации внутри логистической цепочки организации посредством объективной оценки и сравнительного анализа данных и, более того, наметит путь, ведущий как к качественному улучшению обслуживания, так и к экономии логистических средств и избеганию затрат.

Список литературы

1 **Пак, А. X.** Perfection of the Transport Company Activity on the Basis of a Logistics Audit / A. X. Pak, N. A. Mayzner // Новая экономика, бизнес и общество : сборник материалов апрельской научно-практической конференции молодых учёных ШЭМ, Владивосток, 28 апреля 2017 г. ; ответственный редактор А. Б. Косолапов. – Владивосток : Дальневосточный федеральный университет, 2017. – P. 729–734. – EDN ZCUKFR.

References

1 **Pak, A. X.** Perfection of the Transport Company Activity on the Basis of a Logistics Audit / A. X. Pak, N. A. Mayzner // New Economy, business and society : Collection of materials of the April scientific and practical conference of young scientists SHEM, Vladivostok, April 28, 2017 ; executive editor A. B. Kosolapov. – Vladivostok : Far Eastern Federal University, 2017. – P. 729–734. – EDN ZCUKFR.

2 **Фейгель, М. Л.** Преимущества цифровизации бухгалтерского учета и аудита / М. Л. Фейгель // Современные исследования и научные достижения в эпоху цифровизации : новые ориентиры и возможности : материалы I Всероссийской научно-практической конференции, Ставрополь, 20 января 2023 г. – Ставрополь : Параграф, 2023. – С. 323–324. – EDN ZAFYZY.

3 **Графова, Т. О.** Учетно-аналитическое обеспечение управления внешнеэкономической деятельностью предприятия / Т. О. Графова, О. А. Мищенко, А. Г. Булгадарян. – Ростов-на-Дону : Российская таможенная академия, 2021. – 178 с. – ISBN 978-5-9590-1226-7.

4 **Сагайдак, С. А.** Цифровизация в транспортных бизнес-процессах / С. А. Сагайдак, Т. О. Графова, А. В. Муравьев // Транспорт : наука, образование, производство : труды Международной научно-практической конференции (26–28 апреля 2023 г.) : т. 3. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2023. – С. 312–315. – EDN DQWZYL.

5 **Кузнецов, П. А.** Логистический аудит и инновационный менеджмент / П. А. Кузнецов, Ж. А. Мингалева // Российское предпринимательство. – 2012. – № 19 (117). – С. 48–54. – EDN NRGFTG.

6 **Риполь-Сарагоси, Ф. Б.** Внутренний контроль в крупных компаниях : монография / Ф. Б. Риполь-Сарагоси. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2009. – 179 с. – ISBN 978-5-88814-285-1.

7 **Тиссен, Э. А.** Технология проведения логистического аудита при внедрении концепции логистического контроллинга на предприятии / Э. А. Тиссен // Актуальные проблемы науки: взгляд студентов : материалы Всероссийской с международным участием студенческой научной конференции (18 января 2023 г.) : в 2 ч. Ч. 2 / отв. редактор О. В. Кублицкая. – Санкт-Петербург : Ленинградский государственный университет имени А. С. Пушкина, 2023. – С. 210–212. – EDN WPIHEK.

8 **Коновалова, С. Н.** Роль логистики в повышении эффективности управления предприятиями АПК / С. Н. Коновалова // Новые векторы развития АПК и сельских территорий : материалы национальной научно-практической конференции, посвященной 90-летию института, Воронеж, 25 ноября 2020 г. – Воронеж : Научно-исследовательский институт экономики и организации агропромышленного комплекса центрально-черноземного района – филиал федерального государственного бюджетного научного учреждения «Воронежский федеральный

2 **Feigel, M. L.** Advantages of digitalization of accounting and auditing / M. L. Feigel // Modern research and scientific achievements in the era of digitalization : new guidelines and opportunities : materials of the I All-Russian Scientific and Practical Conference, Stavropol, January 20, 2023. – Stavropol : Paragraph, 2023. – P. 323–324. – EDN ZAFYZY.

3 **Grafova, T. O.** Accounting and analytical support for the management of foreign economic activity of the enterprise / T. O. Grafova, O. A. Mishchenko, A. G. Bulgadaryan. – Rostov-on-Don : Russian Customs Academy, 2021. – 178 p. – ISBN 978-5-9590-1226-7.

4 **Sagaidak, S. A.** Digitalization in transport business processes / S. A. Sagaidak, T. O. Grafova, A. V. Muravyev // Collection of scientific papers "Transport : science, education, production" : Proceedings of the International Scientific and Practical Conference (April 26–28, 2023) : Vol. 3. – Rostov-on-Don : RSTU, 2023. – P. 312–315. – EDN DQWZYL.

5 **Kuznetsov, P. A.** Logistics audit and innovation management / P. A. Kuznetsov, J. A. Mingaleva // Russian entrepreneurship. – 2012. – No. 19 (117). – P. 48–54. – EDN NRGFTG.

6 **Ripoll-Saragosi, F. B.** Internal control in large companies : monograph / F. B. Ripoll-Saragosi. – Rostov-on-Don : RSTU, 2009. – 179 p. – ISBN 978-5-88814-285-1.

7 **Thyssen, E. A.** Technology of logistics audit when implementing the concept of logistics controlling at the enterprise / E. A. Thyssen // Actual problems of science: students' view : materials of the All-Russian Student Scientific Conference with international participation (January 18, 2023) : in 2 parts. Part 2 / editor-in-chief O. V. Kublitskaya. – Saint Petersburg : A. S. Pushkin Leningrad State University, 2023. – P. 210–212. – EDN WPIHEK.

8 **Konovalova, S. N.** The role of logistics in improving the efficiency of management of agricultural enterprises / S. N. Konovalova // New vectors of development of agriculture and rural areas : materials of the national scientific and practical conference dedicated to the 90th anniversary of the Institute, Voronezh, November 25, 2020. – Voronezh : Research institute of economics and organization of the agro-industrial complex of the central chernozem region – branch of the federal state budgetary scientific institution "Voronezh federal agrarian scientific center named after

аграрный научный центр им. В. В. Докучаева», 2021. – С. 62–67. – EDN EYFPNE.

9 **Калинина, В. С.** Проблемы развития логистического аудита / В. С. Калинина // Национальные тенденции в современном образовании : сборник статей, Омск, 25 декабря 2019 г. / под редакцией А. Э. Еремеева. – Омск : Омская гуманитарная академия, 2020. – С. 9–11. – EDN ALZSHD.

V. V. Dokuchaev", 2021. – P. 62–67. – EDN EYFPNE.

9 **Kalinina, V. S.** Problems of logistics audit development / V. S. Kalinina // National trends in modern education : Proceedings, Omsk, December 25, 2019 / edited by A. E. Eremeev. – Omsk : Omsk Humanitarian Academy, 2020. – P. 9–11. – EDN ALZSHD.

S. A. Sagaidak, T. O. Grafova, A. V. Muraviev

THE USE OF LOGISTICS AUDIT IN TRANSPORT AND LOGISTICS COMPANIES

Abstract. The logistics audit is considered an effective tool for company management, designed to analyse and control the efficiency and cost-effectiveness of logistics activities. Every day more and more companies are incorporating logistics audit into their practice as it is an effective tool in today's dynamic business environment. It helps to assess the status and efficiency of a company's logistics management, identify areas for improvement and adjust processes, which helps to improve the quality and productivity of the logistics system as a whole. In addition, it enhances the competitiveness of the company. This paper focuses on the implementation of auditing in transport companies, as so far it has been applied mainly in manufacturing companies to optimize logistics production processes. The paper describes the audit process and analyses the main processes related to logistics in a transport company.

Keywords: logistics, audit, logistics system, internal control, transport network.

For citation: Sagaidak, S. A. The use of logistic audit in transport and logistics companies / S. A. Sagaidak, T. O. Grafova, A. V. Muraviev // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 1. – P. 105–112. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_105.

Сведения об авторах

Сагайдак Сергей Алексеевич

Ростовский государственный университет путей сообщения» (РГУПС),
кафедра «Экономика, учет и анализ»,
аспирант,
e-mail: Serzh.sagaidak@yandex.ru

Графова Татьяна Олеговна

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Экономика, учет и анализ»,
доктор экономических наук, профессор,
e-mail: rubika78@mail.ru

Муравьев Анатолий Викторович

Ростовский государственный университет путей сообщения» (РГУПС),
Кафедра «Теплоэнергетика на ж.-д. транспорте»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail:nix2001@yandex.ru

Information about the authors

Sagaidak Sergey Alexeyevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Economics, Accounting and Analysis»,
Postgraduate Student,
e-mail: Serzh.sagaidak@yandex.ru

Grafova Tatiana Olegovna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Economics, Accounting and Analysis»,
Doctor of Economic Sciences, Professor,
e-mail: rubika78@mail.ru

Muraviev Anatoly Viktorovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Heat Power Engineering on Railway Transport»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail:nix2001@yandex.ru

Е. А. Чеботарева

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ (НА ПРИМЕРЕ ПРИПОРТОВЫХ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ)

Аннотация. На примере припортовых транспортно-технологических систем (ПТТС) уточнен категориальный аппарат исследования, обоснована роль системного подхода в исследовании сложных транспортных объектов и сформулированы базовые признаки такого подхода: PEST-, SWOT-анализ и синтез; ценологический и когнитивный анализ и синтез; управление, по форме и содержанию соответствующее уровню сложности исследуемого объекта. Раскрыта структура связей между ними, обеспечивающая получение положительного синергетического эффекта совместного применения. Показаны логика и смысл комплексного PEST- и SWOT-исследования, отличия PEST- и SWOT-анализа от PEST- и SWOT-синтеза сложных систем. Приведены основные особенности когнитивного исследования ПТТС: иерархия когнитивных карт (снижение размерности задач и повышение наглядности исследования), когнитивный синтез на основе блокирования и/или создания положительных (аналогично, отрицательных) обратных связей, импульсное моделирование; ценологические исследования: выявление структурных связей ПТТС с системами более высокого ранга, оценка полноты и динамики развития техноценоза ПТТС, управление развитием техноценоза ПТТС.

Ключевые слова: припортовая транспортно-технологическая система; системный подход; анализ, синтез, управление; PEST- и SWOT-анализы и синтезы; ценологический и когнитивный анализы и синтезы, управление.

Для цитирования: Чеботарева, Е. А. Системный подход к исследованию сложных объектов (на примере припортовых транспортно-технологических систем) / Е. А. Чеботарева // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1. – С. 113–121. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_113.

Постановка задачи

В качестве объекта данного исследования рассматривается припортовая транспортно-технологическая система (ПТТС). Предметом исследования выступают технологии системного исследования и управления сложными (многомерными, сильно зашумленными, характеризующимися высокой степенью неопределенности) транспортными объектами. ПТТС относится к этой категории объектов [1].

Действительно, под ПТТС понимается совокупность субъектов и агентов морского, железнодорожного и других видов транспорта, в том числе: порты, транспортные узлы, припортовые и накопительные станции, объединенные едиными информационными и технологическими формами взаимодействия. Данная система призвана решать сложнейшую задачу координации огромного числа участников перевозок, структурных подразделений транспорта, образующих транспортный конвейер. При этом в условиях высокой динамики экспортных грузопотоков, слабой предсказуемости форс-мажорных ситуаций (например, неблагоприятная для погрузки-разгрузки погода в порту) от устойчивости ПТТС зависит и функциональная устойчивость всей транспортной системы страны.

Методологическая основа исследований ПТТС довольно разнообразна и в зависимости от поставленных в исследовании задач может включать: методы теории вероятности и математической статистики, численные методы, методы прогнозирования; корреляционный, регрессионный, факторный и кластерный анализы; методы теории оптимизации; методы теории графов, теории игр, нечетких множеств; методы экономико-математического, имитационного моделирования и др. Такое разнообразие методов требует систематизации методологической основы исследования ПТТС. То есть системный подход, включающий в себя системный анализ, системный синтез, управление, является обязательным элементом такого исследования.

Сущность системного подхода: анализ, синтез, управление

В научных исследованиях, как правило, оперируют понятием «системный анализ» – СА (а не системный подход). СА – прикладное направление теории систем, применяемое при решении сложных слабо формализуемых проблем [2]. Это общее определение, не конкретизирующее его сущность. Частные определения СА звучат следующим образом:

- системное управление организацией (С. Янг);
- методология исследования целенаправленных систем (Ю. И. Черняк);
- способ мышления, способ решения проблемы (С. Оптнер) [2].

В этих определениях категория системного анализа предполагает использование как подчиненных категорий и «синтеза», и «управления». Следует в этой связи отметить некоторые нестыковки в соответствующей онтологии:

– В самом определении системного анализа стоит «указание на систему». Но не все объекты удовлетворяют определению системы: «Система – множество элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом, которое образует определённую целостность, единство» [2]. В отличие от понятий «множество», «совокупность» понятие «система» подчёркивает упорядоченность, целостность, наличие закономерностей построения, функционирования и развития. Таким образом, по определению сужается роль системного анализа. Но, по сути, на практике этого ограничения нет. Например, используется фразеологизм «ценологический анализ систем» [3]. Хотя, если следовать строгим определениям, ценз системой не является, так как содержит не только сильные связи между составляющими, но и средние, а в основном – слабые.

– По определению [2] системный анализ включает и синтез. Но анализ и синтез две противоположные процедуры: анализ – расчленение и изучение по частям, синтез – объединение частей в целое. То есть в определении [2] системный анализ понимается в самом широком смысле (как системный подход), а синтез – в узком (подчиненном).

– Далее в [2] системный анализ включает и управление. Но на практике управление осуществляется уже на проанализированном и синтезированном объекте.

Учитывая вышесказанное, в настоящем исследовании предлагается использовать более общую категорию «системный подход». С существующим в литературе определением системного подхода противоречий при этом не возникает. Действительно, в [4] системный подход понимается как процедура, при которой любой объект рассматривается как совокупность взаимосвязанных элементов (компонентов), имеющих связь с внешней средой, совокупность внутренних и внешних обратных связей (положительных и отрицательных).

Системный подход реализуется через следующие методы и процедуры: абстрагирование и конкретизация, анализ и синтез, индукция и дедукция, формализация и конкретизация, композиция и деконпозиция, структурирование и реструктурирование, макетирование, алгоритмизация, моделирование, экспериментирование (в частности, имитационное моделирование), экспертное оценивание и тестирование, верификация.

В качестве технологий системного подхода к исследованию сложных объектов ниже рассматриваются PEST-, SWOT-анализы и синтезы, ценологический и когнитивный анализы и синтезы, управление. Их совместное и сбалансированное использование дает значительный положительный синергетический эффект.

PEST- и SWOT-анализы и синтезы. Управленческие стратегии

PEST-анализ изучает макрофакторы [5]. То есть рынок и внешнюю среду, которые, как можно принять в большинстве случаев исследования ПТТС, не зависят от нас. SWOT-анализ изучает микрофакторы деятельности исследуемого объекта. Это сильные и слабые стороны производства (бизнеса), существующие для него возможности и угрозы. PEST-анализ и SWOT-анализ зависят от позиции и знаний того, кто его проводит. Но в этом есть и большой плюс: эти технологии обеспечивают начальную фазу процесса формализации естественного интеллекта специалиста и трансляцию его в машинный интеллект.

В нашем случае рассматриваемые процедуры могут реализоваться как для всей ПТТС в целом, так и для ее отдельных подсистем и подпроцессов.

PEST-анализ традиционно проводится по схеме (рис. 1 – здесь приведен только фрагмент анализа). Далее предлагается проводить его по усовершенствованной схеме SWOT-исследования (рис. 2).

PEST-синтез состоит в разработке мер компенсации внешних негативных проявлений (выявляемых традиционным PEST-анализом) на традиционных же площадках мирового сотрудничества за счет:

- организации параллельного экспорта и импорта;
- расширения сотрудничества на иных полях (например, БРИКС);
- внутренних ресурсов развития.

Таблица 1

Фрагмент PEST-анализа ПТТС

<p><i>Политические факторы</i></p> <p>Социально-экономическая нестабильность развития страны и мира, специальная военная операция, изменение границ территорий, усиливающийся миграционный кризис, международные связи</p>	<p><i>Экономические факторы</i></p> <p>Санкции (нарушение логистических маршрутов, потеря комплектующих иностранного производства), кадровый голод, разгоняющаяся инфляция, отсутствие транспортных кластеров и СРО</p>
<p><i>Социальные факторы</i></p> <p>Разрывы между культурой производства, культурой безопасности на транспорте с образованием и наукой, высокая зависимость от цифровых экосистем (клиповое мышление сотрудников и пользователей), уровень жизни; объем социальных задач при использовании совмещенной транспортной инфраструктуры</p>	<p><i>Технологические факторы</i></p> <p>Недостаточность инноваций в ПТТС – и на транспорте, и в целом; угрозы технико-технологической безопасности (в том числе киберпреступность), несоответствие ресурсов заданным объемам транспортной работы, уровень интеллектуализации управляющих воздействий и цифровизации</p>

Традиционный SWOT-анализ выявляет сильные и слабые стороны исследуемого объекта (у нас ПТТС), возможности и угрозы (табл. 2, представляет собой так же только фрагмент) [5, 6]. На пересечении этих входов таблицы образуются квадраты их пересечений, в которые заносятся результаты их взаимодействия.

Здесь же осуществляется построение вариантов действий, основанных на пересечении полей (в табл. 2 показано на примере поля СЛ+В). Для этого последовательно рассматривают различные сочетания факторов внешней среды и внутренних свойств объекта. Рассматриваются все возможные парные комбинации и выделяются те, что должны быть учтены при разработке стратегии развития.

– Поле СИ+В показывает, какие сильные стороны необходимо использовать, чтобы получить отдачу от возможностей во внешней среде.

– Поле СЛ+В показывает, за счет каких возможностей внешней среды организация сможет преодолеть имеющиеся слабости.

– Поле СИ+У показывает, какие силы необходимо использовать для устранения угроз.

– Поле СЛ+У показывает, от каких слабостей необходимо избавиться, чтобы попытаться предотвратить угрозу.

SWOT-синтез понимается как процедура заполнения внутренних полей таблицы 2.

Технологии управления на основе PEST и SWOT-процедур осуществляются в соответствии с мерами разработанными в полях СИ+В, СИ+У, СЛ+В, СЛ+У, как для SWOT-, так для PEST-синтеза. Например, в нашем случае:

– Создается цифровая платформа, обеспечивающая долгосрочный прогноз погоды в порту и планирование работ ПТТС и синтезирующая коллективный интеллект за счет общения виртуальных агентов в рамках интернета вещей на данной платформе.

– Проводится активная интеллектуализация и цифровизация транспортных процессов в ПТТС (создание автоматов-советчиков, дополненной и виртуальной реальностей для обслуживания и ремонта оборудования). Это позволит увеличить пропускную способность, не изменяя инфраструктуру ПТТС.

Когнитивный анализ и синтез

В основе когнитивного анализа лежит когнитивная карта, отражающая взаимосвязь критериев и факторов развития ПТТС, сущность организационного и технологического процессов в ПТТС [7]. Когнитивная карта позволяет выявить наличие организационных и технологических обратных связей в системе. Круги деструктивного развития Кналла [8], спирали развития (позитивного, деструктивного) выступают примерами положительной обратной связи. Это отдельные фрагменты когнитивной карты.

Примером отрицательной обратной связи может служить установление равновесия спроса и предложения на рынке транспортных услуг: повышение предложения снижает спрос и наоборот.

ПТТС – сложная система и подробная когнитивная карта будет мало эффективна вследствие большой размерности задачи. В этом случае следует предложить иерархические когнитивные карты. Например, строится укрупненная карта стратегического анализа, планирования и управления ПТТС,

которая раскрывается совокупностью тактических карт, которые в свою очередь более подробно идентифицируются оперативными когнитивными картами, отражающие инвестиционную, кадровую, экономическую и прочие составляющие ПТТС.

Управление на основании когнитивных процедур осуществляется по следующему алгоритму:

– Имитация различных вариантов развития среды и объекта погружения, реализованная с помощью импульсного моделирования управляющих воздействий и случайных воздействий среды погружения. При импульсном моделировании формируются сценарии (планы эксперимента), в которых определяется в какие вершины или их совокупности будут вноситься изменения – импульсы, например, развитие инфраструктуры припортовых станций или подходов, цифровых технологий, в технологии или в кадровую политику отрасли [10–12].

– Прогноз развития путем экстраполяции этих модельных конструкций.

– Выбор наиболее приемлемого варианта по заданным критериям.

Таблица 2

Фрагмент SWOT-анализа ПТТС

	Возможности	Угрозы
	Использования ресурсов других видов транспорта (автомобильного, трубопроводного). Интеллектуализация и цифровизация процессов	Ограничения деятельности, как приграничного региона в случае конфликтов. Нехватка квалифицированных, молодых кадров
Сильные стороны ПТТС – ключевое звено транспортного коридора. ПТТС, как правило, начало и окончание транспортно-логистических цепочек, что упрощает планирование	СИ+В	СИ+У
Слабые стороны Зависимость от погодных условий в порту. В силу «тупиковости» ПТТС увеличивается пробег пустых вагонов. Ограниченная пропускная способность инфраструктуры	СЛ+В За счет интеллектуализации и цифровизации процессов увеличить пропускную способность, не изменяя инфраструктуру ПТТС. Создать цифровую платформу, обеспечивающую долгосрочный прогноз погоды и планирование работ	СЛ+У

Ценологический анализ и синтез

Техноценоз – ограниченная во времени и пространстве искусственная «система», сообщество элементов (объектов инфраструктуры, изделий технологий и т. д.) с преимущественно слабыми связями между собой и едиными целями развития, выделяемое для целей исследования, проектирования, строительства или управления (усовершенствовано по [9, 3]). Термин техноценоз введён по аналогии с биоценозом. В это понятие мы вкладываем и транспортные ценозы.

Ценозы описываются гиперболическими распределениями типа:

$$y = a/x^a.$$

Различают ценозы: видовые, ранго-видовые, ранговые по параметру.

В данном исследовании речь идет о важной составляющей техноценозов – транспортных ценозах.

Задачами *ценологического анализа* данного подраздела являются:

1 Выявление параметров (характеристик) ПТТС относительно которых следует провести ценологическое обследование. К таковым параметрам можно отнести: элементы инфраструктуры, оборудование ПТТС, используемые технологии, финансовые и экономические характеристики, кадровое, научно-образовательное обеспечение работ и т. д.

2 Идентификация текущего состояния ПТТС, то есть, нужно определить является ли заданная ПТТС: ценозом, квазиценозом или ценологических качеств вообще не проявляет.

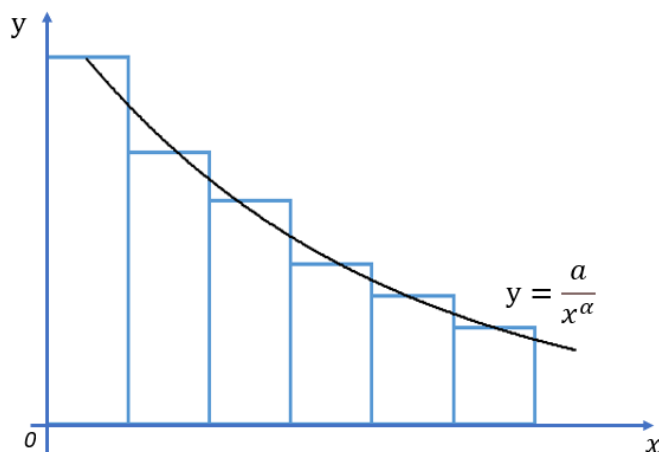


Рис. 1. Графическая иллюстрация сложившегося ценоза

Если исходные данные и аппроксимирующая их кривая имеют вид, представленный на рис. 2, то можно говорить об отсутствии ярко выраженного ценоза. Показателем тому будет большая ошибка аппроксимации исходных данных гиперболой.

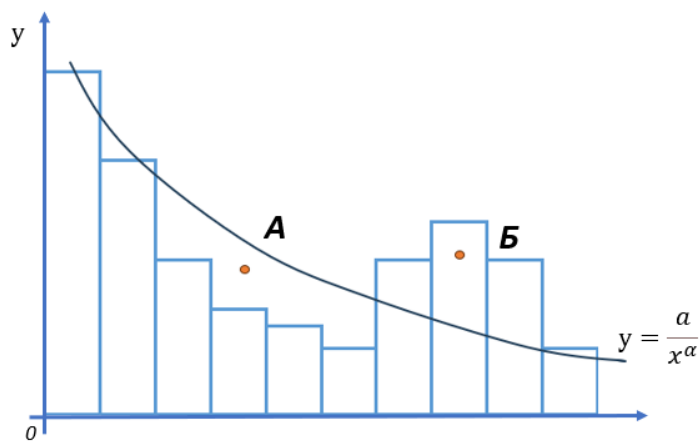


Рис. 2. Графическая иллюстрация плохо сложившегося ценоза

3 Идентификация ПТТС как составляющей устойчивого ценоза более высокого уровня (например, транспортной системы государства).

В этом случае важно определить место ПТТС в этом ценозе (см. рис. 2). Если оно локализуется в локальной области точки А, то данный ценоз способствует развитию ПТТС. Если ПТТС попадает в область точки В, то она будет «угнетаться» этим ценозом.

4 Определение динамики развития ценоза (укрепление, деградация). Если ценологические кривые, построенные в разные моменты времени, имеют динамику от рис. 1 к рис. 2, то следует говорить об деградации ценоза. Это может быть как отрицательным явлением (если ценоз удовлетворял финансовым и производственным показателям, а теперь они под вопросом), так и положительным фактом (при необходимости радикального преобразования объекта исследования – не требуется значительных

внешних усилий для разрушения сложившегося ценоза).

Ценологический синтез может быть структурным (добавление, удаление структурных единиц, реформатирование структуры) и параметрическим (изменение параметра α).

Относительно хорошо развитых систем автоматического управления (САУ) различают следующие виды синтеза: оптимальный, адаптивный, робастный, нелинейный, дискретный и многокритериальный синтез. Очевидно, что все они легко транслируются и на ценологический синтез. Настало время вводить соответствующие определения, обсуждать их особенности и применение.

Задачами *ценологического синтеза* в рамках исследования ПТТС будут:

- Формирование дополнительных квазиценозов до полного транспортного ценоза.
- Формирование ценозов с заданными свойствами (полноты, устойчивости).

Управление на основе процедур ценологического анализа и синтеза.

Транспортный ценоз не является самоцелью для управленцев транспортным обслуживанием. Он служит инструментом для достижения практических целей, к которым следует отнести: эффективность и качество транспортного обслуживания, его надежность и безопасность. В свою очередь эффективность может быть финансовой (прибыль, рентабельность, себестоимость транспортных услуг) и производственной (погрузка, выгрузка, скорость доставки и т. д.).

На рис. 3 по горизонтали обозначаем время, а по вертикали показатель эффективности E (один из вышеперечисленных) и параметр α ПТТС как ценоза. Для построения зависимостей $E(t)$ и $\alpha(t)$ требуется статистическая информация о состоянии техноценоза за обозримый промежуток времени. Предположим, что эти зависимости получились такими, как показано на рис. 3. Тогда по $\max E$ определяем на рис. 3 как показано стрелками оптимальное значение параметра ценоза (1) $\alpha_{\text{опт}}$.

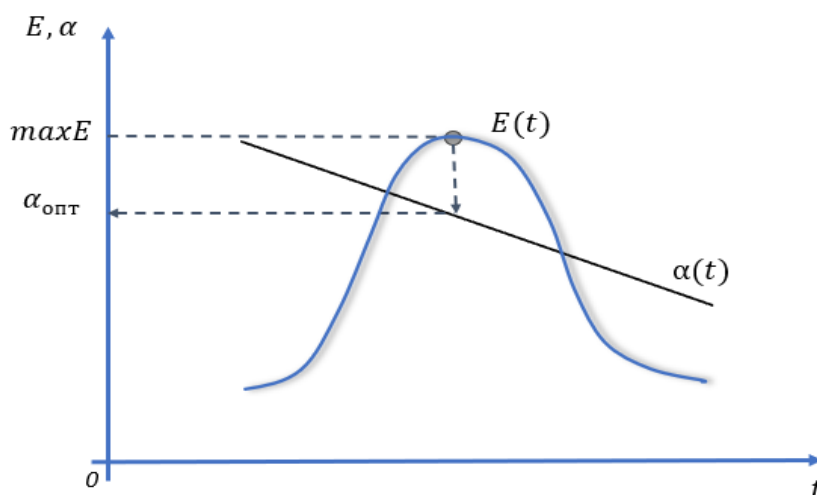


Рис. 3. Оптимизация параметра ценоза

Управление в ПТТС

В высокой сложности ПТТС рассматривается иерархия управлений, включающая:

1 Внешний уровень. Предполагает, что ПТТС – часть социально-экономической системы более высокого уровня (например: транспортная система в целом, экономика региона, страны).

В этом случае ПТТС – элемент некоторого глобального ценоза. На этом уровне, кроме идеологии ценологического анализа используются также балансовые модели В. В. Леонтьева, методы самоорганизации на уровне мезо- и макросистем, производственные кластеры (последние содержат предприятия, выпускающую разную продукцию, оказывающие разные услуги, но дополняющие друг друга). Например, в кластер ПТТС могут входить:

2 Уровень ПТТС. Здесь уже ПТТС рассматривается как ценоз или квазиценоз. На этом уровне используем также:

- саморегулируемые организации (СРО);
- самоорганизацию на уровне предприятий (микроуровень);
- теорию активных систем (ТАС) – осуществляется моделирование транспортно-логистических процессов с целью управления экономическими показателями ПТТС;

– теорию массового обслуживания (ТМО) – осуществляется моделирование транспортно-логистических процессов с целью управления производственными показателями ПТТС.

СРО составляют предприятия, выпускающие одну продукцию (предоставляющие одни услуги), но объединенные едиными требованиями и взаимной ответственностью. СРО позволяют интегрировать ресурсы (что повышает вероятность успеха) и сокращают плечо управления между различными уровнями управления.

3 Уровень отдельных процессов ПТТС, например: обработка документов, планирование, техническое обслуживание и ремонт оборудования и т. д. В этом случае возможно эффективное применение аппарата теории автоматического управления и регулирования (ТАУиР).

То есть управление по форме и содержанию должно соответствовать уровню сложности исследуемого объекта (процедуры).

Выводы

В работе рассмотрены различные подходы к исследованию ПТТС, а также получены следующие выводы и результаты:

1 Проанализированы и уточнены через призму исследования транспортных систем категории «системный анализ», «системный подход».

2 Обоснована необходимость использования системного подхода во всех его проявлениях (анализ, синтез, управление) для исследования ПТТС.

3 Раскрыта сущность SWOT-, PEST-процедур через призму задач ПТТС.

4 Сформулированы основы и особенности применения когнитивного анализа и синтеза, а также ценологического анализа и синтеза, для формирования эффективной структуры и параметров ПТТС.

5 Проанализированы уровни и инструментарий управления в ПТТС.

Список литературы

1 **Чеботарева, Е. А.** Теория и методология организации транспортного производства в припортовых транспортно-технологических системах : монография / Е. А. Чеботарева ; ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов-на-Дону, 2020. – 213 с. – ISSN 978-5-907295-22-3.

2 **Волкова, В. Н.** Теория систем и системный анализ : учебник для вузов / В. Н. Волкова, А. А. Денисов. – 3-е изд. – Москва : Издательство Юрайт, 2024. – 567 с. – ISBN 978-5-534-14945-6. – Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт] URL: <https://urait.ru/bcode/535470> (дата обращения: 28.01.2024).

3 **Кузьминов, А. Н.** Методология ценологического анализа социально-экономических систем : монография / А. Н. Кузьминов. – Ростов на-Дону : РГУПС, 2029. – 257 с. – ISBN 978-5-88814-250-9.

4 **Блауберг, И. В.** Системный подход // Новая философская энциклопедия / И. В. Блауберг, В. Н. Садовский, Э. Г. Юдин. – 2-е изд., испр. и допол. – Москва : Мысль, 2010. – ISBN 978-5-244-01115-9.

5 **Котлер, Ф.** Стратегический менеджмент по Котлеру. Лучшие приемы и методы / Ф. Котлер, Р. Бергер, Н. Бикхофф. – Москва : Альпина Паблицер, 2012. – 144 р. – ISBN 978-5-9614-2213-9.

References

Chebotareva, E. A. Theory and methodology of organization of transport production in port-side transport and Technological systems : monograph / E. A. Chebotareva; Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Rostov State Transport University. – Rostov-on-Don, 2020. – 213 p. – ISBN 978-5-907295-22-3.

2 **Volkova, V. N.** Theory of systems and system analysis: textbook for universities / V. N. Volkova, A. A. Denisov. – 3rd ed. – Moscow : Yurait Publishing House, 2024. – 562 p. – (Higher Education). – ISBN 978-5-534-14945-6. – Text : electronic // Yurait Educational platform [website]. – URL: <https://urait.ru/bcode/535470> (date of access: 01/28/2024).

3 **Kuzminov, A. N.** Methodology of the cenological analysis of socio-economic systems : monograph / A. N. Kuzminov. – Rostov-on-Don : RSTU, 2009. – 257 p. – ISBN 978-5-88814-250-9.

4 **Blauberg, I. V.** System approach // New Philosophical Encyclopedia / I. V. Blauberg, V. N. Sadovsky, E. G. Yudin. – 2nd ed., ispr. and additional. – Moscow : Mysl, 2010. – ISBN 978-5-244-01115-9.

5 **Kotler, P.** Strategic Management of Boiler. The best techniques and methods / P. Kotler, R. Berger, N. Bikhoff. – Moscow : Alpina Publisher, 2012. – 144 p. – ISBN 978-5-9614-2213-9.

6 **Майсак, О. С.** SWOT-анализ : объект, факторы, стратегии. Проблема поиска связей между факторами / О. С. Майсак // Прикаспийский журнал : управление и высокие технологии. – 2013. – № 1 (21). – С. 151–157. – ISSN 2074-1707.

7 **Горелова, Г. В.** Когнитивный подход к имитационному моделированию сложных систем / Г. В. Горелова // Известия ЮФУ. Технические науки. – № 3. – 2013. – С. 239–250.

8 **Нуреев, Р.** Теории развития : кейнсианские модели становления рыночной экономики / Р. Нуреев // Вопросы экономики. – 2000. – № 4. – С. 145–158.

9 **Кудрин, Б. И.** Классика технических цензов. Общая и прикладная ценология. Вып. 31. Ценологические исследования / Б. И. Кудрин. – Томск : ТГУ. – Центр системных исследований, 2006. – 220 с.

10 **Числов, О. Н.** Вариант оценки этапности развития припортовых станций на направлениях южнороссийских транспортных коридоров / О. Н. Числов, Д. С. Безусов, С. Г. Заяц // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2014. – № 2. – С. 153–163. – ISSN 1818-5509.

11 Перевозки грузов в железнодорожно-морском сообщении на Юге России / К. В. Кудряшов, В. Н. Зубков, Э. А. Мамаев, Е. А. Чеботарева // Железнодорожный транспорт. – 2019. – № 4. – С. 4–10. – ISSN 0044-4448.

12 **Мамаев, Э. А.** Перспективы цифровых технологий управления на железнодорожном транспорте / Б. И. Алибеков, Э. А. Мамаев // Транспорт : наука, образование, производство : материалы Международной научно-практической конференции «Транспорт-2021». – Ростов-Дону : РГУПС, 2021. – С. 16–20.

6 **Maysak O. S.** SWOT analysis : object, factors, strategies. The problem of finding connections between factors / O. S. Maysak // Caspian Journal : Management and High Technologies. – 2013. – No. 1 (21). – P. 151–157. – ISSN 2074-1707.

7 **Gorelova, G. V.** Cognitive approach to simulation modeling of complex systems / G. V. Gorelova // News of the Southern Federal University. Technical Sciences. – No. 3. – 2013. – P. 239–250.

8 **Nureyev, R.** Theories of development : Keynesian models of the formation of a market economy / R. Nureyev // Questions of economics. – 2000. – No. 4. – P. 145–158.

9 **Kudrin, B. I.** Classics of technical prices. General and applied cenology. Issue 31. Cenological research / B. I. Kudrin. – Tomsk : TSU. – Center for Systems Research, 2006. – 220 p.

10 **Chislov, O. N.** A variant of the assessment of the stages of development of port stations in the directions of South Russian transport corridors. / O. N. Chislov, D. S. Bezusov, S. G. Zayats // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2014. – No. 2. – P. 153–163. – ISSN 1818-5509.

11 Cargo transportation in rail-sea communication in the South of Russia / K. V. Kudryashov, V. N. Zubkov, E. A. Mamaev, E. A. Chebotareva // Railway transport. – 2019. – No. 4. – P. 4–10. – ISSN 0044-4448.

12 **Mamaev, E. A.** Prospects of digital management technologies in railway transport / B. I. Alibekov, E. A. Mamaev // Transport : science, education, production : mater. International Scientific – practical conference “Transport-2021”. – Rostov-on-Don : RSTU, 2021. – P. 16–20.

E. A. Chebotareva

A SYSTEMATIC APPROACH TO THE STUDY OF COMPLEX OBJECTS (USING THE EXAMPLE OF PORT TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL SYSTEMS)

Abstract. The paper considers the use of the portside transport and technological systems (PTTS). The study of categorical apparatus is clarified, the role of a systematic approach in the study of complex transport facilities is justified and the basic features of such an approach are formulated such as PEST, SWOT analysis and synthesis; cenological and cognitive analysis and synthesis; management in form and content corresponding to the level of complexity of the object under study. The structure of the links between them is revealed. They ensure a positive synergistic effect of joint application. The logic and meaning of complex PEST and SWOT research, the differences between PEST and SWOT analysis and PEST and SWOT synthesis of complex systems are shown. The main features of the cognitive study of PTTS are presented: the hierarchy of cognitive maps (reducing the dimensionality of tasks and increasing the visibility of research), cognitive synthesis based on blocking and/or creating positive (similarly, negative) feedbacks, impulse modeling; cenological studies: identification of structural connections of PTTS with higher-level systems assessment of the completeness and

dynamics of the development of the PTTS technocenosis, management of the development of the PTTS technocenosis.

Keywords: portside transport and technological system; system approach: analysis, synthesis, management; PEST and SWOT analyses and syntheses: cenological and cognitive analyses and syntheses, management.

For citation: Chebotareva, E. A. A systematic approach to the study of complex objects (using the example of port transport and technological systems) / E. A. Chebotareva // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 1. – P. 113–121. – DOI 10.46973/0201–727X_2024_1_113.

Сведения об авторах

Чеботарева Евгения Андреевна

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Управление эксплуатационной работой»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: abrosimova@ya.ru

Information about the authors

Chebotareva Evgeniya Andreevna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Management of Operational Work»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: abrosimova@ya.ru

О. Н. Числов, Е. Е. Мизгирева

ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСНОГО КРИТЕРИЯ ОЦЕНКИ СТРУКТУРЫ ТРАНСПОРТНОГО УЗЛА

Аннотация. В настоящее время в связи с развитием науки и техники на принципах цифровизации и интеллектуализации, усложнением и формированием новых транспортно-логистических цепей, новыми социальными и экологическими вызовами, необходимы мероприятия по обеспечению сбалансированного развития видов узлового транспорта и эффективного инфраструктурно-технологического взаимодействия. Предварительная параметризация узлового инфраструктурно-технологического взаимодействия позволяет делать выводы о принципах формирования зон, соответствиях видов транспорта и пунктов узлового взаимодействия, а также местах их размещения. Для разработки комплексного динамического критерия оценки узловой структуры проводится сравнительный анализ показателей в зависимости от степени их воздействия на структуру узла по критериям теории принятия решений. При развитии транспортного узла и изменения количественных и качественных параметров узловых зон применимы методы кластерного анализа, позволяющие оценивать объекты внутри одной зоны (кластера) и выявлять скрытые структуры в наборе данных, определять группы объектов, их схожесть и различия. Структурировать группы данных предлагается коэффициентом дивергенции.

Ключевые слова: транспортный узел, классификация транспортных узлов, узловые зоны, компоновочные решения, кластерный анализ, коэффициент дивергенции, теория принятия решений.

Для цитирования: Числов, О. Н. Принципы формирования комплексного критерия оценки структуры транспортного узла / О. Н. Числов, Е. Е. Мизгирева // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1. – С. 122–131. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_122.

Введение

Транспортный узел – это центр многокомпонентной мультимодальной системы логистически взаимодействующих видов транспорта, расположенной в пределах крупных городских агломераций и центров промышленного производства [1]. В настоящее время в условиях цифровизации и интеллектуализации транспортных процессов, перераспределения логистических схем доставки грузов и пассажиров появляются новые разнообразные функции и задачи транспортных узлов, возрастает сложность их структуры, усиливаются технологические связи. Это требует развития критериев оценки узловых структур на новых принципах эффективности.

Основная часть

Известно, что юг России обладает мощным транспортным комплексом, основывающимся на сложной интегрированной системе транспортно-производственных технологий, тесно связанной с экономикой страны. Транспортные узлы юга России обеспечивают выход на транспортные коммуникации стран Черноморского и Прикаспийского регионов, то есть являются приоритетными для экспортно-импортных перевозок. Кроме того, рассматриваемый регион является производителем широкой номенклатуры товаров и важным рекреационным районом страны. Специфические экономико-географические условия и исторические особенности развития наделяют транспортные узлы данного региона уникальными инфраструктурными характеристиками. Например, многие транспортные узлы возникли с введением в эксплуатацию железнодорожных станций при строительстве Владикавказской железной дороги [2], что проявляется в отсутствии в их составе водного транспорта и морских портов (узлы «ТХ», «МВ», «ВЛ», «М» и др.). Такие узлы также обладают относительно небольшой площадью и слабо развитой сетью городского транспорта. Ещё одним специфичным историческим «поводом» для основания транспортного узла является строительство Волго-Донского судоходного канала в 1952 году (узел «ВД»). Крупные узлы («Р», «СЧ», «К», «В») представлены практически всеми видами магистрального и городского транспорта, имеют прямой выход к морю или крупной реке, а также большое

количество предприятий производственной сферы и развитую рекреационную базу. Узлы, имеющие в своём составе морские порты Азово-Черноморского бассейна («ТГ», «НВ», «Т» и др.), обладают мощной производственно-транспортно-складской зоной, являющейся одновременно центром притяжения основных видов транспорта, но зачастую находятся в стесненных условиях, препятствующих дальнейшему развитию.

Исследования [3–4] показывают, что между узловыми видами транспорта общего пользования юга России имеются диспропорции в уровне развития, что может обуславливать так называемый «разрыв» транспортной цепи, отрицательно влияющий на транспортный процесс [5].

Инфраструктурно-технологическая характеристика основных транспортных узлов южного региона представлена в табл. 1.

Таблица 1

Инфраструктурно-технологические характеристики транспортных узлов юга России

Транспортный узел	Площадь, S, км ²	Население, N, тыс чел.	Количество видов магистрального транспорта	Количество видов городского транспорта	Протяженность узловых автодорог зоны, L _а , км	Протяженность узловых ж.-д. путей зоны, L _ж , км	Протяженность водных путей зон, L _в , км	Стоимость 10 ⁴ м ² земли, тыс руб.	Площадь узловой производств.-заводской зоны узла (ПЗЗ), км ²	Площадь транспортно-складской зоны узла (ТСЗ), км ²	Площадь селитебной зоны узла (СЗ), км ²	Площадь защитной зоны узла (ЗЗ), км ²	Стоимость перевозок т(пасс)-км, руб.
«А»	208	524	4	1	168,2	78,6	31,2	108	14,2	3,9	167	1,2	224
«В»	859	1005	4	5	201,3	147,6	61,6	85	18,1	6,9	580	5,2	339
«К»	294	1107	4	4	133	79,2	36,3	377	12,6	7,1	227	6,9	363
«Р»	248	1138	4	5	134,9	83,4	26,9	467	22	4,4	257	21,1	326
«М»	468	604	4	1	97,1	39,6	–	615	10,1	2,1	109	2,4	220
«МВ»	51,5	72	3	1	68,5	27,9	–	141	4,3	3,8	36,2	1	219
«НВ»	86,5	277	3	3	84,1	28,7	–	380	9,5	3,9	63,1	3,3	293
«С»	171	458	3	2	84,9	27,9	–	597	3,2	0,8	121	16,7	256
«СЧ»	97,2	564	4	4	89,3	61,5	–	980	1,6	4,8	62,5	11	728
«ТХ»	46	55	2	1	66	29,6	–	76	3,2	1,1	33,8	2	221
«Т»	33,4	61	3	1	34,5	17,9	–	550	3,3	2	22,9	2	229
«МЗ»	17,5	41	2	2	54,3	25,1	–	232	2,8	3,2	10,5	1	234
«Д»	69,6	125	2	2	41,4	18,7	–	169	1,2	0,3	46,8	1,3	219
«ТГ»	80	245	3	5	73,3	32,1	–	400	11,2	6	54,8	2	282
«Н»	67	247	3	1	57,6	16,1	–	125	1,8	1,1	49,7	2	206
«ВЛ»	291	296	3	1	49,4	11,1	–	520	6,6	1,8	16,9	3,6	206
«ВД»	182	168	4	3	62,3	42,1	26,4	183	10,7	2,7	126	1	247

Следует отметить, что существующая классификация транспортных узлов по признакам экономико-географического положения, характеру эксплуатационной работы, количеству взаимодействующих видов транспорта, геометрической форме, взаимном расположении транспортных объектов, набору выполняемых функций, специализации, является устаревшей [6]. С учетом новых технологических процессов предлагается расширить классификацию и дополнить её такими признаками, как уровень логистического сервиса, агломерационно-экономическая роль, степень развития промышленного производства, тип центра скрещения транспорта, степень цифровизации транспортных процессов и степень вовлеченности в международное транспортное производство [7].

Для разработки комплексного динамического критерия оценки узловой структуры необходим сравнительный анализ показателей в зависимости от степени их воздействия (положительного или отрицательного) на структуру узла по критериям теории принятия решений:

1 Критерий Лапласа (выбирается та стратегия, которая даёт максимальное ожидаемое значение):

$K_{\text{опт}} = \max_{1 \leq i \leq m} \left(\frac{1}{n} \right) \sum_{j=1}^n a_{ij}$, где a_{ij} – значение параметра j для i -го транспортного узла.

2 Критерий минимакса (выбирается такая стратегия, при которой максимальный проигрыш будет минимальным): $K_{\text{опт}} = \max_i (\max_j \Delta a_{ij})$, где Δa_{ij} – разница между минимальными и максимальными a_{ij} по j -му параметру.

3 Критерий Сэвиджа (выбирается такая стратегия, при которой минимизируется максимальный риск): $K_{\text{опт}} = \min_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq j \leq n} r_{ij}$, $r_{ij} = \max_{1 \leq i \leq m} a_j - a_{ij}$, где r_{ij} – соответствующее значение в матрице сожалений.

4 Критерий Гурвица (выбирается такая комбинация, которая даёт максимальный результат с учётом этих двух исходов): $K_{\text{опт}} = \max_{1 \leq i \leq m} [\alpha \max_{1 \leq i \leq n} a_{ij} + (1 - \alpha) \min_{1 \leq i \leq n} a_{ij}]$.

5 Критерий Ходжа – Лемана (учитывает как максимальный проигрыш, так и худший и лучший исходы): $K_{\text{опт}} = \max_i [v \sum_{j=1}^n e_{ij} q_i + (1 - v) \min_j e_{ir}]$, $0 \leq v \leq 1$, где e_{ij} – матрица решений дополняется столбцом, составленным из средних взвешенных (с весом $v = \text{const}$) математических ожиданий и q_i наименьшего результата каждой строки.

Значение итогового критерия определим по формуле:

$$R = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (K_{\text{опт } i} \cdot 1/p),$$

где K – число критериев, $K_{\text{опт } i}$ – оптимальное решение по i -критерию, p – значение приоритета ($p \in (1; N)$, где N – количество рассматриваемых узлов).

На основе табл. 1 произведём расчет критериев принятия решений, используя программную среду MS Excel. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значение критерия оценки узла

ТУ	Критерий Лапласа	Критерий минимакса	Критерий Сэвиджа	Критерий Гурвица	Критерий Ходжа – Лемана	Баллы
«СЧ»	76,3	38,8	50,7	47,2	91,4	60,88
«В»	77,8	56,2	32,1	49,5	80,3	59,18
«Р»	72,1	51,8	46,9	50,3	66,8	57,58
«М»	64,4	35,1	46,4	56	83,6	57,1
«К»	67,7	48,5	49,4	48,6	62,6	55,36
«С»	61,7	6,3	49,3	52,2	78,1	49,52
«ВЛ»	52,8	27,9	51,7	40,9	60,8	46,82
«НВ»	48,2	43,1	48,5	34,3	54,7	45,76
«ТГ»	43	39,9	36,6	38,8	49,8	41,62
«А»	58,1	31,1	44,6	45,4	10,7	37,98
«Г»	32,8	21,3	16,5	49,2	43,3	32,62
«Н»	27,8	18,2	41	31,5	38,8	31,46
«ВД»	38,3	24,5	29,2	26,2	5,5	24,74
«МВ»	16,8	15,1	21,8	10,6	26,6	18,18
«Д»	22,3	3	25,9	5,3	34	18,1
«МЗ»	11,2	12	5,6	21,1	22	14,38
«ТХ»	5,7	9	11,1	15,9	16,3	11,6
n=	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	

Предлагаемая перспективная балльная классификационная система узлов включает в себя I, II, III, IV и V классы, в которых общесистемный класс узла K^* включает множество показателей подклассов $K^* = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}$. Балльный R-критерий узла каждого класса включает по 20 баллов (табл. 3) [8].

Таблица 3

Перспективная балльная классификация транспортных узлов

Класс	Наименование	Балльный R-критерий узла
I	Крупнейшие ТУ	81 <
II	Крупные ТУ	61–80
III	Большие ТУ	41–60
IV	Средние ТУ	21–40
V	Малые ТУ	1–20

Проблематика компоновочных решений железнодорожных и транспортных узлов представляет собой сложную, многогранную задачу [9–12] с глубокими историческими корнями. Выбор вида транспорта, используемого внутри узла, в значительной степени диктуется типом внешнего транспорта, планом распределения грузо- и пассажироперевозок в пределах узла, а также размещением инфраструктурных элементов транспортной системы с позиции блочно-модульного проектирования и зонирования территории (промышленно-заводская, транспортно-складская, санитарно-защитная, селитебная, рекреационная зоны) (рис. 1).

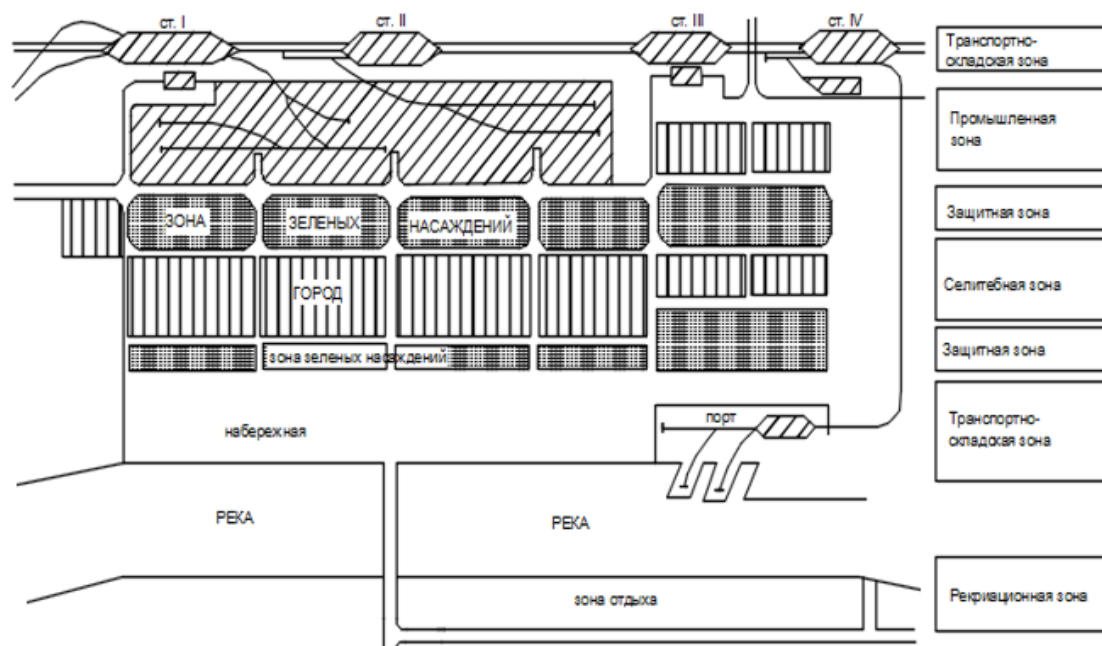


Рис. 1. Зонная компоновка транспортного узла

Исследуя вопрос позиционирования узловых объектов и моделирования взаимодействия транспорта, важную роль играет сбалансированное развитие узла и решение проблемы обеспечения необходимой инфраструктурой, а также транспортными коммуникациями. Результат рациональной компоновки узловых объектов – это эффективное и беспрепятственное продвижение грузо- и пассажиропотоков между производственно-транспортно-складскими, селитебными и рекреационными зонами, что подразумевает решение множества задач, включая рациональное количество пользователей инфраструктуры, выбор маршрута и параметров цепей поставок и т. д.

Транспортный узел включает в себя автомобильный, железнодорожный, водный, городской, трубопроводный, промышленный и другие виды транспорта. Работа данных видов транспорта направлена не только на обеспечение производственной деятельности промышленного комплекса, но и на обслуживание

населения. Следует отметить, что существует особая категория узлов, которые расположены на направлениях транспортных коридоров со значительной транзитной составляющей логистических цепей поставок, транспортно-складской работой, «сухими» портами, логопарками и др.

На примере транспортного узла «Р» рассмотрим принцип оценки пропускных способностей инфраструктуры для существующего варианта компоновки узловых объектов. На рис. 2 показаны точки входа-выхода узловых грузо- и пассажиропотоков с укрупненной сетью путей сообщений по видам транспорта. Территория узла разделена на районы: 1 – район «Север», 2 – район «Восток», 3 – район «Запад», 4 – район «Центр». Области, заштрихованные черными линиями, представляют собой промышленные зоны, а заштрихованные зелеными линиями – рекреационные зоны. Для каждого района определены и показаны центры транспортных нагрузок (ЦТН), найденные по методу центра тяжести. Кружками показаны: $R_{авт}^i(N)$, $R_{авт}^i(S)$, $R_{авт}^i(E)$ – точки входа-выхода узловых грузо- и пассажиропотоков автомобильного транспорта; $R_{жд}^i(W)$, $R_{жд}^i(S)$, $R_{жд}^i(E)$ – точки входа-выхода узловых грузо- и пассажиропотоков железнодорожного транспорта; $R_{вод}^i(W)$, $R_{вод}^i(E)$ – точки входа-выхода узловых грузо- и пассажиропотоков водного транспорта (N, S, W, E – стороны света).

Полученная транспортная сеть узла представляет из себя разновидность плоского графа, «вес» дуг которого – это расстояния перевозок в км, определенные по методу манхэттенских расстояний (табл. 4).

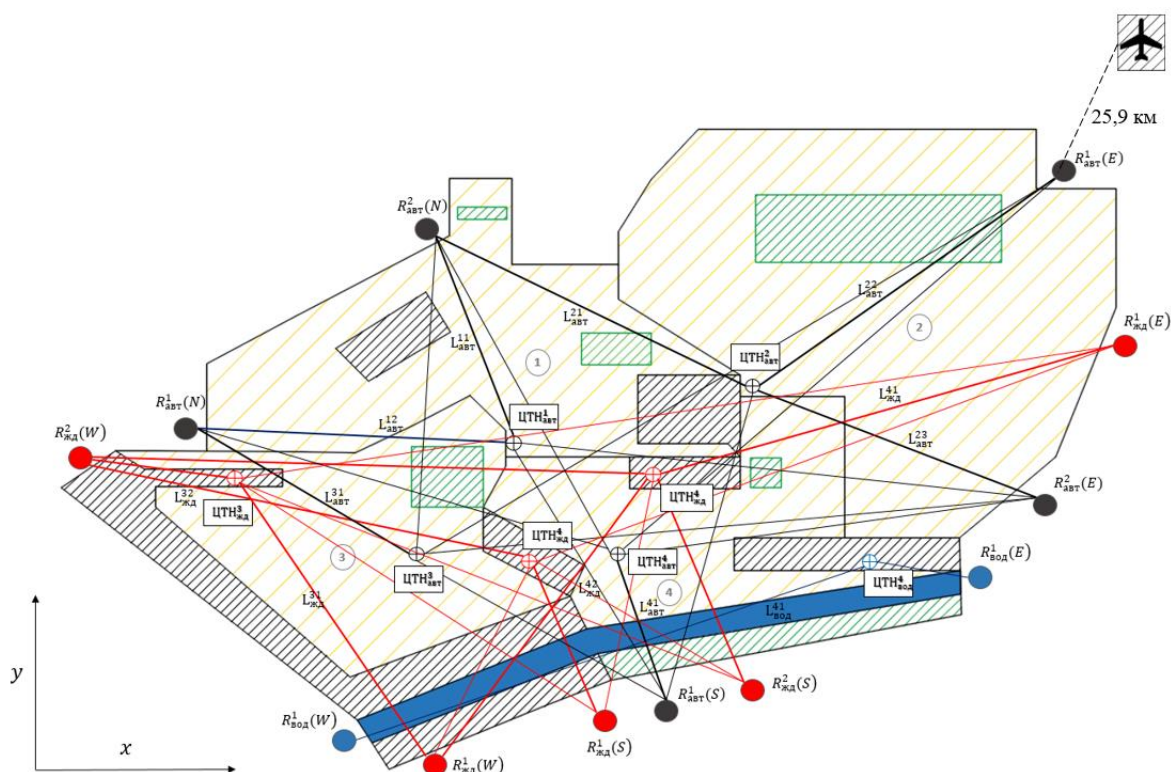


Рис. 2. Расчетная схема компоновки инфраструктурных объектов узла «Р» с точками входа-выхода грузо- и пассажиропотока и укрупненной сетью путей сообщений по видам транспорта

Таблица 4

Манхэттенские расстояния графа транспортной сети узла «Р», км

А) автомобильный транспорт (точки входа – центры районов);

	ЦТН _{авт} ¹	ЦТН _{авт} ²	ЦТН _{авт} ³	ЦТН _{авт} ⁴
$R_{авт}^1(N)$	8,9	18,4	7,3	12,3
$R_{авт}^2(N)$	10,1	16,7	16,3	12,9
$R_{авт}^1(E)$	14,3	7,3	19,9	13,4
$R_{авт}^2(E)$	15,4	7,5	20,2	12,5
$R_{авт}^1(S)$	7,1	10,8	12,4	3,4

Б) автомобильный транспорт (центры районов – центры районов);

	ЦТН _{авт} ¹	ЦТН _{авт} ²	ЦТН _{авт} ³	ЦТН _{авт} ⁴
ЦТН _{авт} ¹	–	9,3	6,3	4,3
ЦТН _{авт} ²	9,3	–	14,6	9,8
ЦТН _{авт} ³	6,3	14,6	–	8,3
ЦТН _{авт} ⁴	4,3	9,8	8,3	–

В) железнодорожный транспорт (точки входа – центры районов);

	ЦТН _{жд} ³	ЦТН _{жд} ⁴¹	ЦТН _{жд} ⁴²
$R_{жд}^1(W)$	15,8	26,6	30,4
$R_{жд}^2(W)$	7,3	18,5	22,1
$R_{жд}^1(E)$	22,8	17,6	8,1
$R_{жд}^1(S)$	13,7	2,2	11,8
$R_{жд}^2(S)$	25,7	20,4	11,1

Г) железнодорожный транспорт (центры районов – центры районов);

	ЦТН _{жд} ³	ЦТН _{жд} ⁴¹	ЦТН _{жд} ⁴²
ЦТН _{жд} ³	–	11,0	14,7
ЦТН _{жд} ⁴¹	11,0	–	9,3
ЦТН _{жд} ⁴²	14,7	9,3	–

Д) водный транспорт: $R_{водн}^1(W) \leftrightarrow ЦТН_{водн}^4 = 11,7$ км, $R_{водн}^1(E) \leftrightarrow ЦТН_{водн}^4 = 9,1$ км, $R_{водн}^1(W) \leftrightarrow R_{водн}^1(E) = 20,9$ км.

Решается многокритериальная задача: с одной стороны, необходимо наиболее рациональным образом на заданной территории разместить зоны (объекты) транспортного узла (экономико-математическая часть задачи), а с другой стороны необходимо обеспечить максимальные пропускные способности транспортной инфраструктуры с учетом особенностей внутриузлового взаимодействия зон (методы теории принятия решений, теории систем и кластерного анализа).

Постановка задачи: на заданной территории необходимо наиболее рациональным образом разместить зоны узла так, чтобы сумма транспортных расходов была минимальна, соблюдались общесистемные требования, применяемые к компоновочным решениям (экологические требования, градостроительные требования, транспортная безопасность и доступность).

$$P(L) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^p (C_{ijk}^{жд} \cdot A^T \{L^*(CD)\}_{ijk}^{жд} \cdot Q_{ijk}^{жд} + C_{ijk}^{авт} \cdot A^T \{L^*(CD)\}_{ijk}^{авт} \cdot Q_{ijk}^{авт} + C_{ijk}^{вод} \cdot A^T \{L^*(CD)\}_{ijk}^{вод} \cdot Q_{ijk}^{вод} + C_{ijk}^{\Gamma T} \cdot A^T \{L^*(CD)\}_{ijk}^{\Gamma T} \cdot a_{ijk}^{\Gamma T} + \dots) \rightarrow \min,$$

где C – стоимость перевозки, руб./т-км (руб./пасс-км); Q – объем перевозок i -й зоны узла, т; a – объем перевезенных пассажиров i -зоны узла, пасс.; $A^T \{L^*(CD)\}$ – транспонированная матрица модифицированных расстояний перевозки видов транспорта с учетом коэффициента дивергенции зоны узла при кластеризации территории, занимаемой объектами узла.

Исходные данные задачи:

1 Матрица площадей зон, км²:

$$S = \begin{pmatrix} S_{общ}^1 & S_{общ}^2 & S_{общ}^3 & S_{общ}^4 \\ S_{33}^1 & S_{33}^2 & S_{33}^3 & S_{33}^4 \\ S_{ПЗЗ}^1 & S_{ПЗЗ}^2 & S_{ПЗЗ}^3 & S_{ПЗЗ}^4 \\ S_{ТСЗ}^1 & S_{ТСЗ}^2 & S_{ТСЗ}^3 & S_{ТСЗ}^4 \\ S_{СЗ}^1 & S_{СЗ}^2 & S_{СЗ}^3 & S_{СЗ}^4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 69,3 & 117,7 & 114,7 & 46,3 \\ 2,04 & 6,35 & 2,82 & 9,86 \\ 8,02 & 0 & 12,06 & 1,92 \\ 1,6 & 0 & 2,41 & 0,38 \\ 48,9 & 94,6 & 82,8 & 30,73 \end{pmatrix}.$$

2 Матрица стоимостей земли, млрд руб.:

$$C = \begin{pmatrix} C_{\text{общ}}^1 & C_{\text{общ}}^2 & C_{\text{общ}}^3 & C_{\text{общ}}^4 \\ C_{33}^1 & C_{33}^2 & C_{33}^3 & C_{33}^4 \\ C_{\text{ПЗЗ}}^1 & C_{\text{ПЗЗ}}^2 & C_{\text{ПЗЗ}}^3 & C_{\text{ПЗЗ}}^4 \\ C_{\text{ТСЗ}}^1 & C_{\text{ТСЗ}}^2 & C_{\text{ТСЗ}}^3 & C_{\text{ТСЗ}}^4 \\ C_{\text{СЗ}}^1 & C_{\text{СЗ}}^2 & C_{\text{СЗ}}^3 & C_{\text{СЗ}}^4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 395,01 & 602,62 & 822,4 & 507,91 \\ 11,63 & 32,51 & 20,22 & 108,16 \\ 45,71 & 0 & 86,47 & 21,01 \\ 9,12 & 0 & 17,28 & 4,17 \\ 278,73 & 484,35 & 593,68 & 337,12 \end{pmatrix}.$$

3 Внесем в расчетную схему варианта компоновки узловых объектов с точками входа-выхода грузо- и пассажиропотока и укрупненной сетью путей сообщений по видам транспорта в координатную плоскость и определим координаты точек входа-выхода и ЦТН (табл. 5).

Таблица 5

Координаты точек входа-выхода грузо- и пассажиропотока

Точки	$R_{\text{авт}}^1(N)$	$R_{\text{авт}}^2(N)$	$R_{\text{авт}}^1(E)$	$R_{\text{авт}}^2(E)$	$R_{\text{авт}}^1(S)$	$R_{\text{жд}}^1(W)$	$R_{\text{жд}}^2(W)$	$R_{\text{жд}}^1(E)$	$R_{\text{жд}}^1(S)$	$R_{\text{жд}}^2(S)$
X	37,4	103,9	281,2	275,9	170,9	106,6	7,7	298,1	153,4	194,9
Y	98,4	154,4	170,3	77,4	20,1	5,2	90,6	121,4	17,4	25,7
Точки	$R_{\text{водн}}^1(M)$	$R_{\text{водн}}^1(E)$	$\text{ЦТН}_{\text{авт}}^1$	$\text{ЦТН}_{\text{авт}}^2$	$\text{ЦТН}_{\text{авт}}^3$	$\text{ЦТН}_{\text{авт}}^4$	$\text{ЦТН}_{\text{жд}}^3$	$\text{ЦТН}_{\text{жд}}^{41}$	$\text{ЦТН}_{\text{жд}}^{42}$	$\text{ЦТН}_{\text{водн}}^4$
X	81,3	258,1	127,9	194,7	101,0	157,2	51,0	132,6	166,9	227,1
Y	12,2	57,1	94,6	110,1	63,2	63,4	84,8	61,7	85,6	61,4

При развитии транспортного узла и изменения количественных и качественных параметров узловых зон применимы методы кластерного анализа, позволяющие оценивать объекты внутри одной зоны (кластера) и выявлять скрытые структуры в наборе данных, определять группы объектов, их схожесть и различия.

Кластерный анализ – это метод обработки данных, который позволяет классифицировать объекты или наблюдения в группы, называемые кластерами. Основная идея кластерного анализа заключается в том, что объекты внутри одного кластера должны быть более похожими друг на друга, чем на объекты из других кластеров. Структурировать группы данных предлагается коэффициентом дивергенции.

Коэффициент дивергенции (1) используется в кластерном анализе для измерения расстояния между кластерами или точками в многомерном пространстве. Он показывает, насколько далеко друг от друга находятся точки кластера, и помогает определить, являются ли они частью одного и того же кластера или нет. В кластерном анализе коэффициент дивергенции обычно используется вместе с другими методами, такими как метод k -средних или иерархическая кластеризация, для определения оптимального количества кластеров и их границ [13]. Чем меньше значение CD, тем однороднее система (кластер).

$$CD = \frac{1}{p} \left\{ \sum_{k=1}^p \left(\frac{x_{ki} - x_{kj}}{x_{ki} + x_{kj}} \right)^2 \right\}^{1/2}. \quad (1)$$

Рассчитаем коэффициент дивергенции для матрицы площадей зон узла «Р». Получим, что коэффициенты дивергенции для площадей зон одной категории внутри транспортного узла равны: $CD^{\text{общ}} = 0,269$; $CD^{33} = 0,404$; $CD^{\text{ПЗЗ}} = 0,777$; $CD^{\text{ТСЗ}} = 0,778$; $CD^{\text{СЗ}} = 0,309$, а для площадей зон различных категорий внутри районов – $CD^{\text{север}} = 0,675$; $CD^{\text{восток}} = 0,831$; $CD^{\text{запад}} = 0,685$; $CD^{\text{центр}} = 0,766$.

Рассчитаем коэффициент дивергенции для координат точек R входа-выхода грузо- и пассажиропотоков (табл. 5). В результате получим:

$$CD(R) = \frac{1}{p} \left\{ \sum_{k=1}^p \left(\frac{x_{ki} - x_{kj}}{x_{ki} + x_{kj}} \right)^2 \right\}^{1/2} = \frac{1}{20} \left\{ \sum_{k=1}^{20} \left(\frac{x_{ki} - x_{kj}}{x_{ki} + x_{kj}} \right)^2 \right\}^{1/2} = 0,123365.$$

Выполним перемещение ЦТН зон узла так, чтобы они находились примерно на равных расстояниях относительно точек входа-выхода грузо- и пассажиропотоком и других ЦТН. Таким образом, переместим $\text{ЦТН}_{\text{авт}}^1$ на координаты (134,2; 137,6), $\text{ЦТН}_{\text{авт}}^2$ – (234,7; 137,6), $\text{ЦТН}_{\text{авт}}^3$ – (70,3; 56,1), $\text{ЦТН}_{\text{авт}}^4$ – (189,9;

67,8), ЦТН_{жд}³ – (66,7; 90,1), ЦТН_{жд}⁴¹ – (125,8; 78,7), ЦТН_{жд}⁴² – (189,7; 107,3), ЦТН_{вод}⁴ – (220,4; 69,6). Получим $CD = 0,120986$. Разница равна $-0,002379$. То есть система стала более однородной (на 2 %).

Выполним перемещение ЦТН так, чтобы они располагались преимущественно в одной зоне транспортного узла. Таким образом, переместим ЦТН_{авт}¹ на координаты (145,6; 82,3), ЦТН_{авт}² – (193,9; 86,8), ЦТН_{авт}³ – (142,0; 51,2), ЦТН_{авт}⁴ – (161,3; 50,0), ЦТН_{жд}³ – (86,3; 65,1), ЦТН_{жд}⁴¹ – (153,5; 54,6), ЦТН_{жд}⁴² – (162,8; 73,2), ЦТН_{вод}⁴ – (180,6; 39,5). Получим $CD = 0,129047$. Разница равна $+0,005682$. То есть система стала менее однородной.

Определим координаты основных промышленных зон на схеме узла «Р» (рис. 2). Выполнив перерасчет коэффициента дивергенции, получим:

$$CD(\text{ЦТН}) = \frac{1}{p} \left\{ \sum_{k=1}^p \left(\frac{x_{ki} - x_{kj}}{x_{ki} + x_{kj}} \right)^2 \right\}^{1/2} = \frac{1}{48} \left\{ \sum_{k=1}^{48} \left(\frac{x_{ki} - x_{kj}}{x_{ki} + x_{kj}} \right)^2 \right\}^{1/2} = 0,074282.$$

Если переместить промышленную зону «6» на $+66,3$ р. е. (расчетные единицы по координатной сетке узла) по оси абсцисс и на $+40,4$ р. е. по оси ординат, то это снизит нагрузку на район «Центр». Получим $CD = 0,074208$. Разница равна $-0,000074$. Значит, система стала более однородной, и нагрузка на «Центр» незначительно снизилась (на 0,1 %).

Выполним объединение зон «5» и «6», тогда в (1) значение $p = 43$. Получим $CD = 0,081408$. Разница составила $+0,007126$. Значит, система организована менее рационально.

Заключение

Таким образом, многофакторная оценка структуры транспортного узла на основе комплексного применения экономико-математических методов, теории принятия решений и кластерного анализа позволяет делать выводы о степени эффективности компоновочных решений узловой инфраструктуры и ее пропускных способностей. Определение значений коэффициентов дивергенции для районов и зон транспортного узла позволит делать предварительную оценку их транспортно-технологического взаимодействия и степени изменения занимаемых площадей, в том числе перспективного развития параметров зон вследствие реконструкции узла. Несомненно, представленный научный подход требует дальнейшего углубленного изучения зависимостей изменения коэффициентов CD от разработанного балльного рейтинга транспортного узла по существующим примерам многовариантных компоновочных решений, учитывающим в том числе и противоречивые факторы развития.

Список литературы

- 1 **Числов, О. Н.** О вопросе формирования определения транспортного узла / О. Н. Числов, Е. Е. Мизгирева // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2023. – № 2 (35). – С. 91–98. – ISSN 2415-8658.
- 2 **Сидоренко, В. Т.** Путешествие в историю Северо-Кавказской железной дороги, 1860–1920 // В. Т. Сидоренко. – Ростов-на-Дону : Омега-Принт, 2007. – 327 с. – ISBN 978-5-91575-990-1.
- 3 **Бакалов, М. В.** Ресурсоориентированное развитие транспортной системы южного региона : специальность 05.22.01 «Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Бакалов Максим Владимирович ; Ростовский государственный университет путей сообщения. – Ростов-на-Дону, 2020. – 24 с.

References

- 1 **Chislov, O. N.** On the issue of forming the definition of a transport hub / O. N. Chislov, E. E. Mizgireva // Transport of the Asia-Pacific region. – 2023. – No. 2 (35). – P. 91–98. – ISSN 2415-8658.
- 2 **Sidorenko, V. T.** Journey into the history of the North Caucasian Railway, 1860–1920 // V. T. Sidorenko. – Rostov-on-Don : Omega-Print, 2007. – 327 p. – ISBN 978-5-91575-990-1.
- 3 **Bakalov, M. V.** Resource-oriented development of the transport system of the southern region : abstract of the dissertation of the candidate of technical sciences : specialization 05.22.01 «Transport and transport-technological systems of the country, its regions and cities, organization of production in transport» / Bakalov Maxim Vladimirovich ; RSTU. – Rostov-on-Don, 2020. – 24 p.

4 **Мамаев, Э. А.** Формирование внутренней и внешней среды транспортной системы южного региона / Э. А. Мамаев, М. В. Колесников, М. В. Бакалов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 3 (75). – С. 118–127. – ISSN 0201–727X.

5 **Гагарина, Л. Г.** Взаимодействие транспорта и региональных структур. Экономико-географический аспект : учебное пособие / Л. Г. Гагарина, Н. О. Михаленок // Москва : УМЦ по образованию на ЖДТ, 2007. – 184 с. – ISBN 978-5-89035-450-1.

6 Железнодорожные станции и узлы (задачи, примеры, расчеты) : учебное пособие / Н. В. Правдин, Ю. И. Ефименко, А. И. Головнич, Е. В. Архангельский ; под редакцией Н. В. Правдина и С. П. Вакуленко. – 5-е изд., испр. и доп. – Москва : УМЦ по образованию на ЖДТ, 2015. – 649 с. – ISBN 978-5-89035-826-4.

7 **Числов, О. Н.** К вопросу моделирования инфраструктурно-технологического взаимодействия в транспортных узлах / О. Н. Числов, Е. Е. Мизгирева // Вестник транспорта Поволжья. – 2023. – № 3 (99). – С. 86–91. – ISSN 1997-0722.

8 **Хан, В. В.** Развитие методов определения рациональных структур и организации транспортно-технологических процессов железнодорожных узлов : специальность 05.22.01 «Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Хан Владимир Васильевич ; Ростовский государственный университет путей сообщения. – Ростов на-Дону, 2017. – 23 с.

9 **Хашев, А. И.** Комбинированное имитационно-аналитическое моделирование в транспортно-логистических системах / А. И. Хашев, Э. А. Мамаев, А. Н. Гуда // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 1 (85). – С. 117–125. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_1_117.

10 **Зубков, В. Н.** Совершенствование технико-технологической модели управления перевозочным процессом / В. Н. Зубков, А. Г. Черняев, Е. А. Чеботарева // Железнодорожный транспорт. – 2023. – № 12. – С. 10–14. – ISSN 0044-4448.

11 **Числов, О. Н.** Комплексные методы рационального размещения элементов транспортно-

4 **Mamaev, E. A.** Formation of the internal and external environment of the transport system of the southern region / E. A. Mamaev, M. V. Kolesnikov, M. V. Bakalov // Vestnik rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. – 2019. – No. 3 (75). – P. 118–127. – ISSN 0201–727X.

5 **Gagarina, L. G.** Interaction of transport and regional structures. The economic and geographical aspect: s textbook / L. G. Gagarina, N. O. Mikhalenok // Moscow : UMTS for education on Railway, 2007. – 184 p. – ISBN 978-5-89035-450-1.

6 Railway stations and nodes (problems, examples, calculations) : textbook / N. V. Pravdin, Yu. I. Efimenko, A. I. Golovnich, E. V. Arkhangel'sky ; edited by N. V. Pravdin and S. P. Vaku lenko. – 5th ed., rev. and additional – Moscow : UMC for Education on Railway Transport, 2015. – 649 p. – ISBN 978-5-89035-826-4.

7 **Chislov, O. N.** On the issue of modeling infrastructural and technological interaction in transport hubs / O. N. Chislov, E. E. Mizgireva // Bulletin of transport of the Volga region. – 2023. – No. 3 (99). – P. 86–91. – ISSN 1997-0722.

8 **Khan, V. V.** Development of methods for determining rational structures and organization of transport and technological processes of railway junctions : specialization 05.22.01 «Transport and transport-technological systems of the country, its regions and cities, organization of production in transport»: abstract of the dissertation of the Candidate of Technical Sciences : 05.22.01 / Khan Vladimir Vasilievich; RSTU – Rostov on-Don : 2017. – 23 p.

9 **Khashev, A. I.** Combined simulation and analytical modeling in transport and logistics systems / A. I. Khashev, E. A. Mamaev, A. N. Guda // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2022. – No. 1 (85). – P. 117–125. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_1_117.

10 **Zubkov, V. N.** Improvement of the technical and technological model of transportation process management / V. N. Zubkov, A. G. Chernyaev, E. A. Chebotareva // Railway transport. – 2023. – No. 12. – P. 10–14. – ISSN 0044-4448.

11 **Chislov, O. N.** Complex methods of rational placement of elements of transport and technological

технологических систем в железнодорожных узлах : монография // Ростов на-Дону : РГУПС, 2009. – 294 с. – ISBN 978-5-88814-234-9.

12 **Король, Р. Г.** Проектирование динамической имитационной модели мультимодальной транспортно-логистической системы Дальнего Востока / Р. Г. Король, А. С. Акельев // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2023. – № 4 (37). – С. 43–50. – ISSN 2415-8658.

13 **Дюран, Б.** Кластерный анализ : перевод с английского / Б. Дюран, П. Оддел ; под редакцией А. Я. Боярского. – Москва : Статистика, 1977. – 128 с.

systems in railway junctions: monograph // Rostov on-Don : RSTU, 2009. – 294 p. – ISBN 978-5-88814-234-9.

12 **Korol, R. G.** Designing a dynamic simulation model of a multimodal transport and logistics system of the Far East / R. G. Korol, A. S. Akelyev // Transport of the Asia-Pacific region. – 2023. – No. 4 (37). – P. 43–50. – ISSN 2415-8658.

13 **Duran, B.** cluster analysis / B. Duran, P. Odell // Trans. from the English E. Z. Demidenko. Edited by A. Ya. Boyarsky. – Moscow : Statistics, 1977. – 128 p.

O. N. Chislov, E. E. Mizgireva

PRINCIPLES OF FORMING A COMPREHENSIVE CRITERION FOR EVALUATING THE STRUCTURE OF TRANSPORT HUB

Abstract. Currently, due to the development of science and technology based on the principles of digitalization and intellectualization, the complication and formation of new transport and logistics chains, new environmental and social challenges, measures are needed to ensure the balanced development of types of hub transport and effective infrastructural and technological interaction. Preliminary parameterization of nodal infrastructural and technological interaction allows us to draw conclusions about the principles of zone formation, the correspondence of modes of transport and points of nodal interaction, as well as their locations. To develop a comprehensive dynamic criterion for evaluating the nodal structure, a comparative analysis of indicators is carried out depending on the degree of their impact on the structure of the node according to the criteria of decision theory. With the development of a transport hub and changes in the quantitative and qualitative parameters of nodal zones, cluster analysis methods are used to evaluate objects within one.

Keywords: transport hub, classification of transport hubs, hub's zones, layout solutions, cluster analysis, divergence coefficient, decision theory.

For citation: Chislov, O. N. Principles of forming a comprehensive criterion for evaluating the structure of transport hub / O. N. Chislov, E. E. Mizgireva // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 1. – P. 122–131. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_122.

Сведения об авторах

Числов Олег Николаевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), кафедра «Станции и грузовая работа», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, E-mail: o_chislov@mail.ru

Мизгирева Екатерина Евгеньевна

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), кафедра «Станции и грузовая работа», аспирант, E-mail: BrutalD@yandex.ru

Information about the authors

Chislov Oleg Nikolayevich

Rostov State Transport University (RSTU), Chair «Stations and Cargo Work», Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of The Chair, E-mail: o_chislov@mail.ru

Mizgireva Ekaterina Evgenievna

Rostov State Transport University (RSTU), Chair «Stations and Cargo Work», Postgraduate Student, E-mail: BrutalD@yandex.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

УДК 629.4.066 : 004.04 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_132

*Д. Н. Карасев, А. В. Костюков, С. В. Соколов, И. В. Решетникова***АППАРАТНОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СТОХАСТИЧЕСКОЙ РОБАСТНОЙ ДИСКРЕТНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В БОРТОВЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ЛОКОМОТИВОВ**

Аннотация. На сегодняшний день оценка дискретных нелинейных стохастических систем в подавляющем большинстве случаев осуществляется на основе методов дискретной стохастической фильтрации, обеспечивающих оптимальную по среднеквадратическому критерию оценку измеряемого вектора состояния, т. е. на основе схемы дискретного фильтра Калмана и ее различных модификаций. Основным недостатком данных фильтров является необходимость точного априорного описания вероятностных характеристик помех измерения оцениваемого сигнала. В то же время в реальных информационно-измерительных и управляющих бортовых системах локомотивов, функционирующих в условиях различных возмущений, статистические параметры помех измерения или меняются случайным образом во времени, или известны приближенно. В подобной ситуации использование методов калмановской фильтрации не представляется возможным. В связи с актуальностью решения задачи фильтрации в подобной постановке в данной статье для дискретных нелинейных стохастических систем, возмущаемых шумами с неизвестными плотностями распределения, решена задача их робастного рекуррентного оценивания на основе локально-оптимального критерия робастности оценки. Важной особенностью разработанного робастного алгоритма оценки является его размерность, совпадающая с размерностью оцениваемого объекта (в то время как размерность современных алгоритмов фильтрации значительно превышает размерность вектора состояния объекта). Это позволяет резко сократить вычислительные затраты при реализации предложенного алгоритма, что весьма актуально для бортовых навигационных и управляющих систем локомотивов.

Ключевые слова: робастная фильтрация, стохастические нелинейные дискретные системы, класс распределений с ограниченными средними квадратами.

Для цитирования: Аппаратное решение задачи стохастической робастной дискретной фильтрации в бортовых системах управления локомотивов / Д. Н. Карасев, А. В. Костюков, С. В. Соколов, И. В. Решетникова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1. – С. 132–140. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_132.

Введение

В настоящее время для оценки дискретных нелинейных стохастических систем используются, как правило, дискретные стохастические фильтры, обеспечивающие оценку измеряемого вектора состояния, оптимальную по среднеквадратическому критерию, т. е. на основе схемы дискретного фильтра Калмана [1, 2]. Принципиальным недостатком данных фильтров является обязательное наличие точного априорного описания статистических характеристик помех измерения фильтруемого сигнала, в то время как для реальных измерительных и инфокоммуникационных систем, подверженных возмущениям различной физической природы, вероятностные параметры шумов измерения, как правило, или неизвестны, или известны весьма приближенно [3]. Также достаточно широко применяются фильтры, использующие для обеспечения устойчивости процесса фильтрации при априорной неопределенности интенсивности помех измерения введение эмпирических масштабных коэффициентов при вычислении апостериорной ковариационной матрицы или дисперсионной матрицы помех измерения [4–6]. Недостатком этих методов является отсутствие строгих критериев выбора масштабных коэффициентов и процедуры их вычисления, а также обоснования повышения точности фильтрации, что не позволяет обеспечить требуемую точность и устойчивость процесса фильтрации при отсутствии априорного задания вероятностных характеристик помех измерения оцениваемого сигнала. Почти классической является схема фильтрации, использующая для обеспечения устойчивости калмановской фильтрации расширение размерности вектора состояния [7]. Очевидным недостатком здесь являются существенные вычислительные затраты на реализацию процедуры фильтрации. В связи с этим представляет

существенный теоретический и практический интерес развитие методов дискретной фильтрации с точки зрения расширения их функциональных возможностей для формирования робастных (устойчивых) оценок состояния в предположении широкого спектра допущений о характере распределений помех измерений и шумов объекта.

Изначально под робастностью понималась нечувствительность алгоритма оценивания к малым отклонениям вероятностных характеристик помех измерителей от их априорных вероятностных распределений (в частности, к аномальным отклонениям относительно гауссовского распределения). Впоследствии понятие робастности алгоритмов фильтрации существенно расширилось. Среди новых подходов к построению алгоритмов робастной фильтрации следует выделить:

- метод фильтрации, который позволяет находить помимо оценок вектора состояния еще и оценку ковариационной матрицы помех измерений [8];
- метод фильтрации, построенный на совместном использовании критерия максимальной коррентропии & метода взвешенных наименьших квадратов и позволяющий существенно уменьшить влияние аномальных наблюдений [9];
- методы робастной фильтрации при известных ковариациях случайных возмущений, построенные на основе методов H_2 -, H_∞ - и H_2/H_∞ -оптимизации [10–12];
- методы робастной фильтрации, учитывающие неопределенность ковариационных матриц стохастических возмущений [13–16];
- методы и алгоритмы робастной фильтрации в случае лапласовского распределения шума измерения, резко снижающие чувствительность процедуры оценивания к «выбросам» в измерениях [17].

Анализ всех перечисленных и др. методов и алгоритмов робастной оценки позволяет сделать следующие выводы:

- подавляющая часть робастных фильтров ориентирована только на обеспечение устойчивой работы фильтра Калмана, причем, за счет введения новых вычислительных схем, значительно увеличивающих объем вычислительных затрат при оценке состояния системы;
- основная часть работ по робастным алгоритмам фильтрации посвящена разработке алгоритмов оценки состояния линейных дискретных объектов, что существенно сужает области их практического использования.

Таким образом, дальнейшее развитие методов робастной фильтрации как с точки зрения расширения их функциональных возможностей, так и сокращения вычислительных затрат на реализацию алгоритма оценки, представляет не только теоретический, но и практический интерес.

Ниже рассмотрим один из возможных подходов к решению данной задачи.

Постановка задачи

Пусть нелинейный дискретный объект, вектор состояния которого X_k оценивается, описывается стохастическим разностным уравнением вида:

$$X_k = f(X_{k-1}, k) + f_0(X_{k-1}, k)W_{k-1}, \quad (1)$$

где $f(X_{k-1}, k)$, $f_0(X_{k-1}, k)$ – известные векторная и матричная функции размерности, соответственно, N и $N \times M$,

W_{k-1} – вектор-шум объекта размерности M , компоненты которого имеют плотность распределения ρ , принадлежащую классу распределений с ограниченными средними квадратами ($\int_{-\infty}^{\infty} w^2 \rho(w) dw < \infty$), и измеряется наблюдателем:

$$z_k = C_k X_k + V_k, \quad (2)$$

где z_k – вектор измерений размерности K ,

C_k – известная матрица размерности $K \times N$,

V_k – вектор помехи измерения размерности K , компоненты которого имеют плотность распределения, определенную также в классе распределений с ограниченными средними квадратами.

В силу того что в данном случае для помехи измерения известен только класс распределения, но не его вид, оценку \hat{X}_k вектора состояния X_k будем искать как оценку, гарантирующую минимальные ошибки оценивания в наиболее неблагоприятной ситуации, определяемой заданным классом распределения. В классической постановке данная задача решается как задача определения оценки \hat{X}_k из

условия минимизации функционала $\sum_{i=1}^k F[z_i - C_i \hat{X}_i]$, где функция F определяется выбранным (наиболее неблагоприятным) классом распределения помехи измерения. При таком решении задачи неизбежны вычислительные сложности, связанные с поиском глобального минимума многомерной нелинейной случайной функции.

В связи с этим возникает задача разработки такого подхода к синтезу робастных фильтров, который обеспечивал бы как возможность его использования для помех измерения с распределениями в классе распределений с ограниченными средними квадратами, так и практически доступный уровень вычислительных затрат за счет реализации фильтра в виде рекуррентной схемы.

Синтез алгоритма робастной фильтрации

Опираясь на форму уравнения (1), описывающего динамику стохастического вектора состояния X_k , оценку \hat{X}_k вектора X_k будем искать в следующей рекуррентной форме:

$$\hat{X}_k = f(\hat{X}_{k-1}, k) + f_0(\hat{X}_{k-1}, k) U_k(\hat{X}_{k-1}, z_k, k), \quad (3)$$

где $U_k(\hat{X}_{k-1}, z_k, k)$ – вектор-функция, определяемая из условия обеспечения робастности оценки (3), т. е. минимума ошибок оценивания при наиболее неблагоприятном классе распределения помехи измерения.

Как показано в [18], при выборе в качестве минимаксного критерия оптимальности J минимизируемой функции

$$J_k = [z_k - C_k \hat{X}_k]^T [z_k - C_k \hat{X}_k] + U_k(\hat{X}_{k-1}, z_k, k)^T U_k(\hat{X}_{k-1}, z_k, k). \quad (4)$$

Вектор-функция $U_k(\hat{X}_{k-1}, z_k, k)$, определяемая из условия обеспечения робастности оценки (3), имеет вид

$$U_k(\hat{X}_{k-1}, z_k, k) = f_0(\hat{X}_{k-1}, k)^T C_k^T (z_k - C_k \hat{X}_k).$$

Соответственно, уравнение искомого робастного дискретного стохастического фильтра после подстановки $U_k(\hat{X}_{k-1}, z_k, k)$ в уравнение (3) и его разрешения относительно оценки \hat{X}_k может быть записано следующим образом:

$$\hat{X}_k = (E + f_0(\hat{X}_{k-1}, k) f_0(\hat{X}_{k-1}, k)^T C_k^T C_k)^{-1} (f(\hat{X}_{k-1}, k) + f_0(\hat{X}_{k-1}, k) f_0(\hat{X}_{k-1}, k)^T C_k^T z_k), \quad (5)$$

где E – единичная матрица размерности N .

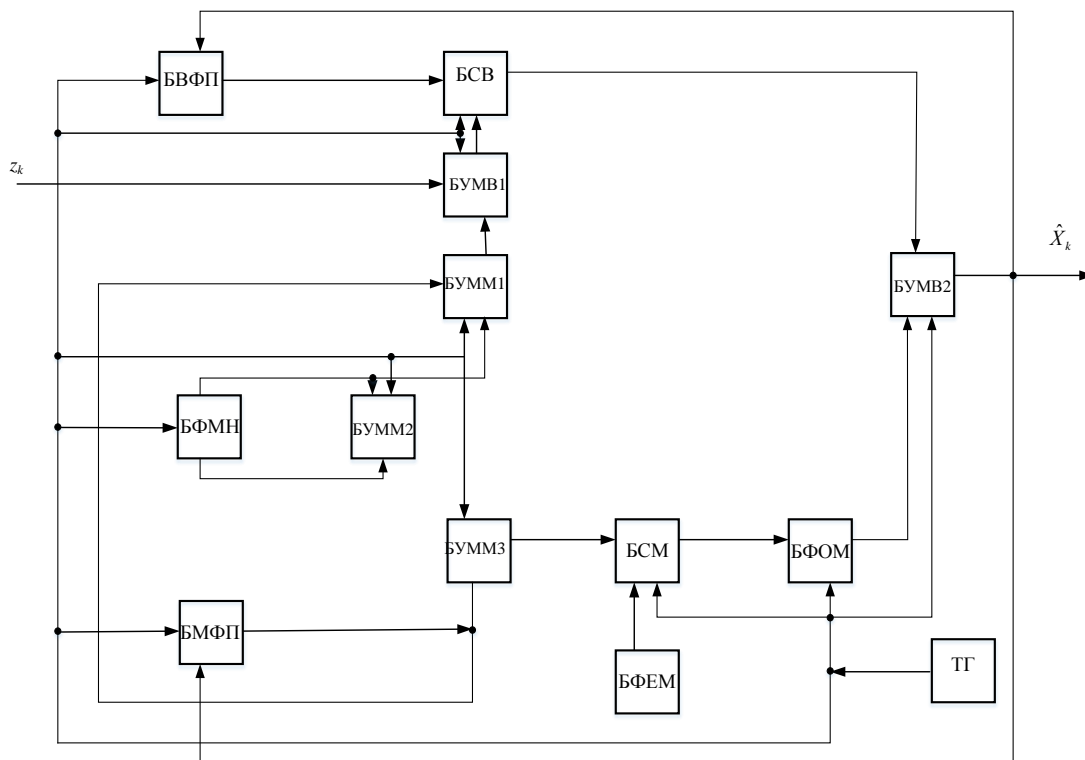
Наибольшее быстродействие при реализации предложенной схемы фильтрации (5) можно достичь при ее аппаратной реализации, которую и рассмотрим ниже.

Аппаратная реализация робастного дискретного стохастического фильтра

Структурная схема робастного дискретного стохастического фильтра (далее – устройства) приведена на рис. 1, где использованы следующие обозначения его функциональных блоков:

- БВФП: блок векторного функционального преобразования $f(\hat{X}_{k-1}, k)$;
- БФМН: блок формирования матрицы наблюдения C_k ;
- БМФП: блок матричного функционального преобразования $f_0(\hat{X}_{k-1}, k) f_0^T(\hat{X}_{k-1}, k)$;
- БСВ: блок суммирования векторов;
- БУМВ1: первый блок умножения матрицы размерности $N \times K$ на вектор размерности K ;
- БУМВ2: второй блок умножения матрицы размерности $N \times N$ на вектор размерности N ;
- БУММ1: первый блок умножения матрицы размерности $N \times N$ на матрицу размерности $N \times K$;
- БУММ2: второй блок умножения матрицы размерности $N \times K$ на матрицу размерности $K \times N$;
- БУММ3: третий блок умножения матрицы размерности $N \times N$ на матрицу размерности $N \times N$;
- БСМ: блок суммирования матриц;
- БФЕМ: блок формирования единичной матрицы;
- БФОМ: блок формирования обратной матрицы;
- ТГ: тактовый генератор.

Выход тактового генератора ТГ подключен ко входам синхронизации всех блоков устройства, за исключением блока формирования единичной матрицы БФЕМ. Входом устройства является векторный вход первого блока умножения матрицы на вектор БУМВ1. Схема подключения остальных блоков устройства поясняется рисунком. Особенностью здесь является подключение транспонированного выхода блока формирования матрицы наблюдения БФМН ко входам блоков БУММ1, БУММ2 (транспонирование матрицы выходных сигналов БФМН реализуется за счет соответствующей коммутации его выходов на подключаемые входы данных блоков).



Структурная схема робастного дискретного стохастического фильтра

Все вышеперечисленные блоки могут быть легко реализованы на основе существующих типовых микропроцессоров и микроконтроллеров отечественного производства [19], а для максимального повышения быстродействия – на основе оптических технологий [19, 20].

Устройство работает следующим образом.

В начальный момент времени с выхода второго блока умножения матрицы на вектор БУМВ2 вводится начальное значение вектора оценки \hat{X}_0 , которое поступает на информационные входы блока векторного функционального преобразования БВФП и блока матричного функционального преобразования БМФП, обеспечивая формирование начальных значений векторной и матричной функций $f(\hat{X}_0)$ и $f_0(\hat{X}_0)f_0^T(\hat{X}_0)$. Далее по сигналам тактового генератора ТГ, обеспечивающего синхронность работы всех блоков устройства, в k -й ($k = 1, 2, 3, \dots$) момент времени осуществляются следующие операции. Векторный сигнал измерения z_k поступает на векторный вход первого блока умножения матрицы на вектор БУМВ1. На матричный вход этого блока поступает матричный сигнал $f_0(\hat{X}_{k-1}, k)f_0^T(\hat{X}_{k-1}, k)C_k^T$, сформированный в первом блоке умножения матрицы на матрицу БУММ1 – в данном случае матрицы $f_0(\hat{X}_{k-1}, k)f_0^T(\hat{X}_{k-1}, k)$, поступающей с выхода блока матричного функционального преобразования БМФП, на матрицу C_k^T , поступающую с транспонированного выхода блока формирования матрицы наблюдения БФМН. С выхода первого блока умножения матрицы на вектор БУМВ1 векторный сигнал $f_0(\hat{X}_{k-1}, k)f_0^T(\hat{X}_{k-1}, k)C_k^T z_k$ поступает на первый вход

блока суммирования векторов БСВ, на второй вход которого с выхода блока векторного функционального преобразования БВФП поступает векторный сигнал $f(\hat{X}_{k-1}, k)$. На выходе блока суммирования векторов БСВ формируется векторный сигнал $f(\hat{X}_{k-1}, k) + f_0(\hat{X}_{k-1}, k)f_0^T(\hat{X}_{k-1}, k)C_k^T z_k$, поступающий далее на векторный вход второго блока умножения матрицы на вектор БУМВ2. На матричный вход данного блока поступает матричный сигнал $(E + f_0(\hat{X}_{k-1}, k)f_0^T(\hat{X}_{k-1}, k)C_k^T C_k)^{-1}$, сформированный следующим образом. С транспонированного и прямого выходов блока формирования матрицы наблюдения БФМН матричные сигналы C_k^T и C_k поступают на входы второго блока умножения матрицы на матрицу БУММ2, с выхода которого снимается матричный сигнал $C_k^T C_k$, поступающий далее на вход множителя третьего блока умножения матрицы на матрицу БУММ3, на вход множимого которого поступает матричный сигнал $f_0(\hat{X}_{k-1}, k)f_0^T(\hat{X}_{k-1}, k)$ с выхода блока матричного функционального преобразования БМФП. Матричный сигнал произведения $f_0(\hat{X}_{k-1}, k)f_0^T(\hat{X}_{k-1}, k)C_k^T C_k$ с выхода третьего блока умножения матрицы на матрицу БУММ3 поступает на первый вход блока суммирования матриц БСМ, на второй вход которого поступает матричный сигнал единичной матрицы E с выхода блока формирования единичной матрицы БФЕМ. Суммарный матричный сигнал $(E + f_0(\hat{X}_{k-1}, k)f_0^T(\hat{X}_{k-1}, k)C_k^T C_k)$ с выхода блока суммирования матриц БСМ поступает на вход блока формирования обратной матрицы БФОМ, с выхода которой матричный сигнал $(E + f_0(\hat{X}_{k-1}, k)f_0^T(\hat{X}_{k-1}, k)C_k^T C_k)^{-1}$ поступает далее на матричный вход второго блока умножения матрицы на вектор БУМВ2. На выходе данного блока формируется векторный сигнал:

$$(E + f_0(\hat{X}_{k-1}, k)f_0^T(\hat{X}_{k-1}, k)C_k^T C_k)^{-1} (f(\hat{X}_{k-1}, k) + f_0(\hat{X}_{k-1}, k)f_0^T(\hat{X}_{k-1}, k)C_k^T z_k),$$

равный текущему значению вектора оценки \hat{X}_k . Этот векторный сигнал поступает на выход устройства и на информационные входы блока векторного функционального преобразования БВФП и блока матричного функционального преобразования БМФП для последующего формирования векторного и матричного сигналов $f(\hat{X}_k, k+1)$ и $f_0(\hat{X}_k, k+1)f_0^T(\hat{X}_k, k+1)$, соответственно. Далее работа устройства повторяется.

Вывод

Предложенный робастный дискретный стохастический фильтр повышает быстродействие процесса оценивания, обеспечивая формирование оценки наблюдаемого дискретного вектора состояния в реальном времени, точность фильтрации за счет устойчивости к неопределенным возмущениям дискретного вектора состояния и помехам измерения, а также обеспечивает сокращение вычислительных затрат за счет простой конструктивной реализации фильтра. Его применение в бортовых системах навигации и управления локомотивов позволит существенно повысить точность и быстродействие процессов управления и определения их пространственного положения.

Список литературы

- 1 Тихонов, В. И. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем / В. И. Тихонов, В. Н. Харисов // Радио и связь. – 2004. – 304 с. – ISBN 5-256-01701-2.
- 2 Стохастическая обработка спутниковых измерений в бортовых навигационных системах локомотивов / С. В. Соколов, А. Л. Охотников, А. В. Костюков, О. И. Соколова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 2 (86). – С. 48–54. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_2_48.

References

- 1 Tikhonov, V. I. Statistical analysis and synthesis of radio engineering devices and systems / V. I. Tikhonov, V. N. Kharisov // Radio and communications. – 2004. – 304 p. – ISBN 5-256-01701-2.
- 2 Stochastic processing of satellite measurements in on-board navigation systems of locomotives / S. V. Sokolov, A. L. Okhotnikov, A. V. Kostyukov, O. I. Sokolova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2022. – No. 2 (86). – P. 48–54. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_2_48.

- 3 The Kalman Filter Uncertainty Concept in the Possibility Domain, IEEE Trans. Instrum. Meas / A. Ferrero, R. Ferrero, W. Jiang, S. Salicone. – 68 (2019). – P. 4335–4347. – DOI 10.1109/TIM.2018.2890317.
- 4 Структурная идентификация стохастических объектов в интеллектуальных динамических системах / П. А. Кучеренко, Л. Н. Стажарова, А. В. Костюков [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 3 (87). – С. 126–135. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_3_126.
- 5 **Кошаев, Д. А.** Многоальтернативный метод обнаружения и оценки нарушений на основе расширенного фильтра Калмана / А. Д. Кошаев // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 5. – С. 70–83. – ISSN 0005-2310.
- 6 **Патент № 2755499 С1. Российская Федерация, МПК H03H 21/00, G06E 3/00.** Способ адаптивной фильтрации : № 2021101912 : заявл. 28.01.2021 : опубл. 16.09.2021 / С. В. Соколов, А. А. Манин ; заявитель Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технический университет связи и информатики». – EDN DWVVG V.
- 7 **Авторское свидетельство № 1800588 А1 СССР, МПК H03H 21/00.** Адаптивный фильтр Калмана : № 4890558 : заявл. 11.12.1990 : опубл. 07.03.1993 / В. А. Алференко, Э. В. Борисов, Н. Г. Шебанов ; заявитель ВОЕННАЯ АКАДЕМИЯ ИМ. Ф. Э. ДЗЕРЖИНСКОГО. – EDN SIEFYS.
- 8 **Wang, D.** Augmented Cubature Kalman filter for nonlinear RTK/MIMU integrated navigation with non-additive noise / D. Wang, H. Ly, J. Wu. – Measurement 97, 2017. – P. 111–125.
- 9 **Särkkä, S.** Recursive noise adaptive Kalman filtering by variational Bayesian approximations / S. Särkkä, A. Nummenmaa // IEEE Transactions on Automatic control. – 2009. – Vol. 54. – P. 596–600. – DOI 10.1109/tac.2008.2008348.
- 10 Kalman filtering based on the maximum correntropy criterion in the presence of non – Gaussian noise / R. Izanloo, S. A. Fakoorian, H. S. Yazdi, D. Simon // Annual Conference on Information Science and Systems (CISS), Princeton, USA : proceedings. – 2016. – P. 500–505. – DOI 10.1109/ciss.2016.7460553.
- 11 **Gao, H.** Induced l2 and generalized H ∞ filtering for systems with repeated scalar nonlinearities / H. Gao, J. Lam, C. Wang // IEEE Transact.
- 3 The Kalman Filter Uncertainty Concept in the Possibility Domain, IEEE Trans. Instrum. Meas / A. Ferrero, R. Ferrero, W. Jiang, S. Salicone. – 68 (2019). – P. 4335–4347. – DOI 10.1109/TIM.2018.2890317.
- 4 Structural identification of stochastic objects in intelligent dynamic systems / P. A. Kucherenko, L. N. Stazharova, A. V. Kostyukov [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2022. – No. 3 (87). – P. 126–135. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_3_126.
- 5 **Koshaev, D. A.** Multi-alternative method for detecting and assessing violations based on the extended Kalman filter / D. A. Koshaev // Automation and Telemechanics. – 2010. – No. 5. – P. 70–83. – ISSN 0005-2310.
- 6 **Patent No. 2755499 C1. Russian Federation, IPC H03H 21/00, G06E 3/00.** Adaptive filtering method : No. 2021101912 : application. 01/28/2021 : publ. 09.16.2021 / S. V. Sokolov, A. A. Manin ; applicant for the Order of the Red Banner of Labor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Moscow Technical University of Communications and Informatics". – EDN DWVVG V.
- 7 **Copyright certificate No. 1800588 A1 USSR, IPC H03H 21/00.** Adaptive Kalman filter: No. 4890558: app. 12/11/1990 : publ. 03/07/1993 / V. A. Alferenko, E. V. Borisov, N. G. Shebanov ; applicant MILITARY ACADEMY NAMED AFTER F. E. DZERZHINSKY. – EDN SIEFYS.
- 8 **Wang, D.** Augmented Cubature Kalman filter for nonlinear RTK/MIMU integrated navigation with non-additive noise / D. Wang, H. Ly, J. Wu. – Measurement 97, 2017. – P. 111–125.
- 9 **Särkkä, S.** Recursive noise adaptive Kalman filtering by variational Bayesian approximations / S. Särkkä, A. Nummenmaa // IEEE Transactions on Automatic control. – 2009. – Vol. 54. – P. 596–600. – DOI 10.1109/tac.2008.2008348.
- 10 Kalman filtering based on the maximum correntropy criterion in the presence of non – Gaussian noise / R. Izanloo, S. A. Fakoorian, H. S. Yazdi, D. Simon // Annual Conference on Information Science and Systems (CISS), Princeton, USA : Proceedings. – 2016. – P. 500–505. – DOI 10.1109/ciss.2016.7460553.
- 11 **Gao, H.** Induced l2 and generalized H ∞ filtering for systems with repeated scalar nonlinearities

Signal Proc. – 2005. – V. 53. – No. 11. – P. 4215–4226. – DOI 10.1109/TSP.2005.857009.

12 **Gao, H.** New approach to mixed H_2/H_∞ filtering for polytopic discrete-time systems / H. Gao, J. Lam, C. Wang // IEEE Transact. Signal Proc. – 2005. – V. 53. – No. 8. – P. 3183–3192. – DOI 10.1109/TSP.2005.851116.

13 **Gao, H.** Robust H_∞ filtering for discrete stochastic time-delay systems with nonlinear disturbances / H. Gao, J. Lam, C. Wang // Nonlinear Dynam. Syst. Theory. – 2004. – V. 4. – No. 3. – P. 285–301. – DOI 10.1080/03081079.2014.973730.

14 **Poor, H. V.** Minimax State Estimation for Linear Stochastic Systems with Noise Uncertainty / H. V. Poor, D. P. Looze // IEEE Trans. Automat. Control. – 1981. – V. 26. – P. 902–906. – DOI 10.1109/TAC.1981.1102756.

15 **Sayed, A. H.** A Framework for State-space Estimation with Uncertain Models // IEEE Trans. Automat. Control. – 2001. – V. 46. – P. 998–1013. – DOI 10.1109/9.935054.

16 **Calafiore, G.** Minimum Variance Estimation with Uncertain Statistical Model / G. Calafiore, L. El Ghaoui // Proc. IEEE CDC. – 2001. – P. 3497–3499. – DOI 10.1109/CDC.2001.980400.

17 **Миллер, Б. М.** Робастное оценивание на основе метода наименьших модулей и фильтра Калмана / Б. М. Миллер, К. С. Колосов // Автоматика и телемеханика. – 2020. – № 11. – С. 72–92. – DOI 10.31857/S0005231020110057.

18 **Патент № 2804256 С1 Российская Федерация, МПК G06F 17/16, H03H 19/00.** Робастный дискретный стохастический фильтр : № 2023101070 : заявл. 19.01.2023 : опубл. 26.09.2023 / С. В. Соколов, И. В. Решетникова ; заявитель «Московский технический университет связи и информатики». – EDN CQNCWZ.

19 **Смирнов, Ю. А.** Основы микроэлектроники и микропроцессорной техники : учебное пособие / Ю. А. Смирнов, С. В. Соколов, Е. В. Титов. – 2-е, исправленное. – Санкт-Петербург : Лань, 2013. – 496 с. – ISBN 978-5-8114-1379-9.

20 **Патент № 2022328 С1 Российская Федерация, МПК G06E 1/04.** Оптический умножитель : № 5045839/24 : заявл. 03.06.1992 : опубл. 30.10.1994 / С. В. Соколов ; заявитель Ростовское высшее военное командно-инженерное училище ракетных войск им. Главного маршала артиллерии Неделина М. И. – EDN WBQHTV.

/ H. Gao, J. Lam, C. Wang // IEEE Transact. Signal Proc. – 2005. – V. 53. – No. 11. – P. 4215–4226. – DOI 10.1109/TSP.2005.857009.

12 **Gao, H.** New approach to mixed H_2/H_∞ filtering for polytopic discrete-time systems / H. Gao, J. Lam, C. Wang // IEEE Transact. Signal Proc. – 2005. – V. 53. – No. 8. – P. 3183–3192. – DOI 10.1109/TSP.2005.851116.

13 **Gao, H.** Robust H_∞ filtering for discrete stochastic time-delay systems with nonlinear disturbances / H. Gao, J. Lam, C. Wang // Nonlinear Dynam. Syst. Theory. – 2004. – V. 4. – No. 3. – P. 285–301. – DOI 10.1080/03081079.2014.973730.

14 **Poor, H. V.** Minimax State Estimation for Linear Stochastic Systems with Noise Uncertainty / H. V. Poor, D. P. Looze // IEEE Trans. Automat. Control. – 1981. – V. 26. – P. 902–906. – DOI 10.1109/TAC.1981.1102756.

15 **Sayed, A. H.** A Framework for State-space Estimation with Uncertain Models // IEEE Trans. Automat. Control. – 2001. – V. 46. – P. 998–1013. – DOI 10.1109/9.935054.

16 **Calafiore, G.** Minimum Variance Estimation with Uncertain Statistical Model / G. Calafiore, L. El Ghaoui // Proc. IEEE CDC. – 2001. – P. 3497–3499. – DOI 10.1109/CDC.2001.980400.

17 **Miller, B. M.** Robust estimation based on the method of least moduli and the Kalman filter / B. M. Miller, K. S. Kolosov // Automation and Telemechanics. – 2020. – No. 11. – P. 72–92. – DOI 10.31857/S0005231020110057.

18 **Patent No. 2804256 C1 Russian Federation, IPC G06F 17/16, H03H 19/00.** Robust discrete stochastic filter : No. 2023101070 : application. 01.19.2023 : publ. 09.26.2023 / S. V. Sokolov, I. V. Reshetnikova ; applicant "Moscow Technical University of Communications and Informatics". – EDN CQNCWZ.

19 **Smirnov, Yu. A.** Fundamentals of microelectronics and microprocessor technology: textbook / Yu. A. Smirnov, S. V. Sokolov, E. V. Titov. – 2nd, Corrected. – Saint Petersburg : Lan Publishing House, 2013. – 496 p. – ISBN 978-5-8114-1379-9.

20 **Patent No. 2022328 C1 Russian Federation, IPC G06E 1/04.** Optical multiplier : No. 5045839/24 : appl. 06/03/1992 : publ. 10.30.1994 / S. V. Sokolov ; applicant Rostov Higher Military Command and Engineering School of Missile Forces named after. Chief Marshal of Artillery M. I. Nedelin – EDN WBQHTV.

D. N. Karasev, A. V. Kostyukov, S. V. Sokolov, I. V. Reshetnikova

HARDWARE SOLUTION OF THE PROBLEM OF STOCHASTIC ROBUST DISCRETE FILTRATION IN ON-BOARD LOCOMOTIVE CONTROL SYSTEMS

Abstract. Today, the assessment of discrete nonlinear stochastic systems in the vast majority of cases is carried out on the basis of discrete stochastic filtering methods, which provide an optimal assessment of the measured state vector according to the root-mean-square criterion that is based on the discrete Kalman filter circuit and its various modifications. The main disadvantage of these filters is the need for an accurate a priori description of the probabilistic characteristics of the measurement interference of the estimated signal. At the same time, in real information-measuring and control systems on board locomotives operating under conditions of various disturbances, the statistical parameters of measurement noise either change randomly over time or are known approximately. In such a situation, the use of Kalman filtering methods is not possible. Due to the relevance of solving the filtering problem in a similar formulation, in this article, for discrete nonlinear stochastic systems perturbed by noise with unknown distribution densities, the problem of their robust recurrent estimation is solved based on a locally optimal criterion for the robustness of the estimate. An important feature of the developed robust estimation algorithm is its dimension, which coincides with the dimension of the object being assessed (while the dimension of modern filtering algorithms significantly exceeds the dimension of the object's state vector). This makes it possible to dramatically reduce computational costs when implementing the proposed algorithm, which is very important for on-board navigation and control systems of locomotives.

Keywords: robust filtering, stochastic nonlinear discrete systems, class of distributions with bounded mean squares.

For citation: Hardware solution of the problem of stochastic robust discrete filtration in on-board locomotive control systems / D. N. Karasev, A. V. Kostyukov, S. V. Sokolov, I. V. Reshetnikova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 1. – P. 132–140. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_132.

Сведения об авторах

Карасёв Денис Николаевич

Северо-Кавказский филиал ордена Трудового Красного Знамени ФГБОУ ВО «Московский технический университет связи и информатики» (СКФ МТУСИ), директор, кандидат физико-математических наук, e-mail: denis_karasev@skf-mtusi.ru

Костюков Александр Владимирович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), кафедра «Теоретические основы электротехники», кандидат технических наук, доцент, e-mail: kav@rgups.ru

Соколов Сергей Викторович

Северо-Кавказский филиал ордена Трудового Красного Знамени ФГБОУ ВО «Московский технический университет связи и информатики» (СКФ МТУСИ), доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информатика и вычислительная техника», e-mail: s.v.s.888@yandex.ru

Information about the authors

Karasev Denis Nikolayevich

North Caucasus Branch of the Order of the Red Banner of Labor of the Moscow Technical University of Communications and Informatics (NCF MTUCI), Director,

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, e-mail: denis_karasev@skf-mtusi.ru

Kostyukov Alexander Vladimirovich

Rostov State Transport University (RSTU), Chair «Theoretical foundations of electrical engineering»,

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, e-mail: kav@rgups.ru

Sokolov Sergey Viktorovich

North Caucasus Branch of the Order of the Red Banner of Labor of the Moscow Technical University of Communications and Informatics (NCF MTUCI),

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Chair «Computer Science and Computer Engineering», e-mail: s.v.s.888@yandex.ru

Решетникова Ирина Витальевна

Северо-Кавказский филиал ордена
Трудового Красного Знамени ФГБОУ ВО
«Московский технический университет
связи и информатики» (СКФ МТУСИ),
начальник отдела
научно-исследовательской работы,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: n_otdel@skf-mtusi.ru

Reshetnikova Irina Vitalievna

North Caucasus Branch of the Order of the
Red Banner of Labor of the Moscow Technical
University of Communications and Informatics
(NCF MTUCI),
Head of the Research Department,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: n_otdel@skf-mtusi.ru

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,
АВТОМАТИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ**

УДК 656.2. + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_141

*В. В. Соловьев, С. В. Федорова***ТРЕБОВАНИЯ И УСЛОВИЯ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ
КОМПЛЕКСОВ И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ
ИНФРАСТРУКТУРЫ**

Аннотация. Рассмотрены преимущества от внедрения и унификации основных характеристик многофункциональных диагностических комплексов (МДК), предлагаемого алгоритмического, программного и аппаратного обеспечения, элементы которого могут устанавливаться на различные виды подвижного состава, обеспечивая при этом практически непрерывный мониторинг участков железнодорожного пути.

Предложен новый подход, основанный на агрегировании математического и программного обеспечения, сочетающего математический аппарат обработки массивов квазислучайных данных и нейросетевых моделей, которые позволили бы ограничить объемы обучающих выборок при достаточной точности обработки как графической, так и табличной информации, полученной в ходе работы путеизмерительных средств на железных дорогах.

Научная новизна исследования заключается в рассмотрении вопросов разработки и внедрения алгоритмического и математического обеспечения, которое позволило бы иметь возможность работать с первичной информацией от различных диагностических средств и программно-аппаратных комплексов.

Ключевые слова: диагностирование, искусственные нейронные сети, многофункциональные диагностические комплексы, программное обеспечение, сверхточная архитектура, обработка данных, случайный процесс.

Для цитирования Соловьев, В. В. Требования и условия для перспективных диагностических комплексов и программного обеспечения железнодорожной инфраструктуры / В. В. Соловьев, С. В. Федорова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1. – С. 141–150. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_141.

Введение

Современный железнодорожный путь представляет собой одну из важнейших подсистем транспортной магистрали, которая непосредственно принимает нагрузки и взаимодействует с подвижным составом, скорость движения и вес которого постоянно увеличиваются, что соответствует общемировым тенденциям развития транспорта и отечественной экономики в данный момент времени.

Основными критериями работы железных дорог являются надежность и экономическая эффективность. Одна из основных проблем, существующих на данный момент, связана с энергетическим взаимодействием между колесными парами транспортных средств и рельсовым путем.

Каждый из элементов конструкции железнодорожного пути характеризуется совокупностью механических и геометрических характеристик и дефектами, которые могут определяться как материалом элемента, так и особенностями работы конструкции. Параметры состояния и эксплуатационного поведения каждого элемента представляют собой вектор величин, градиенты изменения которых могут иметь случайный или квазислучайный характер. Операциям первичной и статистической обработки таких величин и посвящена данная работа.

Диагностические комплексы являются важной частью обеспечения безопасной эксплуатации железных дорог. Из-за сложности и «эластичности» железнодорожного пути, а также движения тяжелых поездов с высокой скоростью необходимо постоянно контролировать геометрию пути и состояние всех его элементов.

Диагностика состояния объектов транспортной инфраструктуры (рис. 1), их несущих конструкций и отдельных функциональных элементов позволяет не только отслеживать текущее положение, но и управлять жизненным циклом на различных его этапах с учетом экономической составляющей.

Именно система диагностики и мониторинга является первым модулем в комплексе управления жизненным циклом объекта и позволяет связать все остальные модули между собой путем получения, обработки, передачи и хранения данных, содержащих информацию о состоянии объекта, появлении и развитии различных дефектов и т. д. (рис. 2).



Рис. 1. Диагностика и мониторинг инфраструктуры



Рис. 2. Комплексный контроль параметров состояния объектов инфраструктуры

В настоящее время на сети отечественных железных дорог используется более 8000 систем и устройств для диагностики и мониторинга, из них около 80 % являются съемными и могут быть установлены на подвижной состав различных типов.

Целью данной работы является формулировка основных тенденций развития и возможных шагов модернизации автоматизированных систем диагностики путевого хозяйства и транспортной инфраструктуры в целом. Для достижения поставленной цели рассматривается новый подход, основанный на агрегировании математического и программного обеспечения, сочетающего математический аппарат обработки массивов квазислучайных данных и нейросетевых моделей, которые позволили бы ограничить объемы обучающих выборок при достаточной точности обработки как графической, так и табличной информации, полученной в ходе работы путеизмерительных средств на железных дорогах.

Постановка задачи

К основным системам, позволяющим проводить комплексный мониторинг состояния объекта транспортной инфраструктуры и его отдельных элементов, можно отнести дефектоскопные тележки, путевые шаблоны, вагоны-путеизмерители и вагоны-дефектоскопы, мобильные дефектоскопные лаборатории и т. д.

Важным аспектом указанного процесса является обработка первичной информации, полученной от этих средств, с использованием программного, алгоритмического и математического обеспечения.

Первичным этапом сбора информации являются измерительно-информационные системы, которые отличаются разновидностью используемого комплекса, важным здесь является приведение получаемых и сохраняемых данных к одному виду, к одним единицам измерения, и если для характеристик геометрии рельсовой колеи сделать это достаточно просто, то определение дефектности рельсов, стрелочных переводов и других элементов верхнего строения пути может существенно отличаться для разных систем контроля.

Хотя программное и алгоритмическое обеспечение для разных средств диагностики может отличаться, математическое обеспечение позволяет устанавливать функциональные связи между измеряемыми параметрами, управляющими факторами и искомыми функциями. Оно практически одинаково для всех средств и может варьироваться только в начальных условиях, граничных условиях, пределах интегрирования и форме представления некоторых данных.

Интегральные или комплексные оценки могут сгладить особенности процессов получения и первичной обработки информации, но при этом обладают большим субъективизмом и зачастую требуют дополнительной детализации и пояснения как конечных результатов, так и используемых алгоритмов в промежуточной обработке данных.

В настоящем исследовании предлагается описывать случайный процесс с помощью характеристической функции $\theta_1(u_1; t_1)$, которая представляет преобразование Фурье для плотности вероятности случайного процесса $w_1(x_1; t_1)$:

$$\theta_1(u_1; t_1) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{ju_1 x_1} w_1(x_1; t_1) dx_1.$$

Обратное преобразование Фурье в этом случае можно записать в следующем виде:

$$w_1(x_1; t_1) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ju_1 x_1} \theta_1(u_1; t_1) du_1.$$

Для многомерной характеристической функции (в случае измерения множества случайных величин, не связанных друг с другом) можно записать:

$$\theta_n(u_1, \dots, u_n; t_1, \dots, t_n) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} e^{j \sum_{k=1}^n u_k x_k} w_n(x_1, \dots, x_n; t_1, \dots, t_n) dx_1 \dots dx_n.$$

При этом n -мерная плотность вероятности определится через n -мерную характеристическую функцию как

$$w_n(x_1, \dots, x_n; t_1, \dots, t_n) = \frac{1}{(2\pi)^n} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j \sum_{k=1}^n u_k x_k} \theta_n(u_1, \dots, u_n; t_1, \dots, t_n) du_1 \dots du_n.$$

При обработке результатов измерений важно учитывать свойства характеристической функции: свойство симметрии, условие нормировки, условие ограниченности $|\theta_n(u_1, \dots, u_n; t_1, \dots, t_n)| \leq 1$, условие согласованности и условие неотрицательной определенности:

$$w_n(x_1, \dots, x_n; t_1, \dots, t_n) = \frac{1}{(2\pi)^n} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j \sum_{k=1}^n u_k x_k} \theta_n(u_1, \dots, u_n; t_1, \dots, t_n) du_1 \dots du_n \geq 0.$$

Если случайный процесс имеет характер гауссовского, то для представления n -мерной плотности вероятности необходимо знать его математическое ожидание и корреляционную функцию.

Одномерную и двумерную плотность вероятности гауссовского случайного процесса выразим следующим образом соответственно:

$$w_1(x_1; t_1) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x_1 - m_1)^2}{2\sigma_1^2} \right],$$

$$w_2(x_1, x_2; t_1, t_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-R^2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2(1-R^2)} \left[\frac{(x_1 - m_1)^2}{\sigma_1^2} - 2R \frac{(x_1 - m_1)(x_2 - m_2)}{\sigma_1\sigma_2} + \frac{(x_2 - m_2)^2}{\sigma_2^2} \right] \right\},$$

здесь $R = R_{12} = R(t_1, t_2) = R(t_2, t_1)$.

Характеристическая функция может быть представлена в виде

$$\theta_n(u_1, \dots, u_n; t_1, \dots, t_n) = \exp \left(j \sum_{\mu=1}^n u_{\mu} m_{\mu} - \frac{1}{2} \sum_{\mu=1}^n \sum_{\nu=1}^n K_{\mu\nu} u_{\mu} u_{\nu} \right).$$

При этом можно утверждать, что если для случайного процесса $\xi(t)$ при любом n и расположении точек t_i характеристическая функция описывается данной формулой, то случайный процесс является гауссовским [1].

Одномерная и двумерная характеристические функции гауссовского случайного процесса запишутся в следующем виде:

$$\begin{aligned} \theta_1(u_1; t_1) &= \exp(jm_1u_1 - \sigma_1^2u_1^2/2), \\ \theta_2(u_1, u_2; t_1, t_2) &= \exp \left[j(m_1u_1 + m_2u_2) - (\sigma_1^2u_1^2 + 2R\sigma_1\sigma_2u_1u_2 + \sigma_2^2u_2^2)/2 \right], \end{aligned}$$

где величины $m_{1,2}$, $\sigma_{1,2}$, R выступают в виде функциональных коэффициентов.

Введение в эксплуатацию новых диагностических комплексов и путеизмерительных лабораторий придает процессу путеизмерения комплексный характер, что означает проведение диагностики и оценку состояния всех элементов железнодорожного пути. Поэтому важной задачей является разработка и внедрение алгоритмического и математического обеспечения, которое позволило бы работать с первичной информацией от различных диагностических средств и программно-аппаратных комплексов. Фрагмент представления случайного процесса и обработки измеряемых данных является входным блоком в общую схему интеграции разных средств и комплексов мониторинга и диагностики.

Теоретические основы обработки данных

Результаты измерений часто проявляют признаки случайных величин, значения которых перекрываются шумовыми компонентами. Для выделения нужного сигнала необходимы алгоритмы определения нежелательных неинформативных сигналов.

Представим, что есть случайный процесс $\xi(t)$, заданный на интервале времени $[0, T]$, на котором выделены точки t_i , $i = \overline{1, n}$. Обозначим

$$m_i = \langle \xi(t_i) \rangle, \quad K(t_1, t_2) = \langle \xi(t_1)\xi(t_2) \rangle - m_1m_2.$$

Случайный процесс $\xi(t)$ называется гауссовским случайным процессом, если при любых n и при любом расположении точек его n -мерная (и n -моментная) плотность вероятности описывается следующей формулой [1]:

$$w_n(x_1, \dots, x_n; t_1, \dots, t_n) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^n \det \hat{\mathbf{K}}}} \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{\mu=1}^n \sum_{\nu=1}^n C_{\mu\nu} (x_{\mu} - m_{\mu}) (x_{\nu} - m_{\nu}) \right].$$

Здесь $\hat{\mathbf{K}}$ – матрица, элементами которой являются значения корреляционной функции в соответствующих точках

$$\hat{\mathbf{K}} = \|K_{\mu\nu}\| = \|K(t_{\mu}, t_{\nu})\|, \quad \mu, \nu = \overline{1, n},$$

Матрица, обратная матрице $\hat{\mathbf{K}}$:

$$\hat{\mathbf{C}} = \|C_{\mu\nu}\|, \quad C_{\mu\nu} = A_{\nu\mu} / \det \hat{\mathbf{K}},$$

где $A_{\nu\mu}$ – алгебраическое дополнение элемента $K_{\nu\mu}$ в определителе $\det \hat{\mathbf{K}}$. Поскольку $\hat{\mathbf{C}} = \hat{\mathbf{K}}^{-1}$, ее элементы могут быть найдены из уравнения

$$\sum_{m=1}^n C_{\mu m} K_{mv} = \delta_{\mu\nu},$$

где $\delta_{\mu\nu}$ – символ Кронекера [1].

Общий вид любого линейного преобразования можно записать как

$$\eta(t) = \int \xi(\tau) h(t, \tau) d\tau.$$

Тогда если $\xi(\tau)$ – гауссовский случайный процесс, то и $\eta(t)$ – гауссовский случайный процесс.

Среди гауссовских случайных процессов особое место занимает гауссовский белый шум, это обобщенный случайный процесс, для которого спектральная плотность постоянна на всех частотах. Реализация белого шума – $n(t)$, а самого процесса – $v(t)$. Если ограничиться случаем $\langle v(t) \rangle = 0$, то корреляционная функция белого шума имеет вид:

$$\langle v(t)v(t+\tau) \rangle = K(\tau) = (N_0/2) \delta(\tau).$$

Очевидно, что корреляционная функция не удовлетворяет перечисленным выше свойствам. В этом особенность данного случайного процесса, его сингулярность.

Белый шум удобен как модель некоторого случайного процесса, воздействующего на какое-либо устройство, реализацию которого мы можем видеть на экранах дефектоскопных и путеизмерительных средств [1] (рис. 3).

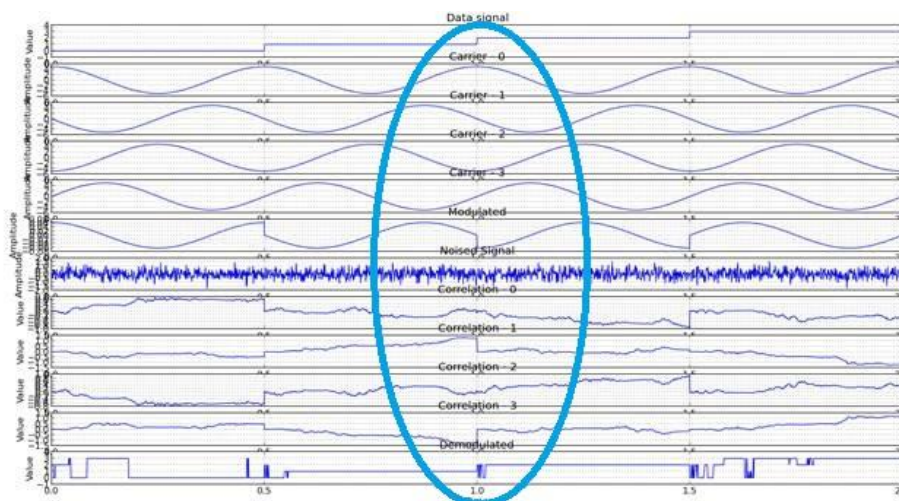


Рис. 3. Путеизмерительная лента

Наличие различных помех, которые могут как скрывать нужную информацию, так и являться дополнительным информативным критерием, приводит исследователей к необходимости разработки алгоритмов фильтрации и обработки информации с высоким «зашумлением» и наличием «лишних» сигналов.

Настройка параметров, описывающих случайный процесс, может значительно упростить обработку результатов, полученных при использовании дефектоскопических и путеизмерительных средств, а также программно-аппаратного обеспечения. Это позволяет повысить точность обнаружения дефектов и отклонений от норм содержания пути, а также снизить вычислительную сложность алгоритмического и программного обеспечения на всех этапах обработки информации [1].

Практические аспекты обработки информации с помощью нейросетей

Существует проблема обработки и анализа данных о состоянии рельсового пути. При визуальном контроле съемка сотен километров рельсов происходит на большой скорости одним вагоном-путеизмерителем. В результате получается огромное количество однотипных изображений, отличающихся друг от друга едва заметными элементами, которые как раз и представляют наибольший интерес для специалистов по мониторингу и диагностике. Для первичной обработки таких массивов информации в автоматическом режиме предлагается использовать сверточные нейронные сети (*Convolutional*

Neural Network – CNN), что позволит существенно ускорить процесс обнаружения, распознавания и детектирования дефектов на элементах верхнего строения пути, оставляя за человеком возможность принятия того или иного управленческого решения. Такие нейронные сети имеют следующую схему классификации и обработки изображений:

Input → *Convolution* → *ReLU* → *Max Pooling* → *Fully Connected* → *Softmax* → *Classification output*.

Схема слоев классификации образов с точки зрения готовности для последующей обработки выглядит следующим образом:

- первый слой (*Input*) – первичная информация об изображении;
- второй слой (*Convolution*) – выделение признаков на входном изображении и создание карты признаков путем свертки с фильтрами;
- третий слой (*ReLU*) – функция активации, которая устанавливает нулевой порог и преобразует сумму взвешенных значений в выходной сигнал нейрона;
- четвертый слой (*Max Pooling*) – понижение пространственных размеров карт признаков путем нелинейного уплотнения путем выбора максимального весового коэффициента в каждой области изображения;
- пятый слой (*Fully Connected*) – формирует N -мерный вектор, используемый для первичной классификации образа объекта по основным признакам;
- шестой слой (*Softmax*) – обеспечивает интерфейс для выходного слоя;
- седьмой слой (*Classification output layer*) – формирует классификационную таблицу с распознанными объектами.

В результате работы данного алгоритма формируется изображение, с одной стороны, более абстрактное, а с другой стороны, наиболее важные области остаются, и размер карт признаков уменьшается.

Общая архитектура сверточной нейронной в прямом направлении обработки первичных данных представлена на рис. 4, на котором приняты следующие обозначения: i – номер нейрона, j – номер слоя; n – количество входных нейронов; y_{ij} – значение на выходе соответствующего нейрона.

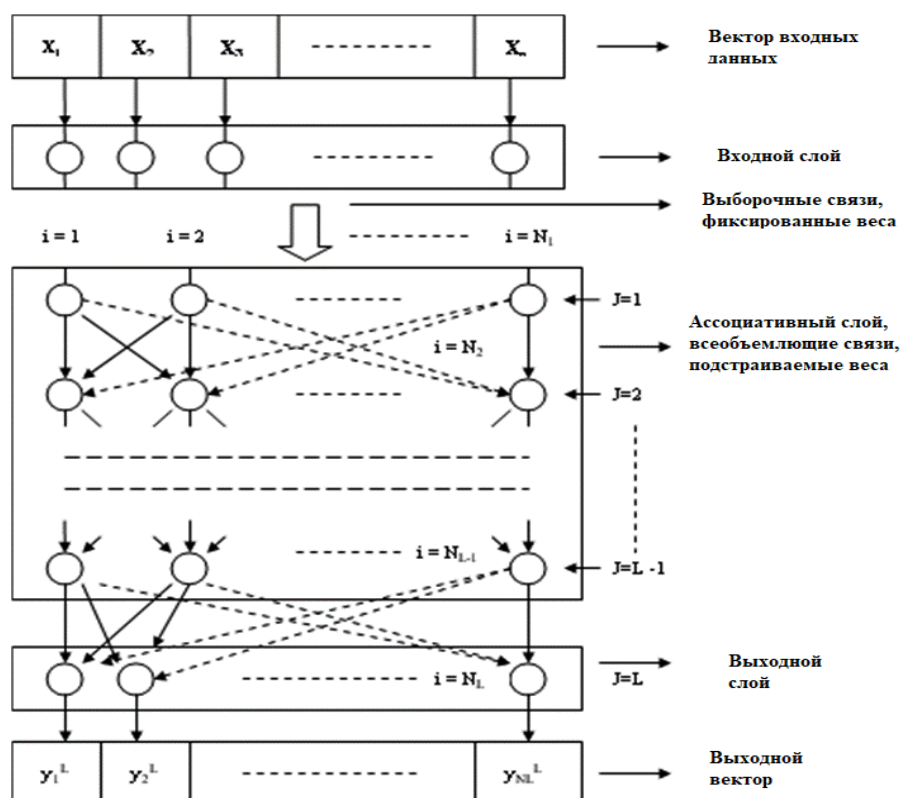


Рис. 4. Архитектура сверточной нейронной сети прямого действия

Каждый выходной сигнал j -го слоя подается на вход всех нейронов $(j + 1)$ -го слоя. Для выхода i -го нейрона $(j + 1)$ -го слоя можно записать [2]:

$$y_i^{j+1} = \sum_{k=1}^{N_j} w_{ik}^{j+1} y_k^j + w_{k0}^{j+1}, i = 1, \dots, N_{j+1},$$

где y_i^{j+1} – выход i -го нейрона $(j+1)$ -го слоя; w_{ik}^{j+1} – вес связи k -го нейрона $(j+1)$ -го слоя с i -м нейроном j -го слоя; w_{k0}^{j+1} – величина внешнего смещения [2].

В результате агрегирования получаем некоторую функцию в виде полиномиальной суммы с подбираемыми параметрами (весовые коэффициенты), которые соответствуют тестовым случаям обучения нейронной сети. При работе такой архитектуры в реальных условиях необходима подстройка для каждого конкретного участка пути и каждого элемента верхнего строения, т. е. выбираются весовые коэффициенты и количество ассоциативных слоев, фактически структура нейронной сети напрямую зависит от решаемой задачи, и в этом случае можно добиться дополнительного развертывания слоев без изменения всех весовых коэффициентов предыдущих уровней.

Наиболее важный элемент настройки работы нейронной сети – это процесс обучения, в рамках которого используются алгоритмы не только прямого действия, но и обратного, отслеживающие минимизацию общей ошибки. Процесс обучения делится на такты и эпохи, что позволяет оптимизировать как связь нейронов в одном слое, так и связь слоев между собой, путем корректировки соответствующих весовых коэффициентов.

Необходимо отделить нормальные разности от разностей, содержащих данные об отказе. Для этого используется аппроксимационное представление задач диагностирования и прогнозирования. Основным подходом является создание структурированных разностных сигналов и использование статистических моделей для оценки состояния объекта диагностирования. Для локализации дефектов применяется диагностическая матрица, похожая на систему нейронов [3].

Нейронные предикторы (рис. 5) – уникальная особенность контроля технического состояния изделий. Они представляют собой математическую модель на основе искусственной нейронной сети (ИНС), которая делает предсказания о состоянии изделия на следующем шаге.

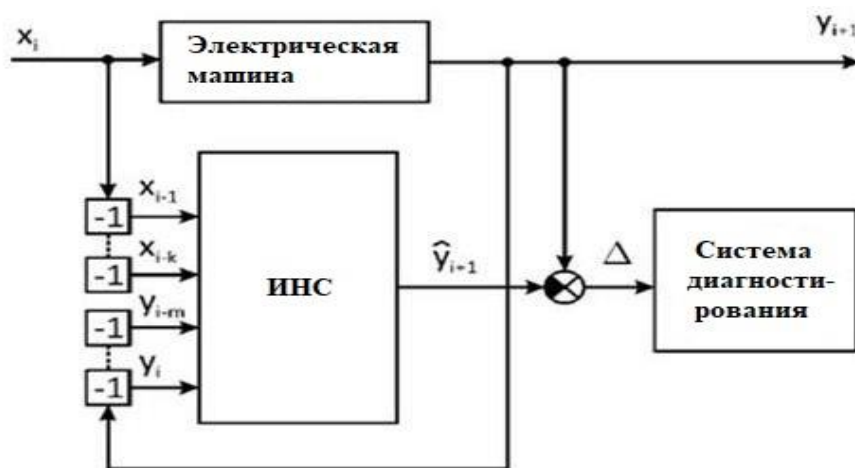


Рис. 5. Блок-схема нейронного предиктора

Нейронные сети могут точно приближать нелинейные функции и использоваться в оценочных устройствах. Они исследуют динамику системы в процессе тренировки и могут автоматически изучать поведение нелинейных систем. Обученная нейронная сеть может предсказывать появление дефектов в изделии и оценивать его техническое состояние, позволяя своевременно провести ремонт.

Применение ИНС позволит получить повышение быстродействия средств диагностирования за счет распараллеливания потоков обработки диагностической информации [3].

Реализация предлагаемого подхода позволит увеличить точность обработки информации, получаемой информационно-измерительными системами, уменьшить число ошибок первого и второго рода при определении параметров состояния и поведения элементов конструкций объектов транспортной инфраструктуры.

Заключение

Проведенное исследование показало возможность применения результатов обработки массива статистических данных о состоянии объекта транспортной инфраструктуры на различных этапах его жизненного цикла, включая прогнозирование состояния с течением времени или с увеличением наработки тоннажа, планирование ремонтных работ различного назначения и интенсивности. Обработку данных планируется проводить с помощью предложенного алгоритмического обеспечения и нейронных сетей, для чего предлагается выполнить предварительную подготовку исходных данных для этапа обучения и настройки такого программного обеспечения. Такой подход позволит уменьшить влияние человеческого фактора на точность и адекватность конечного результата, а в будущем и оптимизировать количество персонала, занятого в технологических процессах в опасных зонах вблизи железнодорожного пути, что положительно скажется и на техносферной безопасности транспортных систем в целом.

Практическая значимость проведенного исследования и сформулированных этапов развития существующих систем диагностики заключается в том, что предлагаемое математическое и организационное обеспечение может быть реализовано на уже эксплуатируемых путеизмерительных и диагностических комплексах и не требует значительных финансовых вложений и переобучения сотрудников.

Предлагаемая структура работы с результатами применения информационно-измерительных систем позволит построить комплекс распределенной обработки данных между несколькими программно-аппаратными модулями, которые могут быть расположены в непосредственной близости от измерительных блоков, на автоматизированных рабочих местах специалистов-дефектоскопистов в транспортных средствах, на автоматизированных рабочих местах в структурных подразделениях линейных предприятий, центральных дирекций и различных серверных модулях для хранения и автоматической обработки.

Проведен анализ использования нейросетей, где сверточная архитектура с помощью фильтров раскладывает изображение на простые представления, которые можно интерпретировать для задач классификации.

Список литературы

- 1 **Соловьев, В. В.** Особенности выбора и настройки математического и алгоритмического обеспечения, используемого в процессе мониторинга и диагностики верхнего строения железнодорожного пути / В. В. Соловьев // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2023. – Т. 19. – С. 25–40. – EDN YWUROB.
- 2 **Горева, Т. И.** Нейросетевые модели диагностики технических систем // Т. И. Горева, Н. Н. Портнягин, Г. А. Пюкке // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. – 2012. – Вып. 1 (4). – С. 31–43 – URL: <http://dx.doi.org/10.18454/2079-6641-2012-4-1-31-43> (дата обращения: 28.02.2024).
- 3 **Кацуба, Ю. Н.** Применение искусственных нейронных сетей для диагностирования изделий / Ю. Н. Кацуба, И. В. Власова / Международный научно-исследовательский журнал. – 2015. – № 3 (34). – С. 1–5. – ISSN 2303-9868.
- 4 **Дьяконов, В. П.** MATLAB 6.5 SP1/7/7 SP1/7 SP2 + Simulink 5/6. Инструменты искусственного интеллекта и биоинформатики / В. П. Дьяконов, В. В. Круглов. – Москва : Солон-Пресс, 2020. – С. 2–7. – ISBN 978-5-91359-381-8.

References

- 1 **Solovyov, V. V.** Features of the selection and configuration of mathematical and algorithmic software used in the process of monitoring and diagnostics of the upper structure of the railway track / V. V. Solovyov // Introduction of modern structures and advanced technologies in track facilities. – 2023. – Vol. 19. – P. 25–40. – EDN YWUROB.
- 2 **Goreva, T. I.** Neural network models for diagnosing technical systems / T. I. Goreva, N. N. Portnyagin, G. A. Pyukke // Vestnik KRAUNC. Physical and Mathematical Sciences. – 2012. – Iss. 1 (4). – P. 31–43 – URL: <http://dx.doi.org/10.18454/2079-6641-2012-4-1-31-43> (date of access: 02/28/2024).
- 3 **Katsuba, Yu. N.** Application of artificial neural networks for diagnosing products / Yu. N. Katsuba, I. V. Vlasova // International Research Journal. – 2015. – No. 3 (34). – P. 1–5. – ISSN 2303-9868.
- 4 **Dyakonov, V. P.** MATLAB 6.5 SP1/7/7 SP1/7 SP2 + Simulink 5/6. Tools of artificial intelligence and bioinformatics / V. P. Dyakonov, V. V. Kruglov. – P. 2–7. – Moscow : Solon-Press, 2020. – ISBN 978-5-91359-381-8.

5 **Гафаров, Ф. М.** Искусственные нейронные сети и их приложения : учебное пособие / Ф. М. Гафаров, А. Ф. Галимянов. – Казань : Издательство Казанского университета, 2018. – 121 с.

6 **Резницкий, М. А.** Программная реализация автоматизированной системы обнаружения дефектов верхнего строения пути на основе технологии свёрточных нейронных сетей / М. А. Резницкий, Л. В. Аршинский // Молодая наука Сибири. – 2018. – № 1 (1). – С. 23–35. – ISSN 2658-610X.

7 **Фисенко, В. Т.** Компьютерная обработка и распознавание изображений / В. Т. Фисенко, Т. Ю. Фисенко. – Санкт-Петербург : Изд-во СПбГУ ИТМО, 2008. – 192 с.

8 **Резницкий, М. А.** Решение задачи анализа верхнего строения пути по его изображениям / М. А. Резницкий // Информационные технологии и проблемы математического моделирования сложных систем. – Иркутск : ИрГУПС, 2016. – Вып. 16. – С. 15–20. – ISSN 2658-3704.

9 Алгоритм определения параметров основания зданий и сооружений с помощью обработки георадиолокационных изображений // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика / А. А. Локтев, Д. А. Локтев, В. В. Королев, А. А. Кузнецов. – 2022. – № 4. – С. 11–17. – DOI 10.25791/pribor.4.2022.1331.

10 **Локтев, Д. А.** Использование метода анализа размытия изображения для определения внешних дефектов железнодорожного пути / Д. А. Локтев, Ю. А. Быков, Н. И. Коваленко // Наука и техника транспорта. – 2016. – № 1. – С. 69–75. – ISSN 2074-9325.

5 **Gafarov, F. M.** Artificial neural networks and their applications: textbook / F. M. Gafarov, A. F. Galimyanov. – Kazan : Kazan University Publishing House, 2018– 121 p.

6 **Reznitsky, M. A.** Software implementation of an automated system for detecting defects in the superstructure of a track based on convolutional neural network technology / M. A. Reznitsky, L. V. Arshinsky // Young science of Siberia. – 2018. – No. 1 (1). – P. 23–35. – ISSN 2658-610X.

7 **Fisenko, V. T.** Computer processing and image recognition / V. T. Fisenko, T. Yu. Fisenko // Saint Petersburg : Saint Petersburg State University ITMO Publishing House, 2008. – 192 p.

8 **Reznitsky, M. A.** Solution of the problem of analyzing the upper structure of a track using its images / M. A. Reznitsky // Information technologies and problems of mathematical modeling of complex systems. – Irkutsk : IrGUPS, 2016. – Iss. 16. – P. 15–20. – ISSN 2658-3704.

9 An algorithm for determining the parameters of the foundation of buildings and structures using the processing of ground penetrating radar images // Instruments and Systems : Monitoring, Control, Diagnostics / A. A. Loktev, D. A. Loktev, V. V. Korolev, A. A. Kuznetsov. – 2022. – No. 4. – P. 11–17. – DOI 10.25791/pribor.4.2022.1331.

10 **Loktev, D. A.** Using an image blur analysis method to identify external defects in a railway track / D. A. Loktev, Yu. A. Bykov, N. I. Kovalenko // Science and technology of transport. – 2016. – No. 1. – P. 69–75. – ISSN 2074-9325.

V. V. Solovyov, S. V. Fedorova

REQUIREMENTS AND CONDITIONS FOR ADVANCED DIAGNOSTIC SYSTEMS AND SOFTWARE FOR RAILWAY INFRASTRUCTURE

Abstract. The purpose of the study is to show the benefits of providing and unifying the main characteristics of multifunctional diagnostic complexes (MDC), to provide algorithmic, software and hardware, the elements of which can be held in various types of rolling stock, while forming an almost continuous monitoring section of railway tracks.

A new approach is proposed based on the aggregation of mathematical and software combining the mathematical apparatus for processing arrays of quasi-random data and neural network models, which would allow limiting the volume of training samples with sufficient accuracy of processing both graphical and tabular information obtained during the operation of track measuring devices on railways.

Scientific novelty includes issues of design and development of algorithmic and mathematical software; the resource will be able to work with the latest information from various diagnostic tools and software and hardware systems.

Keywords: diagnostics, artificial neural networks, multifunctional diagnostic systems, software, convolutional architecture, data processing, random process.

For citation: Solovyov, V. V. Requirements and conditions for advanced diagnostic systems and software for railway infrastructure / V. V. Solovyov, S. V. Fedorova // Vestnik

Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 1. –
P. 141–150. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_141.

Сведения об авторах**Соловьев Владислав Викторович**

Российская открытая академия транспорта
Российского университета транспорта
(РУТ (МИИТ)),
кафедра «Транспортное строительство»,
преподаватель,
e-mail : vladvc@mail.ru

Федорова Снежана Владимировна

Российская открытая академия транспорта
Российского университета транспорта
(РУТ (МИИТ)),
кафедра «Транспортное строительство»,
преподаватель,
e-mail : sfedts@mail.ru

Information about the authors**Solovyov Vladislav Viktorovich**

Russian Open Academy of Transport
of the Russian University of Transport
(RUT (MIIT)),
Chair «Transport Construction»,
Lecturer,
e-mail: vladvc@mail.ru

Fedorova Snezhana Vladimirovna

Russian Open Academy of Transport
of the Russian University of Transport
(RUT (MIIT)),
Chair «Transport Construction»,
Lecturer,
e-mail: sfedts@mail.ru

К. М. Чудотворова, А. В. Федоров

ПРОГРАММИРОВАНИЕ ЦИФРОВОГО АВТОМАТА ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Аннотация. Рассмотрены методика синтеза и структурная организация микропрограммного автомата, которые могут быть использованы для построения информационно-измерительных энергетических систем, специализированных высокоскоростных систем измерения параметров радиосигналов, характеристик интеллектуальных сенсорных функциональных преобразователей в автоматизированных системах противопожарной защиты (АСПЗ), а также блоков ввода-вывода со специализированными интерфейсами.

Разработка алгоритмов обработки информации от датчиков и оценки текущих параметров технологического процесса является одной из основных функций программирования цифровой автоматической системы противопожарной защиты. С помощью этих алгоритмов принимаются решения о необходимости действий на предприятии для предотвращения возможной аварии. Для этого используются такие программные средства, как блоки обработки сигналов, управляющие программы и др.

Ключевые слова: модель, управление, Мили автомат, цифровой автомат, вершина графа, противопожарная защита, технологическая установка, полимеризация.

Для цитирования: Чудотворова, К. М. Программирование цифрового автомата противопожарной защиты для технологических установок нефтеперерабатывающего предприятия / К. М. Чудотворова, А. В. Федоров // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1. – С. 151–157. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_151.

Введение

Автоматизация технологических процессов особенно значима и актуальна в современных условиях. По мере развития производственных технологий цифровые автоматы находят все большее применение в производственных процессах.

Цифровые автоматы широко распространены в промышленности. Они выполняют множество различных функций, включая регулирование систем, сбор и анализ данных, контроль параметров. Для обеспечения безопасности и управления процессом в технологии полимеризации в настоящее время часто используют цифровые автоматы.

Процесс полимеризации заключается в синтезе маленьких молекул (мономеров) в более крупные (полимеры). Согласно статистике, данный процесс является одним из опаснейших процессов обработки нефти по количеству аварий. Для того чтобы процесс полимеризации проходил безопасно, необходимо предусмотреть аварийную защиту. Цифровые автоматы могут оказаться весьма полезными в этой ситуации.

Основная часть

Одним из примеров использования цифровых автоматов (ЦА) в технологическом процессе полимеризации является экспериментальный стенд, созданный в лаборатории. С помощью специализированных датчиков этот стенд позволяет отслеживать температуру, давление и концентрацию мономера. Цифровой автоматический контроллер получает сигналы от датчиков и при изменении одного или нескольких параметров начинает управлять процессом полимеризации.

Автоматический контроллер на стенде реагирует на любые нарушения, возникающие в процессе полимеризации. Чтобы снизить вероятность несчастного случая, DАCS может немедленно остановить процесс, изолировать определенную часть оборудования или замедлить процесс полимеризации при возникновении проблемы.

Использование современных технологий в технических операциях можно увидеть на примере экспериментального стенда, управляемого цифровым автоматом. Будущие специалисты предприятий и учебных заведений могут учиться на примере демонстрируемого стенда.

Конечно, использование ЦА не является единственным вариантом обеспечения безопасности технологического процесса полимеризации. Но в связи с развитием современных технических процессов использование ЦА в настоящее время обеспечивает надежную, практичную и безопасную функцию управления производством.

Основой для разработки стенда послужил анализ известных диаграмм граф-схемы автомата (ГСА) для операций сложения, работы с порядками в системах с плавающей точкой, а также алгоритма приоритетных прерываний. В. Г. Кирий и С. И. Самарский показали [2], что даже для несложных микропрограмм с 20–25 микрооперациями и 6–8 логическими условиями эффект от перехода к предлагаемой в статье структурной организации микропрограммного автомата (МПА) приводит к снижению сложности на несколько раз.

Производство микроэлектронных больших интегральных комплексов для защиты от чрезвычайных ситуаций в значительной степени опирается на технологические процедуры статического и динамического контроля интегральных схем [1–4].

В уникальном процессоре дополнительно используются пять перепрограммируемых постоянных запоминающих устройств (ПЗУ), дешифратор, регистры, счетчики, блок принятия решений, блок индикации и другие компоненты. В нем также используется оригинальный метод формирования временных диаграмм (ВДФ) с электрической перестройкой для каждого типа ПЗУ (рис. 1, 2).

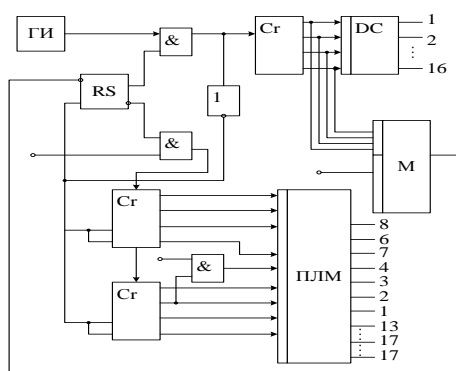


Рис. 1. Формирователь временного спецпроцессора диаграмм для контроля постоянного запоминающего устройства

В разработанной ГСА 12 логических условий, а значение M равно 6. Хотя при переходе непосредственно к новой структуре МПА выигрыш составляет $L = 2048$ кВт, выделение циклических ветвей граф-схемы позволяет еще более упростить А-подсистему.

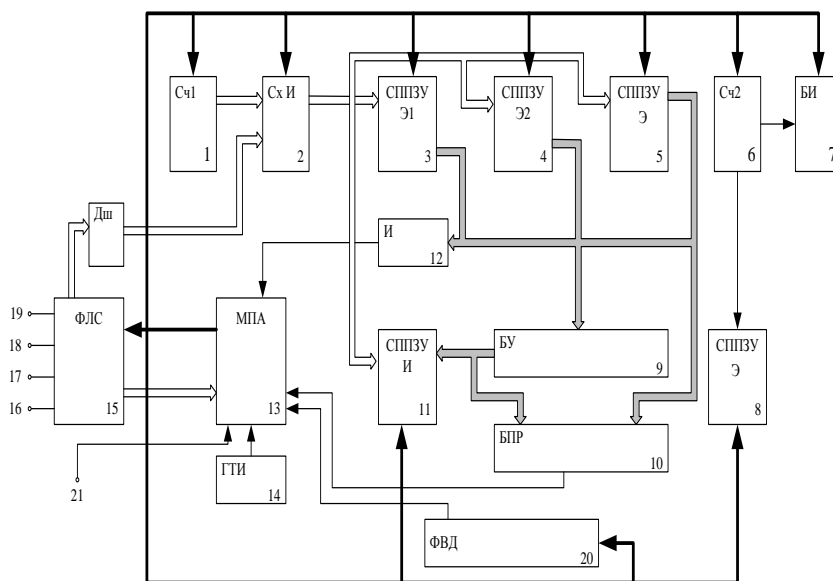


Рис. 2. Структурная схема контроля БИС ПЗУ

Эффект будет значительно более выраженным, если МПА реализован на программно-логической матрице (ПЛМ) и минимизированы булевы функции, соответствующие табличной методике задания МПА из графа переходов. На рис. 3 приведен граф алгоритма управления для конкретного процессора [5]. В кругах указан порядковый номер состояния предлагаемого автомата в граф-схеме, а α указывает на взаимосвязь процессов в системе.

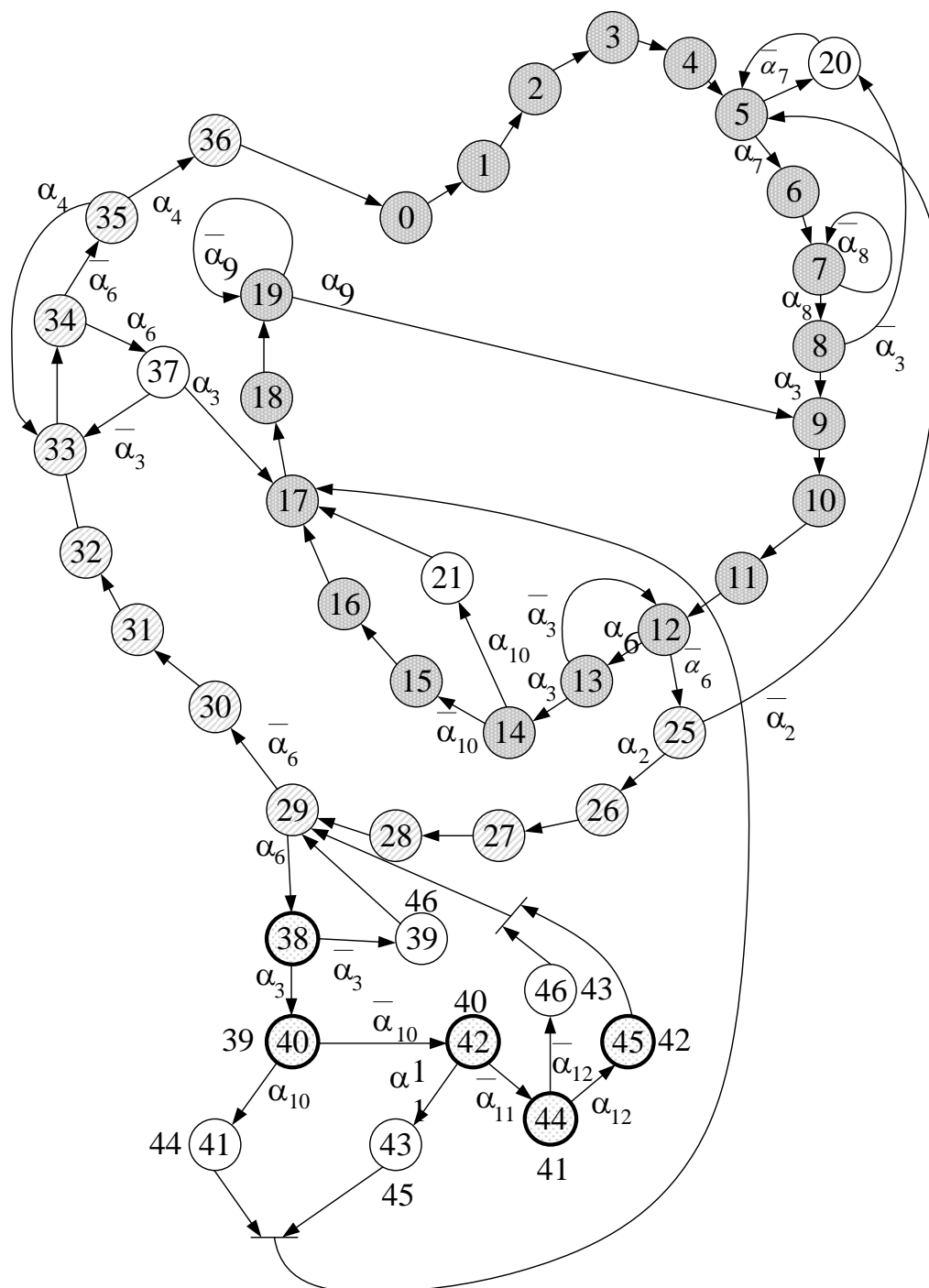


Рис. 3. Граф переходов предлагаемого автомата с выделенным счетчиком для управления процессом контроля постоянного запоминающего устройства

Защита информации в настоящее время является одной из наиболее значимых задач в системах обработки и передачи информации, системах управления противоаварийной защитой особо опасных объектов и взрывоопасных технологий, системах дистанционного пожаротушения, системах мониторинга пожарной безопасности. Поскольку системы жесткого реального времени, к которым относится

автоматизированная система противоаварийной защиты, требуют относительно значительных временных затрат даже на сверхбыстрых компьютерах, существующие решения программной защиты на основе алгоритмов Feistel, Blowfish и т.п. неприменимы [6–8].

По алгоритму управления операционным устройством управляющим автоматом противоаварийной защиты (рис. 4) проводились эксперименты на демонстрационном стенде управляющей автоматической установки противоаварийной защиты и на предприятиях (результаты подтверждаются действиями по внедрению) для обеспечения работоспособности и правильной обработки результатов. После имитационного моделирования и испытаний демонстрационный стенд был спроектирован в лабораторных условиях (рис. 5), а затем доработан.

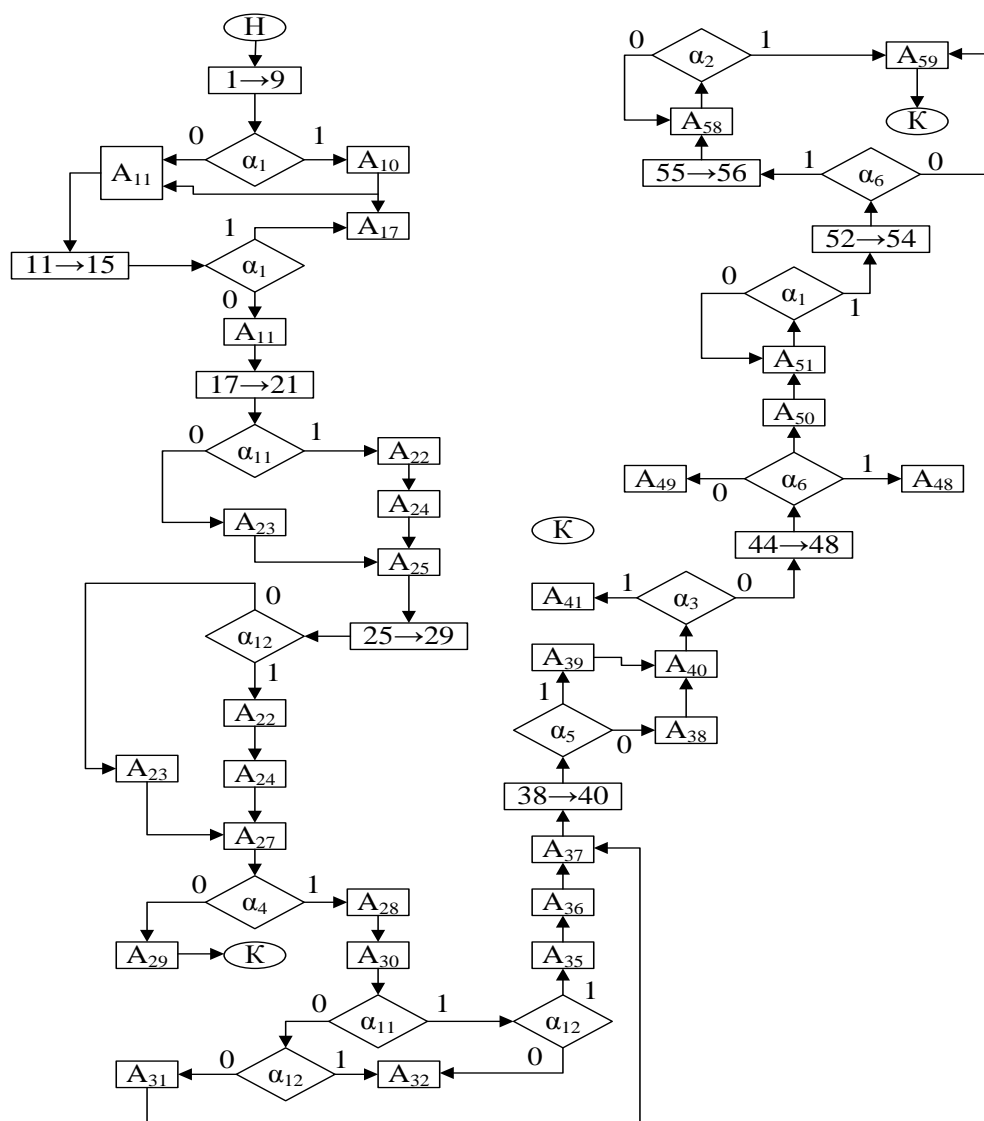


Рис. 4. Алгоритм управления операционным устройством управляющим автоматом противоаварийной защиты

В экспериментах для измерения скорости обработки сигнала и энергопотребления процесса считывания и обработки сигнала использовались штатный и аварийный режимы работы устройства. При подаче сигнала и нажатии кнопок на стенде устанавливался аварийный режим работы. Результаты эксперимента показали, что МПА, имеющий характеристики входного $m = 6$ и выходного $q = 12$ сигналов, потреблял меньше энергии, а именно $L = 2048$ кВт. Это свидетельствует о том, насколько успешно ЦА используются для создания систем реального времени для установок противоаварийной защиты в технических отраслях промышленности [9, 10].

В результате испытаний по определению времени обработки было установлено, что управляющий автомат на базе ЦА обрабатывает сигнал в два раза быстрее, чем обычная установка. Кроме того,

в результате эксперимента по определению точности обработки сигнала при 125 повторениях не было обнаружено ложных срабатываний и выдачи некорректных управляющих команд системой противоаварийной защиты технологической установки полимеризации.

Таким образом, экспериментально установлена достоверность и эффективность разработанных методов автоматизации синтеза, управления и диагностики противоаварийной защиты технических средств.

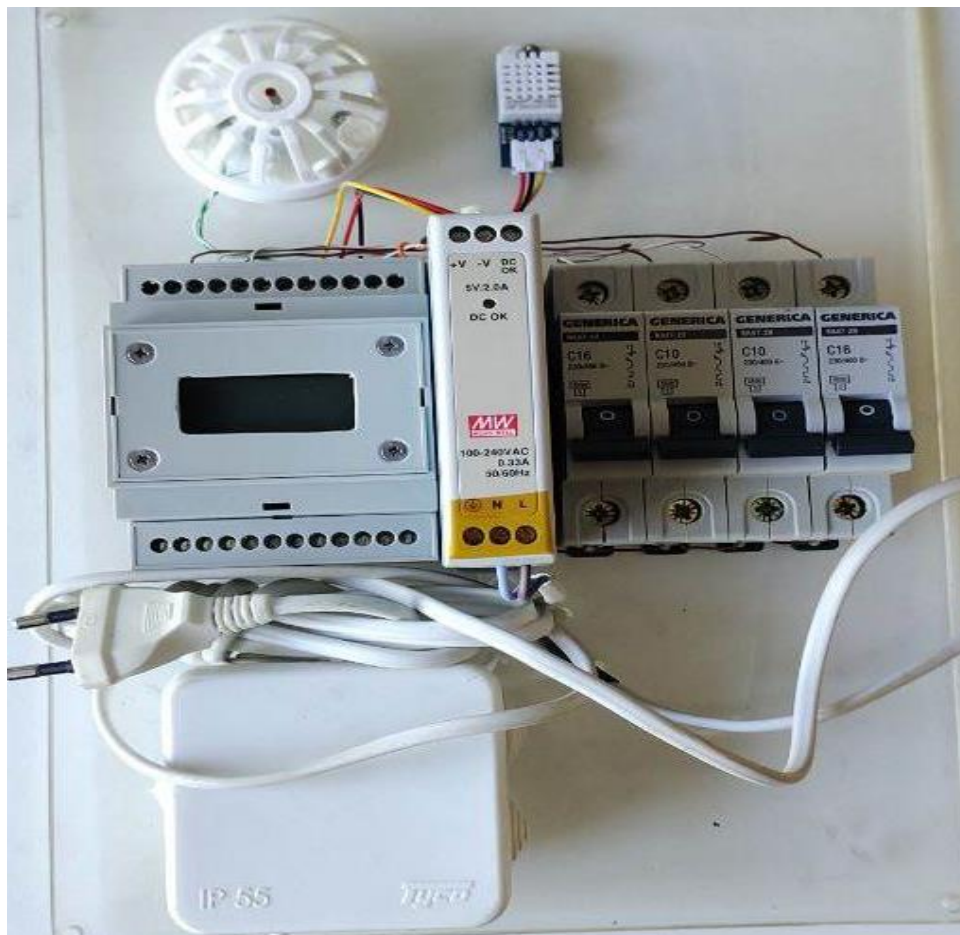


Рис. 5. Основные компоненты демонстрационного стенда управляющего автомата противоаварийной защиты технологических установок

Выводы

В результате проведенного эксперимента на основе разработанного алгоритма граф-схемы можно предположить, что применение данной граф-схемы для программирования ЦА для системы противоаварийной защиты технологических процессов на нефтеперерабатывающих предприятиях будет эффективно. В свою очередь, это позволит повысить безопасность и надежность работы технологических установок нефтеперерабатывающего процесса, а также снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций.

Список литературы

- 1 Моделирование автоматизированных интегрированных систем безопасности объектов / Н. Г. Топольский, А. В. Фирсов, А. Т. Рвачев [и др.] // Труды XV Международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем». – 2007. – Т. 2. – С. 79–83. – ISBN 978-5-91450-241-3.
- 2 Применение систем поддержки принятия решений руководителями оперативных подразделений при тушении пожаров в

References

- 1 Modeling of the automated integrated systems of object security / N. G. Topolsky, A. V. Firsov, A. T. Rvachev [et al.] // Proceedings of the XV International Conference «Problems of Safety Management of Complex Systems». – 2007. – Vol. – 2. – P. 79–83. – ISBN 978-5-91450-241-3.
- 2 Application of the decision support systems by the heads of the operational respiratory units

крупных городах / И. М. Тетерин, Н. Г. Топольский, В. М. Климовцов [и др.] // Технологии техносферной безопасности. – 2008. – № 4. – С. 20–26. – ISSN 2071-7342.

3 **Разанов, М. Р.** К вопросу анализа риска на объектах топливно-энергетического комплекса / М. Р. Разанов, Н. Г. Топольский // Пожаровзрывобезопасность. – 2007. – № 2. – С. 29–33. – ISSN 0869-7493.

4 К вопросу автоматизации информационной поддержки действий должностных лиц на пожаре / Е. А. Мешалкин, А. Г. Крылов, В. Т. Олейников [и др.] // Вестник АГТУ. – № 2. – 2013. – С. 144–151. – ISSN 2072-9502.

5 **Членов, А. Н.** Новые возможности управления противопожарной защитой объектов / А. Н. Членов // Пожары и чрезвычайные ситуации : предотвращение, ликвидация. – 2013. – № 3. – С. 48–53. – ISSN 2071-9116.

6 **Sibbet, D.** Visual Meetings / D. Sibbet // How Graphics, Sticky Notes & Idea Mapping Can Transform Group Productivity. – Москва : Альпина Паблишер, 2013. – 280 с. – ISBN 978-5-9614-4393-6.

7 Neural networks for computer-aided diagnosis in medicine / D. Lin, A. V. Vasilakos, Y. Tang // A review (2016). – Neurocomputing, 216. – P. 700–708.

8 Object detection based on HOG features : Faces and dual – eyes augmented reality / Youssef Hbali, Mohammed Sadgal, Abdelaziz El Fazziki // Computer and Information Technology (WCCIT) 2013 World Congress. – 2013. – P. 1–4.

9 **ГОСТ 12.3.047–2012.** Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля : взамен ГОСТ Р 12.3.047-98 : введен 2012–12–27. – Москва : Стандартинформ, 2014.

10 **Литвинцев, К. Ю.** Расчетно-аналитический программный комплекс «Сигма ПБ» по моделированию развития пожара и эвакуации // Пожарная безопасность. – 2016. – № 4. – С. 51–59. – ISSN 2411-3778.

at fire extinguishing in the big cities / I. M. Teterin, N. G. Topolskiy, V. M. Klimovtsov [et al.] // Technosphere safety technologies. – 2008. – No. 4. – P. 20–26. – ISSN 2071-7342.

3 **Razanov, M. R.** To the question of the risk analysis at the objects of the fuel and energy complex / M. R. Razanov, N. G. Topolskiy // Pozharovzryvobezopasnost. – 2007. – No. 2. – P. 29–33. – ISSN 0869-7493.

4 On the issue of automation of information support for the actions of officials in a fire / E. A. Meshalkin, A. G. Krylov, V. T. Oleinikov [et al.] // Bulletin of ASTU. – No. 2. – 2013. – P. 144–151. – ISSN 2072-9502.

5 **Chlenov, A. N.** New possibilities of management of fire protection of objects / A. N. Chlenov // Fires and emergencies : prevention, elimination. – 2013. – No. 3. – P. 48–53. – ISSN 2071-9116.

6 **Sibbet, D.** Visual Meetings / D. Sibbet // How Graphics, Sticky Notes & Idea Mapping Can Transform Group Productivity. – Moscow : Alpina Publisher, 2013. – 280 p. – ISBN 978-5-9614-4393-6.

7 Neural networks for computer-aided diagnosis in medicine / D. Lin, A. V. Vasilakos, Y. Tang // A review (2016). – Neurocomputing, 216. – P. 700–708.

8 Object detection based on HOG features : Faces and dual – eyes augmented reality / Youssef Hbali, Mohammed Sadgal, Abdelaziz El Fazziki // Computer and Information Technology (WCCIT) 2013 World Congress. – 2013. – P. 1–4.

9 **GOST 12.3.047–2012.** Fire safety of technological processes. General requirements. Methods of control : Replaced by GOST R 12.3.047-98 : introduced 2012-12-27. – Moscow : Standardinform, 2014.

10 **Litvintsev, K. Yu.** Calculation and analytical software system «Sigma PB» for modeling the development of fire and evacuation // Fire safety. – 2016. – No. 4. – P. 51–59. – ISSN 2411-3778.

K. M. Chudotvorova, A. V. Fedorov

PROGRAMMING A DIGITAL EMERGENCY PROTECTION AUTOMATIC FOR OIL REFINING TECHNOLOGICAL INSTALLATIONS AT ENTERPRISES

Abstract. The paper presents a new synthesis technique and a new structural organization of the microprogramming automaton, which can be used not only in the construction of functional converters of intelligent sensors in ASPSS, in specialized interfaces and input-output blocks of the monitoring system with specialized interfaces. The development of algorithms for processing information from sensors and assessing the current parameters of the technological process is one

of the main functions of programming a digital automatic emergency protection system. With the help of these algorithms, decisions are made on the need for action at the enterprise to prevent a possible accident. For this purpose, software tools such as signal processing units, control programs are used.

Keywords: model, control, Mili automaton, digital automaton, graph top, emergency protection, technological installation, polymerization.

For citation: Chudotvorova, K. M. Programming a digital emergency protection automatic for oil refining technological installations at enterprises / K. M. Chudotvorova, A. V. Fedorov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 1. – P. 151–157. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_151.

Сведения об авторах

Чудотворова Ксения Михайловна

Академия Государственной противопожарной службы МЧС России,
кафедра «Электротехника автоматизированных систем и связи»,
аспирант,
e-mail: ksenifire@bk.ru

Федоров Андрей Владимирович

Академия Государственной противопожарной службы МЧС России,
кафедра «Автоматика»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: ksenifire@bk.ru

Information about the authors

Chudotvorova Ksenia Mikhailovna

Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations in Russia,
Chair «Electrical Engineering of Automated Systems and Communications»,
Postgraduate Student,
e-mail: ksenifire@bk.ru

Fedorov Andrey Vladimirovich

Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations in Russia,
Chair «Automatic»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: ksenifire@bk.ru

Н. С. Хохлов, О. И. Бокова, С. В. Канавин, И. В. Гилев, Р. В. Ртищев

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ НА ОСНОВЕ АППАРАТА НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И АВТОМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ХАРАКТЕРИСТИК СПЕКТРОВ ИНФОРМАЦИОННОГО СИГНАЛА И ДЕСТРУКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Аннотация. Предложен способ реализации интеллектуального программного модуля на основе аппарата нейронных сетей для визуализации и автоматического анализа характеристик спектров информационного сигнала и деструктивных воздействий. Приведена процедура выбора и создания модели машинного обучения, позволяющей выявлять наличие деструктивного воздействия и его признаков. Обучение модели нейронной сети происходит в облачной среде с использованием графического процессора. Для обучения модели нейронной сети использована специализированная библиотека. Обучение реализуется на параметрах нейронной сети, характеризующих количество прохода датасета через нейронную сеть в прямом и обратном направлении. В результате обучения получены графики, характеризующие зависимости ошибок от количества эпох обучения моделей. Разработаны алгоритм выделения характеристик мощности, ширины спектра деструктивного воздействия в спектре информационного сигнала и интеллектуальный программный модуль (скрипт) для их автоматического анализа. Механизм анализа ширины спектра и мощности деструктивного воздействия в спектре информационного сигнала включает в себя программное обеспечение и модели машинного обучения для распознавания текста на изображениях.

Ключевые слова: интеллектуальный программный модуль, нейронные сети, автоматический анализ характеристик спектров, деструктивные воздействия, модель машинного обучения, алгоритм автоматического анализа характеристик спектра информационного сигнала.

Для цитирования: Разработка интеллектуального программного модуля на основе аппарата нейронных сетей для визуализации и автоматического анализа характеристик спектров информационного сигнала и деструктивных воздействий / Н. С. Хохлов, О. И. Бокова, С. В. Канавин [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1. – С. 158–168. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_158.

Введение

На сегодняшний день применение систем беспроводной связи является эффективным инструментом для обеспечения эффективной деятельности сотрудников различных ведомств, в том числе для систем железнодорожной автоматизации, систем радиосвязи [1]. Такие системы могут быть подвержены различного рода угрозам, возникающим вследствие деструктивных воздействий. Деструктивное воздействие может приводить к разрушению информации, циркулирующей в системах связи. Разрушение передаваемой информации может быть реализовано за счет ее уничтожения, искажения, блокирования. Под уничтожением информации будем понимать такое деструктивное воздействие на информационный поток данных, циркулирующих в СС СН, при котором уровень вероятности показателя битовых ошибок bit error rate (BER) превосходит максимально допустимое значение данного показателя, определенного для конкретной системы связи, результатом которого является отсутствие возможности восстановления данных. Искажение информации является результатом деструктивного воздействия на пакеты информации, а также перехвата, внесения изменений и внедрения умышленно искаженных информационных пакетов, приводящего к неправильному декодированию информации на приемной стороне. Блокирование информации подразумевает генерацию деструктивных воздействий большей мощности по сравнению с информационным сигналом, а также внедрение ложных пакетов, осуществляющих блокирование информационного обмена в СС СН [2]. Указанные виды воздействий могут дестабилизировать работу систем железнодорожной радиосвязи и нарушить обмен информацией между диспетчером и подвижным составом. Одним из возможных путей решения данной проблемы может являться автоматизация мониторинга спектров информационных

сигналов и своевременное обнаружение деструктивных воздействий с использованием технологии искусственного интеллекта.

Нейронные сети являются важным инструментом в современном мире и способны успешно решать самые разные задачи. Аппарат нейронных сетей применяется в области анализа алгоритмов поиска объектов на изображениях [3, 4], анализа методов детектирования объектов на радиолокационных изображениях [5], анализа мультиспектральных изображений [6], анализа сетевого трафика [7], биометрической аутентификации на основе нечеткого образа личности пользователя [8]. В научных исследованиях рассматриваются примеры применения нейронных сетей для обнаружения аномалий, нештатных состояний и деструктивных воздействий на информационные системы различного назначения. В монографиях [9, 10] В. В. Фисуна, С. М. Климова, М. П. Сычева, А. В. Астрахова рассматриваются методы и модели обнаружения и предотвращения компьютерных атак с помощью аппарата нечеткой логики и нейронных сетей. В работе О. И. Шелухина [11] рассматриваются вопросы диагностики и защиты сетевых ресурсов от аномальных воздействий, приводящих к уничтожению, искажению и блокированию информации с использованием методов машинного обучения и анализа темпоральных данных, включая информационные сигналы. На основе проведенного анализа научных работ можно сделать вывод об актуальности данного направления научных исследований и возможности применения аппарата нейронных сетей в задачах обнаружения деструктивных воздействий в системах беспроводной связи.

Целью работы является разработка программного модуля для автоматизации анализа характеристик спектров информационного сигнала и деструктивных воздействий на основе аппарата нейронных сетей.

Далее в статье рассмотрим общие сведения о нейронных сетях, их видах, характеристиках и классификации, а также варианты применения нейронных сетей.

Искусственный нейрон как основа нейронных сетей

Искусственный нейрон можно сравнить с биологическим нейроном, который представляет из себя нервную клетку, состоящую из тела, дендритов и аксона. От тела отходит множество коротких и толстых отростков, называемых дендритами. Они принимают импульсы с тех нейронов, которые находятся в сети раньше, чем этот нейрон. От тела отходит также один очень длинный и тонкий отросток, называемый аксоном. Это выходной отросток – по нему нейрон передает электрохимический импульс следующим нейронам в сети. Окончание аксона имеет разветвления, через которые выходной сигнал может быть передан нескольким следующим нейронам. Таким образом, через множество дендритов нейрон получает входные сигналы, в теле нейрона они обрабатываются, а через единственный аксон выходной импульс от нейрона передается дальше. Нейрон, помимо обработки сигнала, вынужден еще выполнять множество других функций, поддерживающих его жизнь [12].

Искусственный нейрон принимает входные данные (x_1, x_2, \dots, x_n) , после чего выполняет некоторые операции, а затем выводит результат y . В теле искусственного нейрона имеется сумматор, где каждый входной сигнал умножается на некоторый действительный весовой коэффициент, в результате чего формируется итоговая сумма. В упрощенном виде эту математическую модель можно рассмотреть в виде нейрона, в том числе искусственного, имеющего какие-то входы, через которые он принимает сигнал – x . Для входных сигналов вводится понятие весов – w , на которые умножаются эти сигналы. Веса используются для вычисления выходных значений нейрона на основе входных значений. Они могут меняться во время обучения нейронной сети, когда алгоритм оптимизации изменяет их так, чтобы минимизировать ошибку сети на обучающем наборе данных. В теле искусственного нейрона поступившие на входы сигналы умножаются на их веса. Сигнал первого входа x умножается на соответствующий этому входу вес, сигнал x_2 – на w_2 , и так до последнего w -го входа. Затем в сумматоре эти произведения суммируются. В итоге получаем сумму произведений значений входных сигналов z на их веса, вычисляемую по (1).

$$z = x_1w_1 + x_2w_2 + x_3w_3 + \dots + x_nw_n. \quad (1)$$

Полученное значение передается в функцию активации. Функция активации обрабатывает данное значение и выдает выходной сигнал y . В этом заключается схожесть биологического и искусственного нейрона. Однако, в отличие от биологического нейрона, искусственный нейрон не выполняет другие функции, необходимые для поддержания его жизни. Искусственный нейрон с входами и выходным значением представлен на рис. 1.

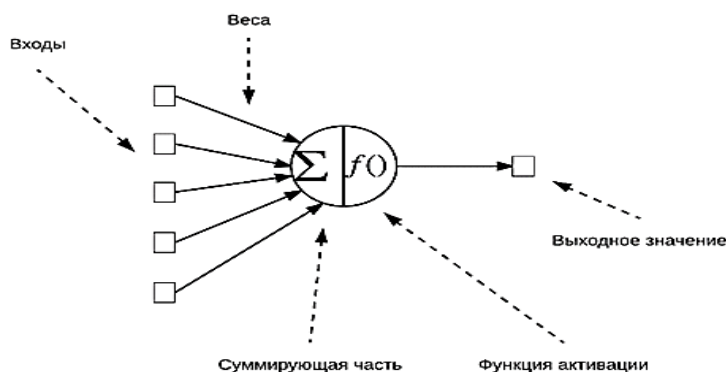


Рис. 1. Схема искусственного нейрона

Основные архитектуры нейронных сетей

В нейронных сетях можно выделить три основные архитектуры:

- 1 Сверточные нейросети (Convolutional Neural Network – далее CNN).
- 2 Рекуррентные нейросети (Recurrent Neural Network – далее RNN).
- 3 Нейросети прямого распространения (Feed Forward Neural Network – далее FNN).

Рассмотрим варианты их применения.

CNN используются для задач компьютерного зрения, таких как классификация изображений, детектирование объектов и распознавание лиц. Она является типом глубокой нейронной сети, специально разработанной для анализа изображений, которая состоит из нескольких слоев, включая сверточные слои, пулинговые слои и полносвязные слои. Сверточные слои в CNN выполняют операцию свертки, которая позволяет извлекать локальные признаки из изображений. Они применяют фильтры к входному изображению для обнаружения различных признаков, таких как границы, текстуры и формы. Затем пулинговые слои уменьшают размерность изображения, сохраняя важные признаки. После этого полносвязные слои используют эти признаки для классификации или регрессии. CNN имеют несколько преимуществ по сравнению с другими моделями машинного обучения для анализа фотографий.

RNN нашли себе применение в синтезе и распознавании речи, машинном переводе [12]. Это тип нейронной сети, в которой выходные данные предыдущего шага подаются в качестве входных данных для текущего шага. В традиционных нейронных сетях все входы и выходы независимы друг от друга, но в случаях, когда нужно предсказать следующее слово предложения, требуются предыдущие слова и, следовательно, возникает необходимость запомнить предыдущие слова. RNN решает данную проблему с помощью скрытого слоя. Основной и наиболее важной особенностью RNN является ее скрытое состояние, которое запоминает некоторую информацию о последовательности.

FNN используются для решения задач анализа данных, автоматического распознавания, прогнозирования и принятия решений на основе данных. Такие сети работают в одном направлении – они передают информацию от входа к выходу. В FNN все нейроны собираются по слоям, которые состоят из входных, скрытых и выходных клеток. В пределах одного слоя нейроны не связаны между собой, но соседние слои полностью связаны.

Обучение нейронных сетей

Алгоритмы обучения нейронных сетей можно разделить на два больших класса: с учителем и без учителя.

Обучение с учителем означает, что сеть принимает значения как входных, так и некоторых выходных значений. В самом начале требуется разметить входные значения, для которых известны результаты. На процессе обучения нейросеть делает предсказания на основе весов, затем их сравнивает с известным результатом. Если предсказание нейросети не совпадает с ожидаемым результатом, то происходит процесс, называемый обратным распространением ошибки. В ходе него вычисляется, насколько каждый вес внутри нейросети способствовал общей ошибке. Затем эти веса корректируются в направлении, которое уменьшит ошибку [13]. Далее происходит процесс повторения до тех пор, пока ошибки предсказания ожидаемого результата будут минимальными. Последним этапом является тестирование нейронной сети на новых данных.

При обучении без учителя нейронная сеть самостоятельно формирует выходы. В отличие от обучения с учителем, в подготовке данных не требуется их разметка. Нейросеть сама классифицирует входные данные. Это может быть кластеризация (группировка похожих объектов), поиск аномалий (выявление объектов, которые отличаются от большинства) [13].

Применение нейронных сетей

Деструктивные воздействия снижают качество радиосвязи и усложняют передачу информации за счет ее уничтожения, искажения или блокирования. Для их анализа могут использоваться приборы типа анализатора спектра [14]. Анализатор спектра – это прибор, который позволяет измерять и анализировать спектральные характеристики сигнала. Он может обнаруживать наличие и интенсивность различных спектральных составляющих информационного сигнала, что в итоге позволяет выявить деструктивное воздействие и провести его анализ. Для детектирования объектов, полученных при использовании анализатора спектра, на изображении наилучшим образом подходит сеть структуры CNN. Эффективным алгоритмом обнаружения объектов на базе сверточной нейронной сети является YOLO. Это быстрый одноэтапный метод обнаружения объектов, включающий входной сегмент, магистраль, шею и выходной сегмент [15].

Входной сегмент выполняет увеличение данных мозаики, адаптивный расчет привязки и адаптивное заполнение оттенков серого на входном изображении. Магистральная сеть и шейный модуль образуют центральные структуры сети YOLOv8.

Входное изображение обрабатывается несколькими модулями Conv и C2f для извлечения карт объектов в разных масштабах. Модуль C2f представляет собой улучшенную версию исходного модуля C3 и функционирует как основной модуль остаточного обучения. На рис. 2 изображена базовая структура алгоритма. Выходные карты объектов обрабатываются модулем Spatial Pyramid Pooling Fusion (далее – SPPF) [16]. Целью SPPF является предоставление многомасштабного представления входных карт объектов. Объединяя данные в разных масштабах, SPPF позволяет модели захватывать функции на разных уровнях абстракции. Это полезно, когда может потребоваться обнаружение объектов разных размеров.

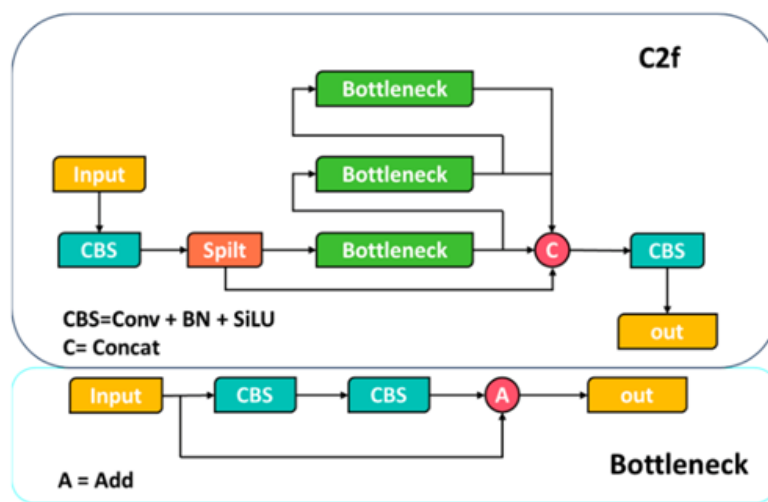


Рис. 2. Структурная схема модуля C2f

Слой шеи YOLOv8 включает структуру FPN + PAN для улучшения возможностей объединения функций модели (рис. 3). Эта структура объединяет карты объектов высокого и низкого уровня с использованием методов повышающей и понижающей дискретизации, облегчая передачу семантических функций и функций локализации. Благодаря такому подходу сеть становится лучше приспособлена для объединения функций объектов разных масштабов, тем самым повышая производительность обнаружения объектов разных масштабов.

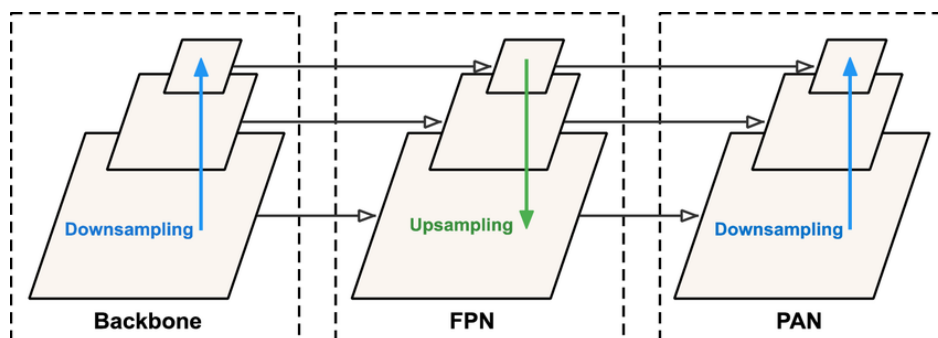


Рис. 3. Структура FPN PAN

Расчет потерь включает в себя две составляющие: классификацию и регрессию, исключая ветвь «Объектность». Ветвь классификации использует потери двоичной перекрестной энтропии, а ветвь регрессии использует функции потерь распределения фокуса (Distribution Focal Loss – далее DFL) и CIoU.

Основная идея DFL заключается в решении проблемы дисбаланса классов в обучающих данных, что может привести к снижению производительности при обучении детекторов объектов.

Чтобы вычислить DFL для потерь локализации, предсказанные координаты рамки (x, y, w, h) дискретизируются в ячейки с использованием предварительно определенного количества шагов. Затем бины используются для расчета распределения вероятностей в диапазоне возможных значений для каждого признака. Под бином понимается модель нейрона, которая принимает двоичные значения входных данных и выдает двоичный выход. Это прогнозируемое распределение сравнивается с истинным распределением соответствующей функции, которое рассчитывается на основе точных координат объекта на изображении в обучающих данных. Затем DFL рассчитывается как взвешенная сумма отрицательного логарифма предсказанных вероятностей для положительных выборок с весами, основанными на распределении выборок для каждого бина.

Оценки классификации представлены двумерной матрицей, указывающей наличие объекта в каждом пикселе. Координаты регрессии представлены четырехмерной матрицей, указывающей отклонение центра объекта от каждого пикселя. Предсказываются два показателя: ограничительные рамки и вероятности нахождения в них нужного объекта. Размерность и положение ограничительных рамок вокруг объекта на изображении (рис. 4) вычисляются по формулам:

$$\begin{cases} b_x = \sigma(t_x) + c_x; \\ b_y = \sigma(t_y) + c_y; \\ b_w = p_w e^{t_w}; \\ b_h = p_h e^{t_h}, \end{cases} \quad (2)$$

где t_x, t_y, t_w, t_h – предсказанные координаты центра рамки;

p_w, p_h – ширина и высота рамки;

c_x, c_y – смещение ячейки от верхнего левого угла изображения.

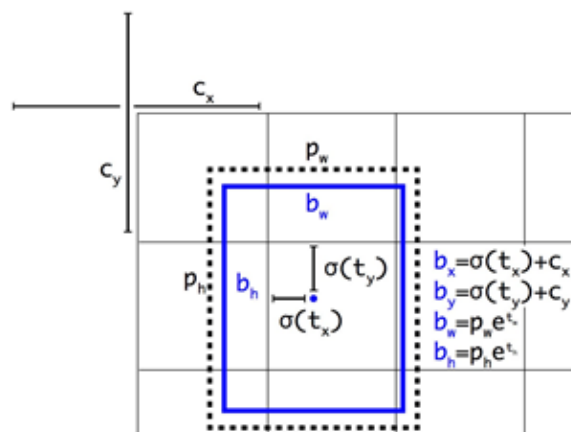


Рис. 4. Схематическое изображение расчета положения ограничительной рамки

Наконец, YOLOv8 использует средство назначения, ориентированное на задачу, для вычисления метрики выравнивания задач с использованием оценок классификации и координат регрессии. Метрика выравнивания задач объединяет оценки классификации со значением пересечения по объединению (далее – IoU), что позволяет одновременно оптимизировать классификацию и локализацию, подавляя при этом поля прогнозирования низкого качества.

IoU вычисляется по (3):

$$IoU = \frac{\text{Область пересечения}}{\text{Область объединения}}. \quad (3)$$

Эту формулу можно представить в виде рис. 5.

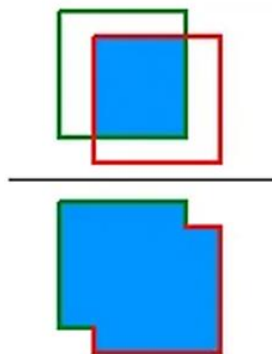


Рис. 5. Схематическое изображение метрики выравнивания задач IoU

Пересечение через объединение – это широко используемый показатель при обнаружении объектов, служащий для определения положительных и отрицательных образцов, а также для оценки расстояния между предсказанными блоками и основной истиной. Объект обычно классифицируется как обнаруженный, когда IoU превышает 0,5 [17, 18].

Дообучение модели машинного обучения YOLOv8 с собственным датасетом

Для решения задачи нахождения спектра деструктивного воздействия и объектов для анализа в спектре информационного сигнала требуются две модели, определяющие на изображении объекты, которые понадобятся для дальнейшей работы алгоритма.

Для удобства создания и разметки датасета используется сервис Roboflow. Разметка производится таким образом, что нужная нам рамка объекта соответствует координатам (n, x, y, w, h) , где n – номер класса объекта, x – относительная координата объекта по оси Ox , y – относительная координата объекта по оси Oy , w – относительная ширина объекта, h – относительная высота объекта.

Датасет разбит на три части: тренировочная часть, валидационная и тестовая части в отношении соответственно 85 %, 10 %, 5 %.

Обучение первой модели происходит на исходных изображениях (первый датасет), полученных с использованием анализатора спектра FSH8.

Пример разметки первого и второго датасета представлен на рис. 6.

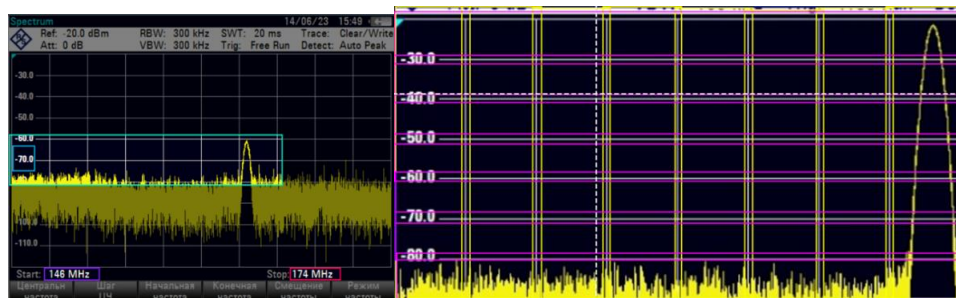


Рис. 6. Разметка датасетов

Созданные датасеты экспортируются с платформы Roboflow в Google Colab. Обучение модели нейронной сети происходит в облачной среде Google Colab с использованием графического процессора. Для обучения модели нейронной сети необходима библиотека ultralytics, чтобы импортировать модуль YOLO. Обучение происходит на параметрах нейронной сети: $epoch=350$, $bath=8$, $patience=0$. Epoch – аргумент, характеризующий количество прохода датасета через нейронную сеть в прямом и обратном направлении. Под bath понимается число тренировочных объектов. Patience используется для остановки обучения модели нейронной сети, если результат с каждой эпохой не меняется. Значение 0 означает, что остановки не произойдет.

После завершения обучения получаем графики, характеризующие зависимость ошибок от количества эпох обучения моделей, которые представлены на рис. 7.

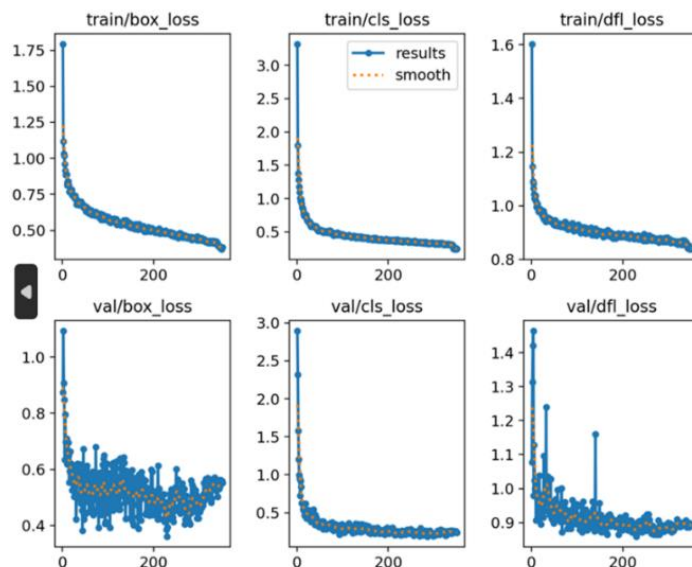


Рис. 7. График обучения модели на основе первого датасета

На графике видно насколько хорошо модель может найти объект внутри ограничивающей рамки, что соответствует box_loss . cls_loss отвечает за правильную классификацию обнаруженных объектов. dfl_loss используется для устранения дисбаланса классов в процессе обнаружения объектов. По отдельности каждая из этих потерь отражает отдельный аспект процесса обнаружения объекта. Все они вносят свой вклад в общие потери модели, которые, по сути, отражают общую производительность модели по всем этим аспектам.

Разработка интеллектуального программного модуля (скрипта) для автоматического анализа характеристик спектра информационного сигнала

Механизм анализа ширины спектра и мощности деструктивного воздействия при обработке спектра информационного сигнала с применением алгоритмов искусственного интеллекта. Для разработки механизма, позволяющего анализировать ширину спектра и мощность деструктивного воздействия в спектре информационного сигнала, воспользуемся программным обеспечением Tesseract и разработанными моделями машинного обучения, предсказывающими координаты рамки. Указанное программное обеспечение будем использовать для распознавания текста на изображениях.

Механизм анализа ширины спектра и мощности деструктивного воздействия в спектре информационного сигнала представляет собой четырехэтапный алгоритм (рис. 8):

- на первом этапе необходимо подать на вход одно изображение или папку с изображениями, подвергаемыми анализу;
- на втором этапе, используя модели машинного обучения, происходит обнаружение рамок объектов и сохранение их в отдельные папки;
- на третьем этапе происходит распознавание текста на анализируемых изображениях;
- на четвертом этапе формируются количественные показатели ширины спектра и мощности деструктивного воздействия в спектре информационного сигнала.

На основе обнаружения объектов, разработанных моделей машинного обучения и программного обеспечения распознавания текста разработан интеллектуальный программный модуль (скрипт),

позволяющий автоматически анализировать характеристики деструктивного воздействия в спектре информационного сигнала (рис. 9).



Рис. 8. Блок-схема алгоритма автоматического анализа характеристик спектра деструктивного воздействия

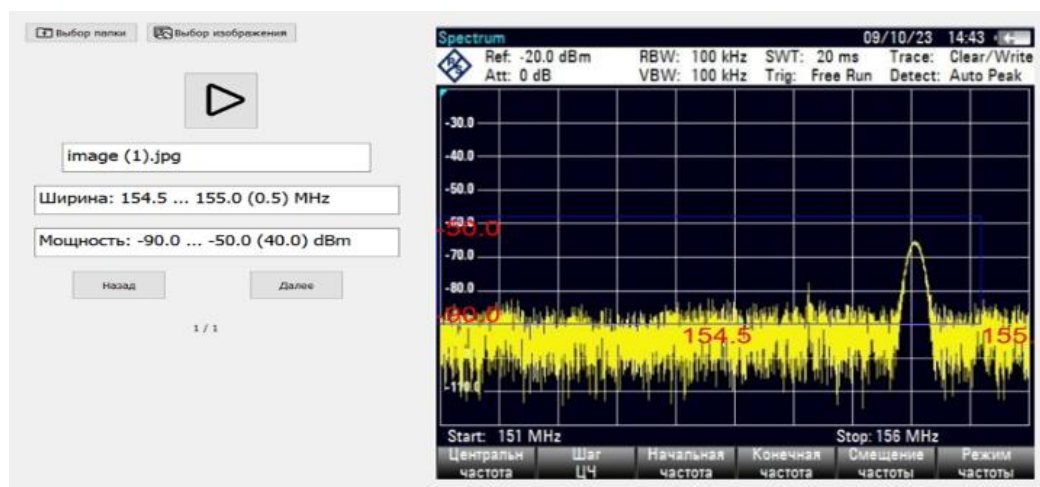


Рис. 9. Пример работы интеллектуального программного модуля (скрипта) для автоматического анализа спектра информационного сигнала

Выводы

В работе предложен способ реализации интеллектуального программного модуля на основе аппарата нейронных сетей для визуализации и автоматического анализа характеристик спектров информационного сигнала и деструктивных воздействий. Приведена процедура выбора и создания модели машинного обучения, позволяющей выявлять наличие деструктивного воздействия и его признаков. Разработаны алгоритм выделения характеристик мощности и ширины спектра деструктивного воздействия в спектре информационного сигнала и интеллектуальный программный модуль (скрипт) для их автоматического анализа. Механизм анализа ширины спектра и мощности деструктивного воздействия при обработке спектра информационного сигнала интеллектуальным программным модулем зарегистрирован, и получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [17]. Предложенный программный модуль может применяться в системах железнодорожной радиосвязи для обеспечения бесперебойного обмена информацией между диспетчером и подвижным составом за счет автоматизации мониторинга спектров информационных сигналов и своевременного обнаружения деструктивных воздействий с использованием технологии искусственного интеллекта.

Список литературы

1 **Хохлов, Н. С.** Анализ некоторых уязвимостей информационной безопасности системы беспроводной связи стандарта DMR / Н. С. Хохлов, С. В. Канавин, И. В. Гилев // Вестник Воронежского института МВД России. – 2022. – № 1. – С. 9–17. – ISSN 2071-3584.

2 **Хохлов, Н. С.** Модель противодействия угрозам разрушения информации в системах связи специального назначения при деструктивных воздействиях / Н. С. Хохлов, С. В. Канавин, И. В. Гилев // Вестник Воронежского института МВД России. – 2023. – № 1. – С. 106–117. – ISSN 2071-3584.

3 Оптическое распознавание символов в Raspberry Pi с помощью Tesseract. – URL: <https://microkontroller.ru/raspberrypi/projects/opticheskoe-raspoznavanie-simvolov-v-raspberry-pi-s-pomoshhyu-tesseract> (дата обращения: 18.10.2023).

4 **Сирота, А. А.** Анализ алгоритмов поиска объектов на изображениях с использованием различных модификаций сверточных нейронных сетей / А. А. Сирота, Е. Ю. Митрофанова, А. И. Милованова // Вестник Воронежского государственного университета. Серия : Системный анализ и информационные технологии. – 2019. – № 3. – С. 123–137. – ISSN 1995-5499.

5 **Чорбаа, Н. А.** Сравнительный анализ методов детектирования объектов на радиолокационных изображениях при помощи нейронных сетей / Н. А. Чорбаа, А. Ту. Ле, И. М. Толстой // Научный результат. Информационные технологии. – 2020. – Т. 5, № 4. – С. 15–25. – ISSN 2518-1092.

6 Применение искусственных нейронных сетей для анализа мультиспектральных изображений / М. Ю. Альес, Е. А. Антонов, А. И. Калугин, М. Р. Зарипов // Оптический журнал. – 2021. – Т. 88, № 8. – С. 48–53. – ISSN 1023-5086.

7 **Черниговский, А. В.** Нейронные сети как инструмент анализа сетевого трафика / А. В. Черниговский, М. В. Кривов // Вестник Ангарского государственного технического университета. – 2019. – № 13. – С. 151–157. – DOI 10.36629/2686-777x-2019-1-13-151-157.

8 К вопросу обеспечения защищенного доступа к информационным системам с применением биометрической аутентификации на основе нечеткого образа личности пользователя и нейросетевых преобразований. / О. И. Бокова, С. В. Канавин, Н. С. Хохлов [и др.] // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2023. – № 50 (4). – С. 75–84. – DOI 10.21822/2073-6185-2023-50-4-75-84.

References

1 **Khokhlov, N. S.** Analysis of some information security vulnerabilities of the wireless communication system of the DMR standard / N. S. Khokhlov, S. V. Kanavin, I. V. Gilev // Bulletin of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia. – 2022. – No. 1. – P. 9–17. – ISSN 2071-3584.

2 **Khokhlov, N. S.** Model of countering threats of information destruction in special-purpose communication systems under destructive influences / N. S. Khokhlov, S. V. Kanavin, I. V. Gilev // Bulletin of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia. – 2023. – No. 1. – P. 106–117. – ISSN 2071-3584.

3 OCR on Raspberry Pi using Tesseract. – URL: <https://microkontroller.ru/raspberrypi/projects/opticheskoe-raspoznavanie-simvolov-v-raspberry-pi-s-pomoshhyu-tesseract> (date of access: 10/18/2023).

4 **Sirota, A. A.** Analysis of algorithms for searching objects in images using various modifications of convolutional neural networks / A. A. Sirota, E. Yu. Mitrofanova, A. I. Milovanova // Bulletin of Voronezh State University. Series: System analysis and information technologies. – 2019. – No. 3. – P. 123–137. – ISSN 1995-5499.

5 **Chorbaa, N. A.** Comparative analysis of methods for detecting objects on radar images using neural networks / N. A. Chorbaa, A. Tu. Le, I. M. Tolstoy // Scientific result. Information Technology. – 2020. – Vol. 5, No. 4. – P. 15–25. – ISSN 2518-1092.

6 Application of artificial neural networks for the analysis of multispectral images / M. Yu. Alyes, E. A. Antonov, A. I. Kalugin, M. R. Zaripov // Optical Journal. – 2021. – Vol. 88, No. 8. – P. 48–53. – ISSN 1023-5086.

7 **Chernigovsky, A. V.** Neural networks as a tool for analyzing network traffic / A. V. Chernigovsky, M. V. Krivov // Bulletin of the Angarsk State Technical University. – 2019. – No. 13. – P. 151–157. – DOI 10.36629/2686-777x-2019-1-13-151-157.

8 On the issue of ensuring secure access to information systems using biometric authentication based on a fuzzy image of the user's personality and neural network transformations. / O. I. Bokova, S. V. Kanavin, N. S. Khokhlov [et al.] // Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science. – 2023. – No. 50 (4). – P. 75–84. – DOI 10.21822/2073-6185-2023-50-4-75-84.

9 **Фисун, В. В.** Искусственный интеллект управления информационной безопасностью объектов критической информационной инфраструктуры: монография / В. В. Фисун. – Москва : Русайнс, 2023. – 360 с. – ISBN 9785436597232.

10 **Климов, С. М.** Противодействие компьютерным атакам. Методические основы / С. М. Климов, М. П. Сычев, А. В. Астрахов. – Москва : МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2013. – 108 с.

11 **Шелухин, О. И.** Сетевые аномалии. Обнаружение, локализация, прогнозирование: монография / О. И. Шелухин. – Москва : Горячая линия – Телеком, 2020. – 447 с. – ISBN 978-5-9912-0756-0.

12 **Элбон, К.** Машинное обучение с использованием Python. Сборник рецептов : перевод с английского / К. Элбон. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2019. – 384 с. – ISBN 978-5-9775-4056-8.

13 FSH8 портативный анализатор спектра. – URL: <https://www.samarapribor.ru/main/fsh8.html> (дата обращения: 18.10.2023).

14 BL-YOLOv8 : An Improved Road Defect Detection Model Based on YOLOv8. – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/20/8361#B19-sensors-23-08361> (дата обращения: 18.10.2023).

15 **Преснецов, А. М.** Разработка программно-аппаратного комплекса для мониторинга производственной деятельности с использованием нейросети YOLOV8 / А. М. Преснецов, А. П. Тюрин // Интеллектуальные системы в производстве. – 2023. – Т. 21, № 2. – С. 140–151. – ISSN 1813-7911.

16 **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU, № 2023688381.** Интеллектуальный программный модуль для автоматизированного анализа характеристик спектров информационного сигнала и деструктивных воздействий. / Р. В. Ртищев, И. В. Гилев, С. В. Канавин, Н. С. Хохлов. – № 2023687782 ; заявл. 08.12.2023 ; опублик. 21.12.2023, Бюл. № 1. – 1 с.

17 **Постолиит, А. В.** Основы искусственного интеллекта в примерах на Python. Самоучитель / А. В. Постолиит. – 2-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2024. – 448 с. – ISBN 978-5-9775-1818-5.

9 **Fisun, V. V.** Artificial intelligence for managing information security of critical information infrastructure objects: monograph / V. V. Fisun. – Moscow : Rusigns, 2023. – 360 p. – ISBN 9785436597232.

10 **Klimov, S. M.** Countering computer attacks. Methodological foundations. / S. M. Klimov, M. P. Sychev, A. V. Astrakhov. – Moscow : MSTU named after N. E. Bauman, 2013. – 108 p.

11 **Shelukhin, O. I.** Network anomalies. Detection, localization, forecasting: monograph / O. I. Shelukhin. – Moscow : Hotline – Telecom, 2020. – 447 p. – ISBN 978-5-9912-0756-0.

12 **Albon, K.** Machine learning using Python. Collection of recipes : Transl. from English / K. Elbon. – Saint Petersburg : BHV-Petersburg, 2019. – 384 p. – ISBN 978-5-9775-4056-8.

13 FSH8 portable spectrum analyzer. – URL: <https://www.samarapribor.ru/main/fsh8.html> (date of access: 10/18/2023).

14 BL-YOLOv8 : An Improved Road Defect Detection Model Based on YOLOv8. – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/20/8361#B19-sensors-23-08361> (date of access: 10/18/2023).

15 **Presnetsov, A. M.** Development of a hardware and software complex for monitoring production activities using the YOLOV8 neural network / A. M. Presnetsov, A. P. Tyurin // Intelligent systems in production. – 2023. – Vol. 21, No. 2. – P. 140–151. – ISSN 1813-7911.

16 **Certificate of state registration of the computer program RU, No. 2023688381** dated December 21, 2023. Intelligent software module for automated analysis of the characteristics of information signal spectra and destructive influences. / R. V. Rtishchev, I. V. Gilev, S. V. Kanavin, N. S. Khokhlov // No. 2023687782 ; application 12.08.2023, Bulletin. No. 1. – 1 p.

17 **Postolit, A. V.** Fundamentals of artificial intelligence in examples in Python. Self-instruction manual / A. V. Postolit. – 2nd ed., revised. and additional. – Saint Petersburg : BHV-Petersburg, 2024. – 448 p. – ISBN 978-5-9775-1818-5.

N. S. Khokhlov, O. I. Bokova, S. V. Kanavin, I. V. Gilev, R. V. Rtischev

DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT SOFTWARE MODULE BASED ON NEURAL NETWORKS FOR VISUALIZATION AND AUTOMATIC ANALYSIS OF CHARACTERISTICS OF INFORMATION SIGNAL SPECTRA AND DESTRUCTIVE IMPACTS

Abstract. The paper proposes a method for implementing an intelligent software module based on neural networks for visualization and automatic analysis of the characteristics of information signal spectra and destructive influences. A procedure is given for selecting and creating a machine learning model that allows identifying the presence of destructive effects and its signs. The neural network model is trained in a cloud environment using a GPU. A

specialized library was used to train the neural network model. Training is implemented on the parameters of the neural network, which characterize the number of times the dataset passes through the neural network in the forward and reverse directions. As a result of training, graphs were obtained characterizing the dependence of errors on the number of epochs of model training. An algorithm for identifying power characteristics, the width of the spectrum of destructive effects in the spectrum of an information signal, and an intelligent software module (script) for their automatic analysis has been developed. The mechanism for analyzing the spectrum width and power of destructive influence in the spectrum of an information signal includes software and machine learning models for recognizing text in images.

Keywords: intelligent software module; neural networks; automatic analysis of spectrum characteristics; destructive effects; machine learning model; an algorithm for automatic analysis of the characteristics of the information signal spectrum.

For citation: Development of an intelligent software module based on neural networks for visualization and automatic analysis of characteristics of information signal spectra and destructive impacts / N. S. Khokhlov, O. I. Bokova, S. V. Kanavin [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 1. – P. 158–168. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_158.

Сведения об авторах

Хохлов Николай Степанович

Воронежский институт МВД России,
кафедра «Инфокоммуникационных систем
и технологий»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: nikolayhohlov@rambler.ru

Бокова Оксана Игоревна

ООО «Каскад»,
доктор технических наук, профессор,
научно-технический консультант,
e-mail: o.i.bokova@gmail.com

Канавин Сергей Владимирович

Воронежский институт МВД России,
кафедра «Инфокоммуникационных систем
и технологий»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: sergejj-kanavin@rambler.ru

Гилев Игорь Владимирович

Воронежский институт МВД России,
кафедра «Инфокоммуникационных систем
и технологий»,
преподаватель,
e-mail: gileviv@bk.ru

Ртищев Роман Владимирович

Воронежский институт МВД России,
кафедра «Инфокоммуникационных систем
и технологий»,
курсант радиотехнического факультета,
e-mail: gileviv@bk.ru

Information about the authors

Khokhlov Nikolai Stepanovich

Voronezh Institute of the Ministry of
Internal Affairs of Russia,
Chair «Infocommunication Systems
and Technologies»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: nikolayhohlov@rambler.ru

Bokova Oksana Igorevna

Cascade LLC,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Scientific and Technical Consultant,
e-mail: o.i.bokova@gmail.com

Kanavin Sergey Vladimirovich

Voronezh Institute of the Ministry of
Internal Affairs of Russia,
Chair «Infocommunication Systems
and Technologies»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: sergejj-kanavin@rambler.ru

Gilev Igor Vladimirovich

Voronezh Institute of the Ministry of
Internal Affairs of Russia,
Chair «Infocommunication Systems
and Technologies»,
Lecturer,
e-mail: gileviv@bk.ru

Rtischev Roman Vladimirovich

Voronezh Institute of the Ministry of
Internal Affairs of Russia,
Chair «Infocommunication Systems and
Technologies»,
Cadet of the Radio Engineering Faculty,
e-mail: gileviv@bk.ru

ТРАНСПОРТНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311, 621.331

DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_169

*С. А. Блинкова, А. В. Скольский***ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ИЗОЛЯТОРОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ**

Аннотация: Рассмотрены проблемы существующих способов диагностирования элементов контактной сети, представлен статистический анализ причин отказов элементов контактной сети за последнее время. Авторами описана методика оценки остаточного ресурса изоляторов, предложен способ усовершенствования методов диагностирования состояния изоляторов, а также способ внешнего диагностирования состояния изолятора для дальнейшего принятия решения о продлении срока его службы. Описан алгоритм диагностирования изоляторов с помощью применения беспилотных летательных аппаратов. Рассматриваемая тема будет интересна специалистам в области электроснабжения железнодорожного транспорта и внешнего электроснабжения энергетической системы. Вопрос о возможности применения БПЛА для диагностирования изоляторов требует дальнейшего изучения.

Ключевые слова: изолятор, диагностика элементов контактной сети, оценка остаточного ресурса, беспилотный летательный аппарат.

Для цитирования: Блинкова, С. А. Оценка остаточного ресурса изоляторов контактной сети / С. А. Блинкова, А. В. Скольский // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1. – С. 169–175. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_169.

Введение

Эффективное функционирование железнодорожного транспорта Российской Федерации играет важную роль в создании условий для модернизации, перехода на инновационный путь развития и устойчивого роста национальной экономики, способствует формированию технологического суверенитета страны [1]. Приоритетными задачами хозяйства электроснабжения являются полное и надежное энергетическое обеспечение перевозочного процесса, минимизация рисков, повлекших за собой отказы технических средств, оптимизация затрат в энергетике [2].

Отказом в контактной сети является нарушение ее нормальной работы, при котором она, как система, полностью или частично теряет способность выполнять свои функции по причине выхода за пределы установленных допусков или норм одного или нескольких из ее параметров [3]. Отказами в контактной сети являются:

- все повреждения, вызывающие снятие напряжения контактной сети, нарушение токосъема, уменьшение скорости движения или количества поездов, их остановка за время проведения ремонтных работ и т.д. Отказы этой группы обычно требуют направления ремонтной бригады на место возникновения отказа;

- все повреждения элементов контактной сети, которые установлены обслуживающим персоналом во время выполнения запланированного объема работ по текущему содержанию и ремонту контактной сети;

- все нарушения допускаемых значений основных геометрических и механических параметров контактной сети.

Основными направлениями для развития систем диагностики выступают [4]:

- разработка автоматизированной системы прогнозирования состояния контактной сети по данным мобильных средств контроля геометрии контактной сети, которая позволит выявлять потенциально опасные места до выхода отклонений контактной сети за предельно допустимые значения при изменении внешних условий – повышении (понижении) температуры, повышении скорости ветра, образовании гололеда;

- автоматизация получения оценки остаточного ресурса элементов (объектов) железнодорожного электроснабжения;

- совершенствование программного обеспечения мобильных средств диагностики для автоматизированной обработки видеофайлов и выявления отклонений в содержании узлов контактной сети (выявление отступлений в содержании узлов заземлений контактной сети, узлов анкеровки,

дефектных изоляторов и мест повышенного нагрева) с максимальным исключением привлечения человека.

На рис. 1 представлен статистический анализ причин отказов в контактной сети (КС) за 2016, 2019 и 2022 годы. По результатам анализа видно, что наибольшее количество отказов приходится на такие элементы контактной сети, как провода КС, изоляторы, зажимы и струны КС. Разработка способов уменьшения количества отказов в данных элементах является приоритетной, так как приведет к наиболее эффективному результату.

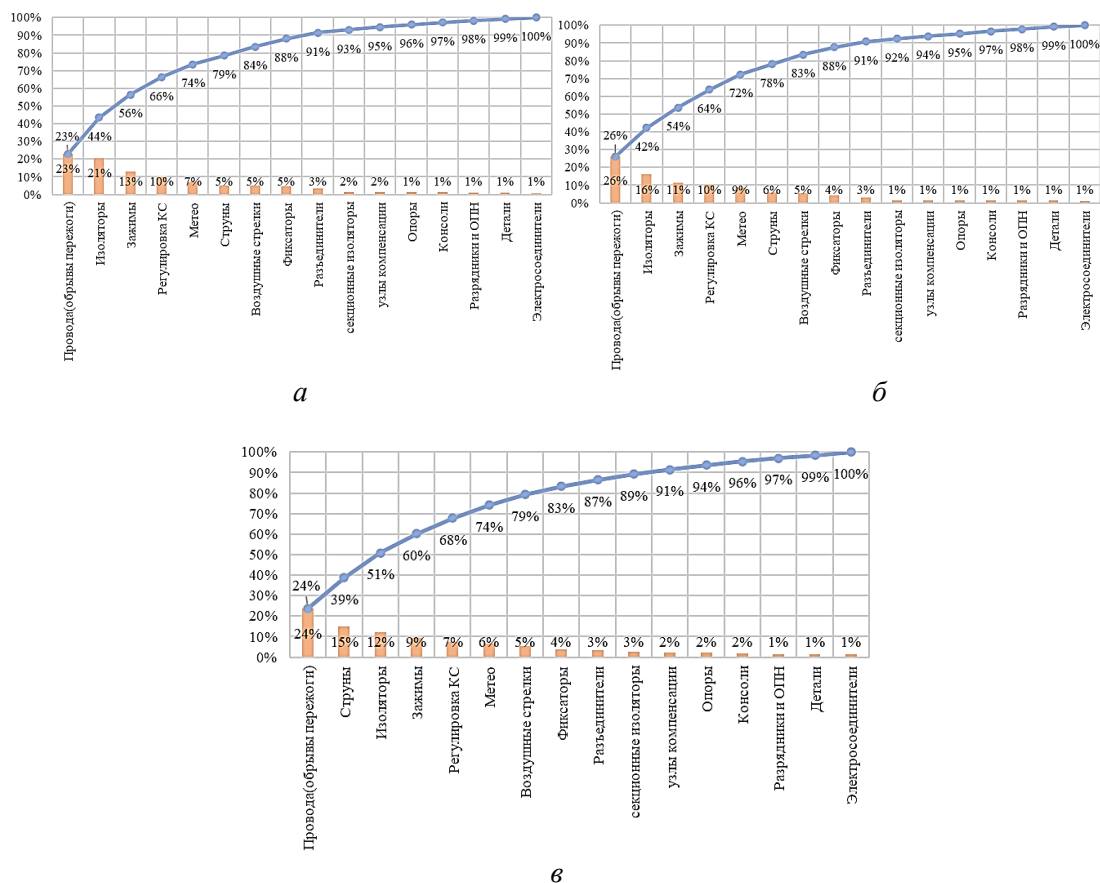


Рис. 1. Статистический анализ причин отказов контактной сети за 2016 г. (а), 2019 г. (б), 2022 г. (в)

Количество отказов можно уменьшить за счет модернизации оборудования или улучшения способов диагностики оборудования. Поскольку на элементы КС влияет большое количество внешних факторов, то экономически выгодно улучшать методы диагностики состояния оборудования, производить расчет остаточного ресурса и на основе результатов осуществлять своевременный ремонт или замену оборудования. В данной статье рассмотрена оценка остаточного ресурса изоляторов. Доля отказов по причине разрушения изоляторов составляет от 12 до 21 % от общего числа отказов элементов КС. Несмотря на то что процент отказов по причине разрушения изоляторов уменьшается, фактическое число отказов увеличивается.

Изоляторы относятся к наиболее значимым элементам КС. Оценка значимых элементов происходит по трем критериям: безопасность, надежность и эффективность [5, 6].

К критерию «Безопасность» относятся показатели, величины которых равны или превышают предельно допустимые показатели. Показатели, величины которых не превышают предельно допустимые значения, относятся к критерию «Надежность». Экономические показатели, определяющие целесообразность продолжения эксплуатации элемента или его замены, относятся к критерию «Эффективность». Фактический остаточный ресурс определяется на основе первых двух критериев [7, 8].

Для оценки остаточного ресурса вводится показатель « B_i » – балльность параметра, который соответствует техническому состоянию элемента относительно стобалльной системы. Если измеренное значение параметра превышает допустимое, то параметру присваивается 100 баллов:

$$B_i = \frac{S_{\text{факт}}}{S_{\text{доп}}} \cdot 100, \quad (1)$$

где $S_{\text{факт}}$ – измеренное значение параметра; $S_{\text{доп}}$ – допустимое значение параметра.

При визуальном осмотре изолятора по критерию «Безопасность» начисляются баллы за следующие пункты:

- загрязнение более 1/3 поверхности изолятора;
- коррозия более 12 мм диаметра стержня;
- наличие трещин, качания, сползания или проворачивания в заделке;
- видимое искривление деталей;
- отсутствие или нарушение влагостойкого покрытия цементного шва;
- повреждение антикоррозийного покрытия или видимых следов коррозии на нем;
- сколы более 60 мм длиной и 5 мм глубиной на ребрах фарфора проходных, опорных и стержневых изоляторов;
- сколы общей площадью более 300 мм² на ребрах фарфора подвесных изоляторов;
- сколы общей площадью более 300 мм², если они находятся ближе 10 мм от места сопряжения ребер с основным телом, на ребрах фарфора стержневых изоляторов;
- наличие у фарфоровых изоляторов глубоких царапин длиной более 25 мм;
- видимые трещины, ожоги дугой, вскрытые пузыри или другие повреждения глазури;
- наличие трещин, сколов, посечек, складок, натеков, оплавлений дугой, видимых внутренних газовых пузырей у стеклянных изоляторов;
- наличие механических повреждений, разгерметизации и следов токопроводящих дорожек длиной, равной 1/3 от пути утечки тока у полимерных изоляторов.

При проведении приборной диагностики начисляются штрафные баллы за нарушение изоляции (сопротивление изоляции меньше 300 МОм), за ток утечки менее 10 мкА и при нарушении в распределении напряжения на изоляторе [9, 10].

Остаточный ресурс элемента рассчитывается по параметру с максимальным значением балльности « B_i »:

$$T_{\text{ост}} = T_{\text{факт}} \left(\frac{100}{B_i} - 1 \right), \quad (2)$$

где $T_{\text{факт}}$ – фактический срок службы, лет; B_i – максимальная балльность.

Если балльность « B_i » одного из параметров достигает 100, то считаем, что элемент объекта выработал весь свой срок службы.

При визуальном осмотре изолятора по критерию «Надежность» начисляются баллы:

- за загрязнение изолятора до 1/3 поверхности;
- коррозию стержня до 12 мм;
- сколы ребер в фарфоре изоляторов длиной 60 мм и глубиной 5 мм;
- глубокие царапины в фарфоре длиной 25 мм.

При приборной диагностике измеряется сопротивление изоляции и ток утечки.

Для параметров «Надежность» производится аналогичный расчет, как и для параметров «Безопасность».

Если в процессе расчета объекта количество элементов, остаточный ресурс которых от 0 до 5 лет менее 60 %, необходимо производить ремонт и реконструкцию его отдельных элементов.

На основании расчета экономической эффективности принимается решение о продлении срока службы или о замене оборудования.

$$F = \overline{\text{СЖЦз}} - (1 + K_{\text{мод.}}) \cdot \overline{\text{СЖЦп}}, \quad (3)$$

где $\overline{\text{СЖЦз}}$ – среднегодовая стоимость жизненного цикла объекта в случае его замены; $\overline{\text{СЖЦп}}$ – среднегодовая стоимость жизненного цикла объекта в случае продления срока службы объекта; $K_{\text{мод.}}$ – коэффициент модернизации, определяющий границы, в случае которых при незначительном преимуществе в пользу решения о продлении принимается решение о замене оборудования.

Если « F » > 0 – продление срока службы экономически эффективно.

Если « F » ≤ 0 – продление срока службы экономически неэффективно.

Данный тип диагностики проводится вручную, с помощью визуального осмотра изолятора. По результатам осмотра и проведенных расчетов принимается решение о продлении срока службы изолятора или его замене. Предлагается автоматизировать данный процесс с помощью применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и специализированного программного обеспечения. Алгоритм принятия решения о продлении службы изолятора представлен на рис. 2.

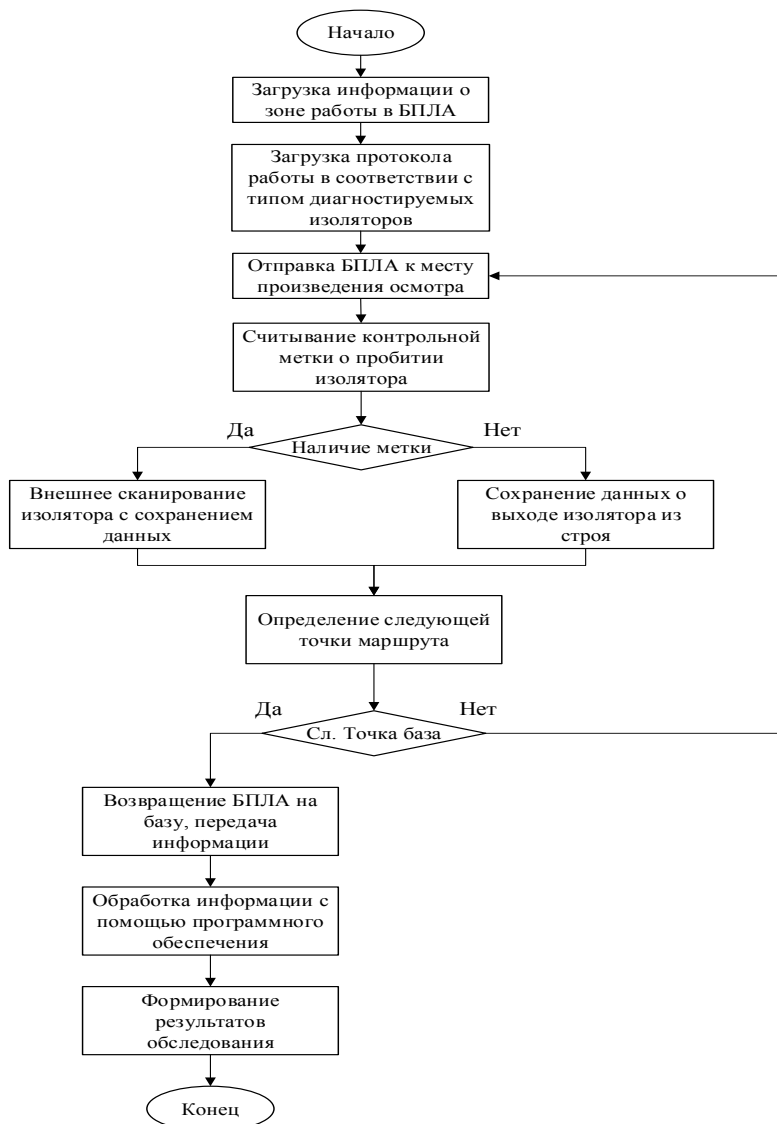


Рис. 2. Алгоритм принятия решения о продлении службы изолятора при использовании современных средств диагностики

Оператор БПЛА с помощью специального программного обеспечения указывает зону работы БПЛА, зона выбирается из расчета времени работы БПЛА с учетом времени на доставку БПЛА к месту проведения осмотра. Также учитывается, что объем работы БПЛА может ограничиваться объемом накопителя. Автоматически в зависимости от зоны проведения работ в БПЛА загружаются протоколы работы с типом изоляторов, установленных на данном участке. После определения маршрута и протоколов работы БПЛА отправляется на место проведения диагностики. По прибытии на место БПЛА считывает метку о пробитии изолятора. Нанесенная на изолятор метка из материала, реагирующего на протекание электрического тока, позволит визуально диагностировать пробитие изолятора. В случае обнаружении БПЛА метки проводится внешнее сканирование изолятора с записью видеофайла в память БПЛА с целью дальнейшего определения остаточного ресурса изолятора. Если метка не обнаружена, в памяти сохраняется информация о выходе изолятора из строя. После окончания сканирования изолятора БПЛА отправляется к следующему изолятору в маршруте и повторяет аналогичные действия. Маршрут БПЛА заканчивается возвращением на «Базу» для передачи информации на сервер для дальнейшей обработки. Информация с сервера обрабатывается программным обеспечением (ПО).

ПО определяет параметры визуального осмотра, т.е. площадь загрязнения изолятора, коррозию стержня, сколы ребер фарфора и т.д. На основании обработки информации принимается решение о продлении срока службы изолятора или о его замене. Указания передаются в соответствующие службы.

В представленном алгоритме визуальный осмотр изолятора электромонтерами заменяется обработкой видеофайла специализированным ПО, а целостность изолятора, которая проверялась в процессе приборной диагностики, определяется наличием специальной метки. Метка представляет собой полосу из определённого материала, нанесённую поперек изолятора. Метка не критично влияет на технические характеристики изолятора и в случае его пробития меняет свое состояние, тем самым сигнализирует о неисправности изолятора.

Заключение

Применение БПЛА является перспективным направлением в проведении диагностики, позволяет сократить ресурсы, затрачиваемые на проведение осмотров изоляторов электромонтерами, а также повысить надежность и безопасность энергетической системы. Использование БПЛА позволит увеличить количество осмотров, что положительно повлияет на скорость выявления аварийных изоляторов, а использование контрольной метки облегчит определение вышедших из строя изоляторов.

Список литературы

- 1 Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года : утверждена распоряжением Правительства РФ 17 июня 2008 г. № 877-р. – 171 с. – URL: <https://mintrans.gov.ru/documents.ru> (дата обращения: 18.02.2024).
- 2 Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года : утверждена президентом ОАО «РЖД» 14 декабря 2016 г. № 2537р. – 77 с. – URL: <https://company.rzd.ru> (дата обращения: 18.02.2024).
- 3 Управление Ресурсами, Рисками и Надежностью на этапах жизненного цикла : утверждено старшим вице-президентом ОАО «РЖД» 15 ноября 2012 г. – 40 с. – URL : <https://company.rzd.ru> (дата обращения: 18.02.2024).
- 4 **Блинкова, С. А.** Эволюция диагностики контактной сети / С. А. Блинкова, А. В. Скольский // Наука и образование транспорту. – 2023. – № 1. – С. 262–264. – EDN KDLTZK.
- 5 **Блинкова, С. А.** Единое информационное пространство в системе электроснабжения / С. А. Блинкова, М. А. Гаранин, А. В. Скольский // Вестник транспорта Поволжья. – 2023. – № 3 (99). – С. 7–12. – EDN DUTFVY.
- 6 **Гаранин, М. А.** Управление ресурсами, рисками и надежностью на объектах электроснабжения / М. А. Гаранин, С. А. Блинкова // Проблемы безопасности на транспорте : Материалы XII Международной научно-практической конференции, посвященной 160-летию Белорусской железной дороги. В 2 частях, Гомель, 24–25 ноября 2022 года / под общей редакцией Ю. И. Кулаженко. Т. Часть 1. – Гомель : Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», 2022. – С. 95–96. – EDN OPWGAJ.

References

- 1 Strategy for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030 : approved by the decree of the Government of the Russian Federation on June 17, 2008. No. 877-p. – 171 p. – URL: <https://mintrans.gov.ru/documents.ru> (date of access: 02/18/2024).
- 2 Energy strategy of the Russian Railways Holding for the period up to 2020 and for the future up to 2030 : approved by the President of JSC «Russian Railways» on December 14, 2016. No. 2537p. – 77 p. – URL: <https://company.rzd.ru> (date of access: 02/18/2024).
- 3 Management of Resources, Risks and Reliability at the stages of the life cycle : approved by the Vice-President of JSC «Russian Railways» on November 15, 2012. – 40 p. – URL: <https://company.rzd.ru> (date of access: 02/18/2024).
- 4 **Blinkova, S. A.** Evolution of the contact network diagnostics / S. A. Blinkova, A. V. Skolskii // Science and education for transport. – No. 1. – P. 262–264. – EDN KDLTZK.
- 5 **Blinkova, S. A.** Unified information space in the power supply system / S. A. Blinkova, M. A. Garanin, A.V. Skolskii // Vestnik transporta Povolzhya. – 2023. – No. 3 (99). – P. 7–12. – EDN DUTFVY.
- 6 **Blinkova, S. A.** Management of resources, risks and reliability at power supply facilities / M. A. Garanin, S. A. Blinkova // Transport safety issues : Materials of the XII International Scientific and Practical Conference dedicated to the 160th anniversary of the Belarusian Railway. In 2 parts, Gomel, November 24–25, 2022 / Under the general editorship of Yu. I. Kulazhenko. Vol. Part 1. – Gomel : Educational Institution «Belarusian State University of Transport», 2022. – P. 95–96. – EDN OPWGAJ.

7 **Гаранин, М. А.** Разработка цифровой модели для управления энергетическим комплексом / М. А. Гаранин, С. А. Блинкова // Вестник транспорта Поволжья. – 2019. – № 3 (75). – С. 22–27. – EDN JSYDYX.

8 **Гаранин, М. А.** Использование методологии управления ресурсами, рисками и надежностью на этапах жизненного цикла в хозяйстве электрификации и электроснабжения / М. А. Гаранин, С. А. Блинкова // Инновации в системах обеспечения движения поездов : Материалы I Международной научно-практической конференции, Самара, 19–20 мая 2016 года / Министерство транспорта Российской Федерации ; Федеральное агентство железнодорожного транспорта ; Самарское региональное отделение Российской академии транспорта ; ФГБОУ ВО «Самарский государственный университет путей сообщения» (СамГУПС) ; Куйбышевская железная дорога – филиал ОАО «Российские железные дороги». – Самара : Самарский государственный университет путей сообщения, 2016. – С. 63–67. – EDN XSUPCL.

9 **Гаранин, М. А.** Обновление устройств электроснабжения для организации скоростного и тяжеловесного движения / М. А. Гаранин, С. А. Блинкова // Наука и образование транспорту. – 2017. – № 1. – С. 224–226. – EDN YMHSUU.

10 Цифровая линия электропередач / Е. В. Добрынин, С. А. Блинкова, А. М. Батищев, М. А. Гузитаева // Нефть. Газ. Новации. – 2021. – № 9 (250). – С. 84–88. – EDN SFYUHT.

7 **Garanin, M. A.** Development of a digital model for energy complex management / M. A. Garanin, S. A. Blinkova // Vestnik transporta Povolzhya. – 2019. – No. 3 (75). – P. 22–27. – EDN JSYDYX.

8 **Garanin, M. A.** Using the methodology of resource, risk and reliability management at the stages of the life cycle in the electrification and power supply sector / M. A. Garanin, S. A. Blinkova // Innovations in Train Traffic Support systems : Materials of the I International Scientific and Practical Conference, Samara, May 19–20, 2016 / Ministry of Transport of the Russian Federation; Federal Agency for Railway Transport; Samara Regional Branch of the Russian Academy of Transport; Samara State University of Railway Engineering (SamGUPS); Kuibyshev Railway – branch of JSC Russian Railways. – Samara : Samara State University of Railway Engineering, 2016. – P. 63–67. – EDN XSUPCL.

9 **Garanin, M. A.** Updating of power supply devices for the organization of high-speed and heavy traffic / M. A. Garanin, S. A. Blinkova // Science and education for transport. – 2017. – No. 1. – P. 224–226. – EDN YMHSUU.

10 Digital power transmission line / E. V. Dobrynin, S. A. Blinkova, A. M. Batishev, M. A. Guzitaeva // Oil. Gas. Innovations. – 2021. – No. 9 (250). – P. 84–88. – EDN SFYUHT.

S. A. Blinkova, A. V. Skolskiy

ASSESSMENT OF THE RESIDUAL LIFE OF CONTACT NETWORK INSULATORS

Abstract. The paper considers the problems of existing methods of diagnosing elements of the contact network. It has been presented a statistical analysis of the causes of failures of elements of the contact network in recent years. The authors describe a methodology for assessing the residual life of insulators and propose a way to improve methods for diagnosing the condition of insulators. The authors propose a method for external diagnosis of the condition of the insulator for further decision-making on extending its service life. An algorithm for diagnosing insulators using the use of unmanned aerial vehicles is described. The topic under consideration will be of interest to specialists in the field of power supply of railway transport and external power supply of the energy system. The issue of the possibility of using UAVs to diagnose insulators requires further study.

Keywords: insulator, diagnostics of contact network elements, residual resource assessment, unmanned aerial vehicle.

For citation: Blinkova, S. A. Assessment of the residual life of contact network insulators / S. A. Blinkova, A. V. Skolskiy // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No 1. – P. 169–175. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_169.

Сведения об авторах**Блиноква Светлана Александровна**

Самарский государственный университет
путей сообщения (СамГУПС),
кандидат технических наук, доцент,
декан электротехнического факультета,
e-mail: blinkova@samgups.ru

Скольский Андрей Владимирович

Самарский государственный университет
путей сообщения (СамГУПС),
аспирант,
e-mail: a.skolski@samgups.ru

Information about the authors**Blinkova Svetlana Aleksandrovna**

Samara State Transport University (SSTU),
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
Dean of the Electrical Engineering Faculty,
e-mail: blinkova@samgups.ru

Skolskiy Andrey Vladimirovich

Samara State Transport University (SSTU),
Postgraduate Student,
e-mail: a.skolski@samgups.ru

В. В. Доманский

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА АНАЛИЗА ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В ТЯГОВЫХ СЕТЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ДЛЯ НАПОЛНЕНИЯ БАЗ ДАННЫХ

Аннотация. Рассмотрена методика по созданию интеллектуальных систем анализа потерь энергии в тяговых сетях, включая цели, задачи, функциональный состав, структуру, а также информационные базы интеллектуальной системы. Выделены направления исследований по оптимизации режимов электропотребления, структуры баз данных и баз знаний. Разработаны методы и средства для измерения потерь энергии в тяговых сетях и тяговых трансформаторах современными микропроцессорными счетчиками. В рамках разрабатываемой интеллектуальной системы исследована задача оценки потерь энергии в тяговых сетях и трансформаторах и эффективности системы электроснабжения тяги поездов. Выявлены факторы, влияющие на составляющие электропотребления, получены обобщающие зависимости потерь энергии для включения их в базы знаний экспертных систем.

Ключевые слова: потери энергии, тяговая сеть, тяговые трансформаторы.

Для цитирования: Доманский, В. В. Интеллектуальная система анализа потерь энергии в тяговых сетях переменного тока для наполнения баз данных / В. В. Доманский // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1. – С. 176–185. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_176.

Введение

Реализация интеллектуальных систем управления электроснабжением (ИСУЭ) позволяет обеспечить экономию электроэнергии в процессе перевозок, повышение энергетической эффективности и надежности тяговых сетей, максимальное снижение потерь и улучшение качества электроэнергии. Важнейшей задачей минимизации потерь является выбор рациональных масс поездов и интервалов в движении и энергоэффективных режимов систем электроснабжения тяги [1–4]. Тип структуры ИСУЭ выбран иерархический трехуровневый. Нижний уровень – технологическое управление объектами и процессами на тяговых подстанциях и электротяговой сети. Средний – дистанции электроснабжения. Верхний уровень – оперативно-диспетчерское, организационно-экономическое и техническое управление службы электроснабжения дороги.

Устройства электроснабжения железных дорог с начала внедрения электрической тяги непрерывно совершенствовались [4–7]. В настоящее время этот процесс становится более эффективным и целенаправленным на ресурсо- и энергосбережение [5]. Все большее внимание уделяется средствам измерения, системам учета и управления, позволяющим экономить электроэнергию при реализации процесса перевозок. К таким средствам относятся и микропроцессорные многотарифные счетчики расходов и потерь энергии, которые при дистанционном считывании накопленной в них информации и обработки её экспертными системами способствуют формированию оптимальных управляющих решений [8–10]. Измеряя потери энергии в тяговой сети счетчиками потерь, можно фиксировать время неявных перетоков и ставить вопрос перед энергосистемой о снижении тарифов за оплату электроэнергии, учитывая эксплуатацию устройств тягового электроснабжения.

Целью работы является разработка метода и аппаратуры для расчета в сложных схемах питания потерь энергии в тяговых сетях и трансформаторах.

Модель расчета энергопотерь в электротяговой сети

Для любых схем питания в электротяговой сети переменного тока потеря энергии определяется по формуле (1):

$$\Delta W = \int_0^T \Delta \dot{S}(t) dt, \quad (1)$$

где $\Delta S = \Delta \dot{I}_t Z_B I_t^*$ – потери мощности в момент времени t . Здесь I_t^* – сопряженный вектор тока в ветвях схемы.

Структурное построение исходных матриц графа электротяговой сети с последовательной нумерацией ветвей по фидерам позволяет выделить потери мощности и энергии на любом участке, в том числе и отдельно по каждому пути. Как известно [4–6], потери мощности на каждом пути по физической сущности можно разделить на две составляющие:

$$\Delta \dot{S}_j = \Delta \dot{S}_{cj} + \Delta \dot{S}_{mj}, \quad (2)$$

где $\Delta \dot{S}_{cj}$ – потери мощности от нагрузок своего пути; $\Delta \dot{S}_{mj}$ – потери мощности, вызванные влиянием электромагнитной связи.

Подробное рассмотрение каждой из составляющих поможет выявить специфику вычисления для тяговой сети энергопотерь. Рассмотрим для простоты схему раздельного консольного питания m -путного участка. Схема замещения этого участка представлена на рис. 1, векторные диаграммы нагрузок, расположенных в узлах n , показаны на рис. 2.

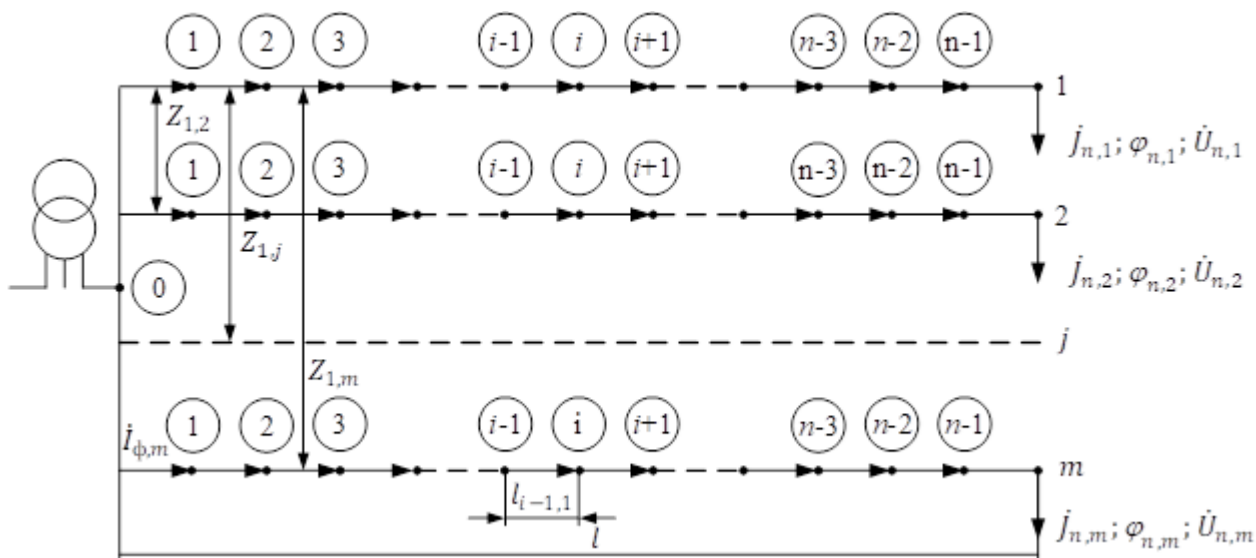


Рис. 1. Схема замещения m -путного участка

На первом пути при влиянии нагрузок других путей равновесное состояние напряжений имеет вид:

$$\dot{U}_{\phi 1} = \dot{U}_{\Sigma n} + \dot{I}_{\phi 1} Z_{c1} + \dot{I}_{\phi 2} Z_{m1,2} + \dots + \dot{I}_{\phi m} Z_{m1,m}, \quad (3)$$

где $\dot{U}_{\phi 1}$ – напряжение на шинах подстанции; $\dot{I}_{\phi 1}, \dot{I}_{\phi 2}, \dots, \dot{I}_{\phi m}$ – токи фидеров пути $i = \overline{1, m}$ соответственно; Z_{c1} – собственное сопротивление пути 1; $Z_{m1,2}, \dots, Z_{m1,m}$ – сопротивления взаимной индукции между подвесками пути $i = \overline{1, m}$.

Полная мощность на первом фидере составит следующую величину:

$$\dot{S}_{\phi 1} = \dot{S}_{\Sigma n} + \Delta \dot{S}_{c1} + \sum_{j=1}^m \Delta \dot{S}_{mj}. \quad (4)$$

Выразив из (2) потери мощности $\Delta \dot{S}_{mj}$ с учетом (3) и (4) и обобщая выражения для любого количества нагрузок на каждом пути, получим

$$\begin{aligned} \Delta \dot{S}_1 &= \sum_{i=1}^n \dot{J}_i \dot{J}_i^* Z_{ci,i} + \sum_{j=1}^{m-1} \sum_{i=1}^n \dot{J}_i \dot{J}_{i+jn}^* Z_{mi,i+jn}; \\ \Delta \dot{S}_k &= \sum_{i=(j-1)n+1}^{j-n} \dot{J}_i \dot{J}_i^* Z_{ci,i} + \sum_{j=k}^{m-1} \sum_{i=(j-1)n}^{j-n} \dot{J}_i \dot{J}_{i+(j-1)n}^* Z_{mi,i+(j-1)n} + \sum_{j=1}^{k-1} \sum_{i=(j-1)n}^{j-n} \dot{J}_i \dot{J}_{i-jn}^* Z_{mi,i-jn}; \\ \Delta \dot{S}_m &= \sum_{i=(m-1)n+1}^{m-n} \dot{J}_i \dot{J}_i^* Z_{ci,i} + \sum_{j=1}^{m-1} \dot{J}_j \dot{J}_{i-jn}^* Z_{mi,i-jn}, \end{aligned}$$

где \dot{J}_i – нагрузки поездов в узлах схемы; $Z_{mi,j}$ – взаимные сопротивления между ветвями i и j электропутьевой сети; при $j=i$ $Z_{ci,i}$ – собственное сопротивление ветви i ; n – число узлов однопутного участка; m – число путей или питающих фидеров, связанных электромагнитным полем, на многопутном участке; k – номер пути многопутного участка.

Нагрузки поездов в общем случае будут иметь разные $\cos\varphi$ и поэтому составляющие потерь на каждом пути, вызванные электромагнитной связью, могут иметь разные знаки. Действительно, полагая $m=2$ и $n=1$, $\dot{J}_1 = J_1 e^{j\varphi_1}$, $\dot{J}_2 = J_2 e^{j\varphi_2}$, $Z = r_M + jX_M$, получим

$$S_{12} = r_M J_1 J_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) + j r_M J_1 J_2 \sin(\varphi_2 - \varphi_1) + j X_M J_1 J_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) - X_M J_1 J_2 \sin(\varphi_2 - \varphi_1);$$

$$S_{21} = r_M J_1 J_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) - j r_M J_1 J_2 \sin(\varphi_2 - \varphi_1) + j X_M J_1 J_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) + X_M J_1 J_2 \sin(\varphi_2 - \varphi_1).$$

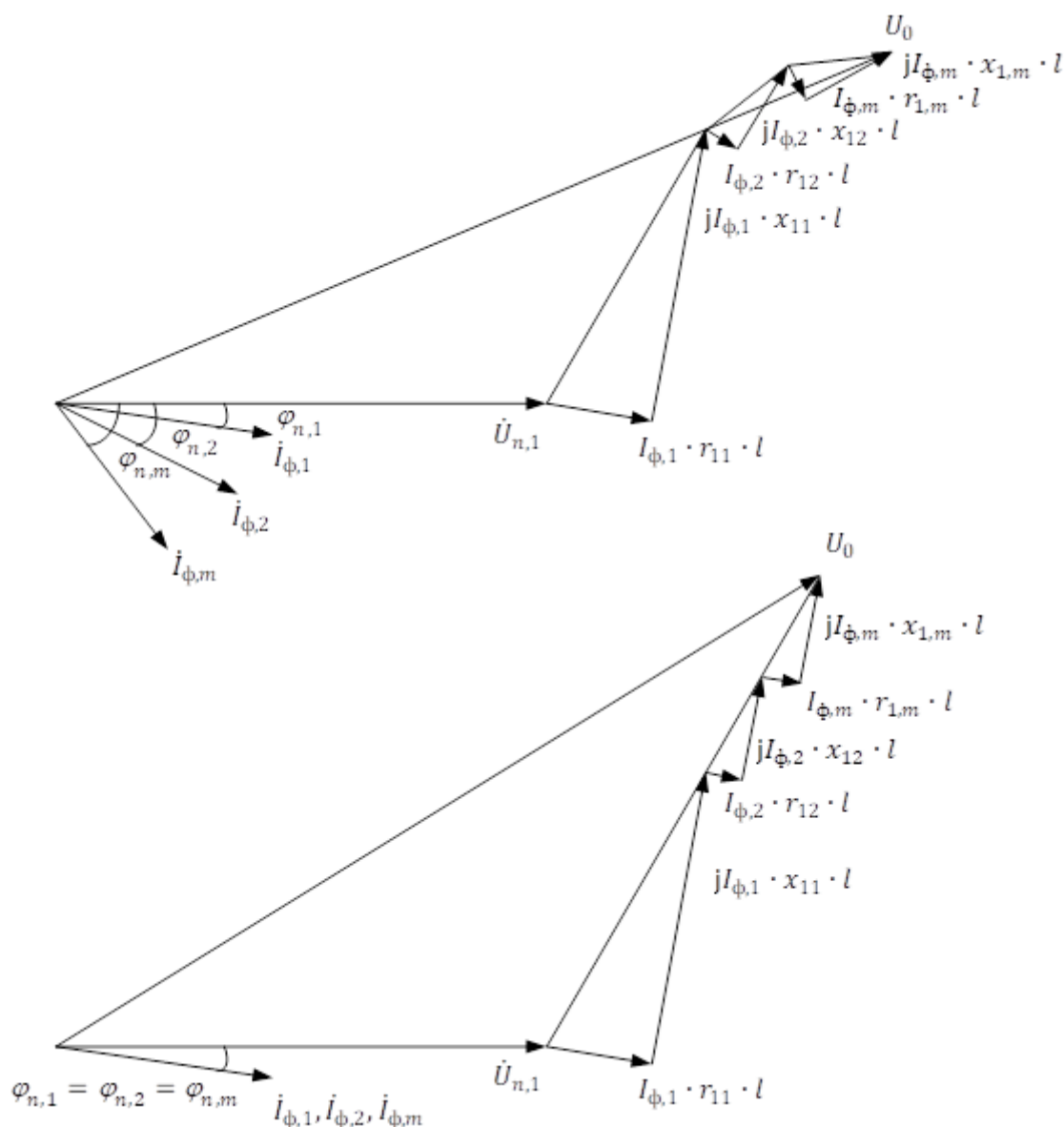


Рис. 2. Векторные диаграмма падений напряжения

Аналогичные выражения получены в работе [7]. Следует отметить, что при $\pi > \varphi_1 - \varphi_2 > 0$ активная мощность, определяемая слагаемым $X_M J_1 J_2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2)$, передается с первого пути на второй и, наоборот, со второго пути на первый, если $\pi > \varphi_2 - \varphi_1 > 0$. Согласно расчетам при токах $\dot{J}_1 = 201,9 e^{j214}$ (А),

$J_2 = 96,5e^{j220}$ (А), напряжении на шинах подстанции $\dot{U} = -13,75 - j23,8$ (кВ), сопротивлениях 20 км участка электротяговой сети с подвеской ПБСМ70 + МФ100 и рельсах Р65 – $Z_{11} = Z_{22} = 2,2 + j8,9$ (Ом); $Z_{12} = Z_{21} = 0,9 + j3,2$ (Ом), активная мощность в размере 6,8 кВт передается со второго пути на первый.

На основании изложенного можно сделать ряд полезных выводов, которые необходимо учитывать при анализе режимов работы электротяговых сетей, а также при разработке аппаратуры для вычисления энергопотерь в них при наличии переменного тока:

- обмен активной энергией между подвесками обоих путей возможен только при отличающихся коэффициентах мощности электровозов;
- в тяговых сетях переменного тока существуют потери энергии в активном сопротивлении земли, обусловленные созданием магнитного поля.

Исследование потерь энергии и сопутствующих им значений ампер-квадрат-часов питающих фидеров на имитационной модели и на реальном участке позволили установить сильную корреляционную связь между ними [1, 4]. Как правило, эпюра квадратов среднеквадратичных токов, построенная по длине питающей линии, имеет вид параболы с максимумами по краям. При создании счетчиков энергопотерь и учитывается данная закономерность. При этом величина потерь по счетчику j -го питающего фидера в момент времени t при мгновенном значении коэффициента настройки счетчика K , означающему в физическом смысле сопротивление тяговой сети на плече приложения эквивалентной нагрузки, вычисляется по формуле:

$$\Delta W_j = \int_0^T K(t) i_{\phi}^2(t) dt ,$$

где $i_{\phi}^2(t) dt$ – ампер-квадрат-часы, измеряемые счетчиком в момент времени t ; T – период измерения.

Потери энергии на фидерной зоне определяются по показаниям счетчиков всех m фидеров, питающих эту зону. В момент времени t коэффициент $K(t)$ будет для всех фидеров один и тот же.

$$\Delta W = \int_{j=1}^m \Delta W_j .$$

Изменяя программное обеспечение микропроцессорных счетчиков «Альфа Плюс», с достаточной точностью ампер-квадрат-часы можно измерять по приведенной ниже формуле

$$i_{\phi}^2(t) dt = (U_i i(t) / U_{\Delta t} = \text{const})^2 dt ,$$

где $U_{\Delta t} = \text{const}$ – напряжение на шинах тяговой подстанции в период времени $\Delta t = 1$ мин.

Таким образом, функции счетчиков потерь энергии могут выполнять микропроцессорные счетчики «Альфа Плюс».

Установившееся значение коэффициента настройки определяется на имитационной модели. При этом рассчитываются потери энергии на межподстанционной зоне и ампер-квадрат-часы на питающих фидерах. Установившееся значение настройки \bar{K} вычисляется по формуле:

$$\bar{K} = \sum_{i=1}^N \text{Re} \Delta \dot{S}_i / \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^m I_{\phi ij}^2 ,$$

где $\text{Re} \Delta \dot{S}_i$ – активные потери мощности для i -й моментной схемы; $I_{\phi ij}^2$ – квадрат тока j -го питающего фидера для i -й моментной схемы; N – число рассчитанных моментных схем, соответствующее заданному времени моделирования T .

Исследования мгновенных значений коэффициента настройки $K(t)$ позволили сделать вывод об устойчивости характера его изменения. Однако влияние целого ряда факторов на установившееся значение коэффициента \bar{K} не позволяет снизить погрешность при измерении потерь ниже 7,5 %. Снижение погрешности измерения возможно при пересчете в режиме реального времени коэффициента настройки. Такой вариант возможен при реализации измерения потерь энергии микропроцессорными счетчиками «Альфа Плюс». Потери энергии могут корректироваться по формуле:

$$\Delta W' = \Delta W \frac{K_d}{K},$$

где K_d – коэффициент настройки, рассчитанный на модели или выбранный из соответствующих файлов (с наборами рассчитанных заранее коэффициентов) и соответствующий реальному режиму работы электротяговых сетей, потоку поездов и т.д. в данный момент времени Δt .

Определение потерь энергии в тяговых трансформаторах

Расчет потерь активной и реактивной энергии в тяговых трансформаторах можно вести на имитационной модели, описание которой приведено [5]. Действительно, структурное построение графа $G_{st} = (V_{st}, L_{st})$ электротяговой сети и сети внешнего электроснабжения позволяет выделить в векторе токораспределения I_b и матрице сопротивлений Z_b соответствующие ветви, относящиеся к схеме замещения i -го трансформатора. Тогда, применяя формулу (1) для ограниченного схемой замещения количества ветвей i -го трансформатора, получим

$$\Delta \dot{W}_{Ti} = \int_0^T \Delta \dot{S}_{Ti}(t) dt,$$

где $\Delta \dot{S}_{Ti}(t) = \dot{I}_{Ti}(t) Z_b \dot{I}_T(t)$ – потери мощности в трансформаторе в момент времени t .

Данный подход требует моделирования схем замещения трансформаторов по методике [1, 2] или [6, 7].

Очень часто в условиях эксплуатации для расчета активных потерь энергии в тяговых трансформаторах применяют формулу:

$$\Delta W_T = \left\{ \Delta P_x + k_{\text{мп}} \Delta Q_x + \sum_{i=1}^3 k_{zi}^2 k_{zi}^2 (\Delta P_{ki} + k_{\text{мп}} \Delta Q_{ki}) \right\} n T,$$

где ΔP_k , ΔP_x , ΔQ_k , ΔQ_x – нагрузочные потери, потери холостого хода, реактивные потери намагничивания и рассеяния трансформатора, коэффициент роста энергопотерь $k_{\text{мп}}$ равен затратам активной мощности на выработку и передачу одного кВАр, принимает значения в зависимости от характеристики питающей ЛЭП $0,02 \leq k_{\text{мп}} \leq 0,08$ и выражается в кВт; k_{zi} – коэффициент эффективности графика нагрузки i -й обмотки; k_{zi} – коэффициент загрузки i -й обмотки, n – количество трансформаторов; T – время начала работы трансформатора.

Здесь $\Delta Q_x = I_x \% / 100 S_n$; $\Delta Q_k = U_k \% / 100 S_n$, где S_n – мощность трансформатора, определяемая в момент времени t как произведение токов и напряжений соответствующих обмоток; U_k – напряжение короткого замыкания в %; I_x – ток холостого хода в %.

Согласно [6, 7] активные (нагрузочные) потери мощности в обмотках трансформатора можно определять методом симметричных составляющих. Для тягового трехобмоточного трансформатора нагрузочные потери ΔP_k по этому методу определяют по формуле (5):

$$\Delta P_k = \Delta P_{kp} + \Delta P_{kt} + \Delta P_{kr} = 3(I_{(1)p}^2 + I_{(2)p}^2)R_p + 3(I_{(1)t}^2 + I_{(2)t}^2)R_t + 3I_p^2 R_p, \quad (5)$$

где индексы p , t , r – первичная, тяговая, районная обмотки; R – сопротивление одной фазы соответствующей обмотки. $I_{(1)}$, $I_{(2)}$ – токи прямой и обратной последовательностей.

Здесь токи обратной последовательности в районной обмотке не учитываются, т. е. нагрузка района считается симметричной. Активные сопротивления обмоток определяются по формулам (6):

$$R_p = \frac{\Delta P_{k1} U_{л1}^2}{S^2} 10^3, \text{ Ом}; \quad R_t = \frac{3 \Delta P_{k2} U_{л2}^2}{S_{n2}^2} 10^3, \text{ Ом}; \quad R_r = \frac{3 \Delta P_{k3} U_{л3}^2}{S_{n3}^2} 10^3, \text{ Ом}. \quad (6)$$

Определяя значения ΔP_k , ΔP_x , ΔQ_k , ΔQ_x в момент времени t , можно получить среднесуточные или среднечасовые потери тягового трансформатора.

С некоторой погрешностью можно определить нагрузочные потери мощности в трансформаторе и по средним значениям нагрузок. Так, в результате суточного моделирования работы системы электроснабжения были получены следующие средние токи плеч питания т.п. Хапры Северо-Кавказской железной дороги: $\dot{I}_n = -200 + j17$, А; $\dot{I}_n = -157 + j413$, А. Левое плечо питается фазой «ас», а правое – «вс».

Векторная диаграмма токов фаз, а также токов прямой и обратной последовательностей первичной обмотки показана на рис. 3.

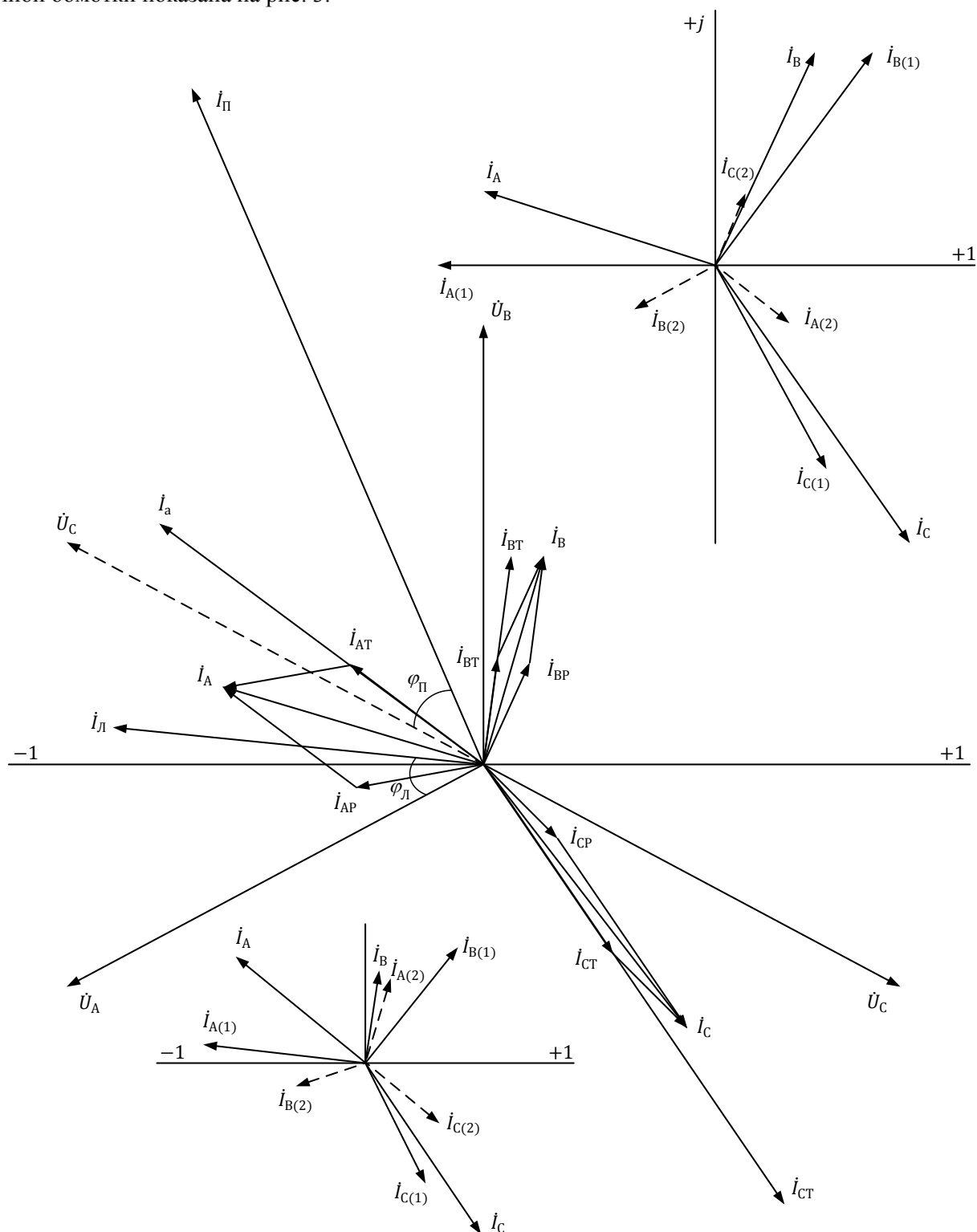


Рис. 3. Векторные диаграммы токов фаз тягового трансформатора, прямая и обратная последовательность токов фаз первичной обмотки соответственно с учетом и без учета районной нагрузки (1 мм = 5,26 А)

Токи фаз первичной обмотки делятся по известным формулам:

$$\dot{I}_A = (2/3\dot{I}_{Л1} + 1/3\dot{I}_{II}) / K_{T1-2} + \dot{I}_{ap} / K_{T1-3} = 140 + j50, \text{ A};$$

$$\dot{I}_B = (1/3\dot{I}_{II} - 1/3\dot{I}_{Л1}) / K_{T1-2} + \dot{I}_{bp} / K_{T1-3} = 33 + j133, \text{ A};$$

$$\dot{I}_C = (-2/3\dot{I}_{II} - 1/3\dot{I}_{II}) / K_{T1-2} + \dot{I}_{cp} / K_{T1-3} = 113 - j166, \text{ A.}$$

Токи прямой и обратной последовательности определяются для суммарного тока первичной обмотки и составляют:

$$I_{A(1)} = -157 - j1/157, \text{ A;}$$

$$I_{A(2)} = 15 + j45/47, \text{ A.}$$

Нагрузочные потери можно определить по формуле (5)

$$\Delta P_k = 3\{1,49(157^2 + 47^2) + 0,134(211^2 + 123^2) + 0,045 \cdot 429^2\}10^{-3} = 165 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$$

Здесь активные сопротивления обмоток на фазу вычислены по формулам (6) $R_{II} = 1,49 \text{ Ом}$; $R_T = 0,134 \text{ Ом}$; $R_p = 0,045 \text{ Ом}$. Токи фаз обмоток связаны через коэффициенты трансформации $K_{T1-2} = U_{\phi1}/U_{\phi2} = 2,23$; $K_{T1-3} = U_{\phi1}/U_{\phi3} = 6,4$. Коэффициент загрузки района принят равным 0,6 при $\cos\varphi_p = 0,8$.

Нагрузочные потери при номинальном токе согласно паспортным данным трансформатора т.п. Хапры равны 255 кВт.

Потери холостого хода трансформатора – величина достаточно стабильная и с погрешностью 5–10 % может быть взята по паспортным данным ($\Delta P_x = 125 \text{ кВт}$).

Аналогичные расчеты, проведенные различными методами для тяговых трансформаторов Северо-Кавказской железной дороги, показали, что при составлении энергетического баланса нагрузочные потери завышаются в 1,8–2 раза, т. к. учитываются в предположении работы трансформаторов с номинальной нагрузкой. В этой связи было бы целесообразно измерять нагрузочные потери энергии в трансформаторах соответствующей аппаратурой [4, 11].

При определении энергопотерь в тяговых трансформаторах способом ампер-квадрат-часов используют трехфазные микропроцессорные счетчики «Альфа Плюс», которые вычисляют значения нагрузочных потерь ΔW_k и потерь холостого хода трансформатора ΔW_x при коэффициенте настройки счетчика K_M в соответствии с формулами:

$$\Delta W_k = K_M \left(\int_0^T i_a^2 dt + \int_0^T i_b^2 dt + \int_0^T i_c^2 dt \right); \quad \Delta W_x = \int_0^T \Delta P_x dt,$$

где K_M соответствует приведенному к первичному напряжению активному сопротивлению трех обмоток трансформатора; ΔP_x – потери мощности холостого хода трансформатора в момент времени t (с течением времени изменяются незначительно, т. е. $\Delta P_x = \Delta P_{xx}$); i_a, i_b, i_c – токи фаз первичной обмотки.

Существуют следующие формулы для расчета коэффициента настройки счетчика при определении нагрузочных потерь:

$$K_M = \frac{\Delta P_{кн} 10^3}{I_H^2} = \frac{\Delta P_{кн} U_1^2 10^3}{S_H^2}, \text{ Ом,}$$

где $\Delta P_{кн}$ – активные (нагрузочные) потери мощности в обмотках трансформатора при номинальном токе; U_1 – линейное первичное напряжение, кВ; S_H – номинальная мощность, кВА; I_H – номинальный ток первичной обмотки, А.

Для трехобмоточных трансформаторов завод-изготовитель дает нагрузочные потери мощности в обмотках, определяемые при отключении одной из обмоток и нагрузке двух других номинальным током: $\Delta P_{к1-2}, \Delta P_{к1-3}, \Delta P_{к2-3}$. Используя эти данные, можно найти потери по отдельным обмоткам:

$$\Delta P_{к1} = 0,5(\Delta P_{к1-2} + \Delta P_{к1-3} - \Delta P_{к2-3}),$$

$$\Delta P_{к2} = 0,5(\Delta P_{к1-2} + \Delta P_{к2-3} - \Delta P_{к1-3}),$$

$$\Delta P_{к3} = 0,5(\Delta P_{к1-3} + \Delta P_{к2-3} - \Delta P_{к1-2}).$$

Тогда суммарные потери в обмотках при номинальном токе будут равны:

$$\Delta P_{\text{кн}} = \Delta P_{\text{к1}} + \Delta P_{\text{к2}} + \Delta P_{\text{к3}} = 0,5(\Delta P_{\text{к1-2}} + \Delta P_{\text{к1-3}} - \Delta P_{\text{к2-3}}), \text{ Ом.}$$

Если известна только небольшая величина потерь $\Delta P_{\text{кн}}$ обмоток, потери для отдельных обмоток можно получить по приближенным формулам: $\Delta P_{\text{к1}} = 0,48\Delta P_{\text{кн}}$; $\Delta P_{\text{к2}} = 0,23\Delta P_{\text{кн}}$; $\Delta P_{\text{к3}} = 0,29\Delta P_{\text{кн}}$.

Настройка программного обеспечения счетчика «Альфа Плюс» позволяет определять нагрузочные потери энергии в трансформаторе.

Параметры трансформатора ТДНТГ, установленного на подстанции, следующие: $S_{\text{н}} = 31500$ кВА; $U_1 = 110$ кВ; $U_2 = 27,5$ кВ; $U_3 = 10$ кВ; $\Delta P_{\text{кн}} = 255$ кВт; $I_x = 5$ %; $U_{\text{к1-2}} = 10,5$ %; $U_{\text{к1-3}} = 16,8$ %; $U_{\text{к2-3}} = 5,9$ %.

Измерительные трансформаторы тока имеют коэффициенты трансформации $K_{\text{T1}} = 200/5$; $K_{\text{T2}} = 800/5$; $K_{\text{T3}} = 1000/5$.

Результаты измерений и вычислений энергопотерь для тягового трансформатора представлены на рис. 4.

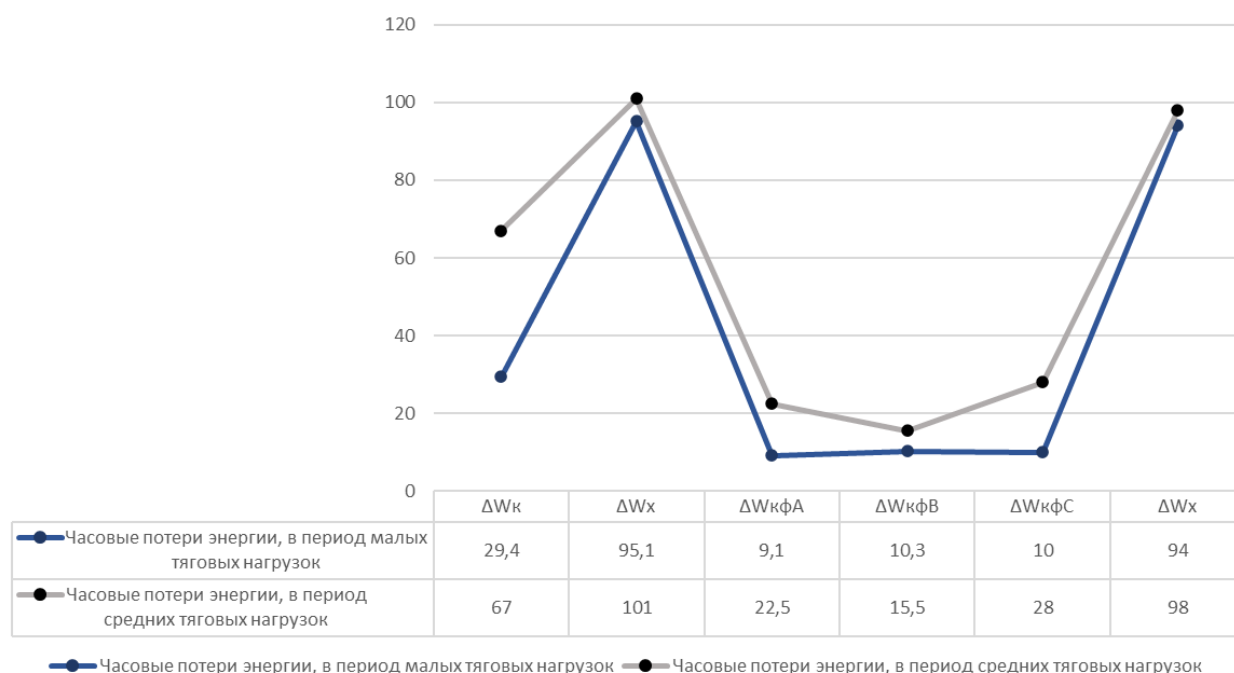


Рис. 4. Динамика энергопотерь в тяговом трансформаторе:

$\Delta W_{\text{к}}$ – суммарные потери, кВт·ч;

$\Delta W_{\text{кфА}}$, $\Delta W_{\text{кфВ}}$, $\Delta W_{\text{кфС}}$ – потери по фазам, кВт·ч

При этом суточные потери энергии суммарно составили $\Delta W_{\text{к}} = 1152$; $\Delta W_{\text{х}} = 2340$ кВт·ч; по фазам соответственно $\Delta W_{\text{кфА}} = 346$; $\Delta W_{\text{кфВ}} = 329$; $\Delta W_{\text{кфС}} = 477$; $\Delta W_{\text{х}} = 2328$ кВт·ч.

Погрешность при измерении нагрузочных потерь энергии по сравнению с вычисленными на ЭВМ по данным графиков нагрузок лежит в пределах 2,42–7,09 %. Часовые потери энергии холостого хода тягового трансформатора практически не меняются и близки к паспортным данным трансформатора, а нагрузочные потери значительно отличаются от паспортных данных. В периоды малых тяговых нагрузок или их отсутствия нагрузочные потери энергии незначительны. Можно заметить тенденцию к выравниванию по фазам нагрузочных потерь.

Анализ потерь энергии в трансформаторе показывает, что в периоды малых нагрузок процент нагрузочных потерь не превышает 0,5 %. Интересным является и факт равномерности потерь по фазам в периоды малых нагрузок. Это явление происходит за счет увеличения симметричной районной нагрузки. Косвенно этот факт подтверждает гипотезу о выравнивании нагрузок электрифицированных линий при малых грузопотоках и указывает на возможность повышения эффективности применения дифференцированных тарифов оплаты за электроэнергию.

Выводы

Экономия электроэнергии в перевозочном процессе требует соответствующих соотношений между массой поезда, количеством и типами поездов. Необходимые параметры можно получить, моделируя различные режимы работы электротяговых систем. Применительно к актуальным микропроцессорным счетчикам построена методика и представлены средства измерения энергопотерь в тяговых сетях и трансформаторах. Определены признаки, по которым можно оценить степень влияния на образующие компоненты электропотребления. Найденные общие зависимости энергопотерь могут быть использованы для включения их в базы знаний экспертных систем.

Список литературы

- 1 **Корниенко, В. В.** Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы (Аналитический обзор) : монография / В. В. Корниенко, А. В. Котельников, В. Т. Доманский. – Киев : Транспорт Украины, 2004. – 196 с.
- 2 Повышение энергетической эффективности электрических систем с тяговыми нагрузками / В. Т. Доманский, И. В. Доманский, В. В. Доманский, Г. А. Доманская // Zbornik radova XIII međunarodni naučno-stručni skup Informacione tehnologije za e-obrazovanje, Banja Luka, 24 – 25. 9. 2021 / Panevropski univerzitet Apeiron. – Bosna i Hercegovina/RS, Banja Luka, 2021. – С. 99–113. – ISBN 978-99976-34-80-1.
- 3 **Незевак, В. Л.** Совершенствование модели влияния параметров графика движения поездов на тяговое электропотребление на участках постоянного и переменного тока с I и II типом профиля пути при помощи регрессионных моделей и нейронных сетей / В. Л. Незевак // Вестник транспорта Поволжья. – 2017. – № 6. – С. 34–44. – ISSN 1997-0722.
- 4 **Доманский, В. В.** Информационные технологии минимизации оплаты за электропотребления тяговых подстанций при дифференцированных тарифах : монография / В. В. Доманский. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2017. – 114 с. – ISBN 978-5-88814-519-7.
- 5 **Доманский, В. В.** Информационные технологии режимов работы тягового электроснабжения и питающих их энергосистем / В. В. Доманский, Г. А. Доманская, В. А. Васенко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 3. – С. 154–165. – DOI 10.46973/0201-727X_2020_3_154.
- 6 **Марквард, К. Г.** Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквард. – Москва : Транспорт, 1982. – 528 с.
- 7 **Карякин, Р. Н.** Тяговые сети переменного тока / Р. Н. Карякин. – 2-е изд. перераб. и доп. Москва : Транспорт, 1987. – 279 с.
- 8 **Осипова, В. Э.** Применение нейросетевых методов прогнозирования электропотребления на железнодорожном транспорте / В. Э. Осипова,

References

- 1 **Kornienko, V. V.** Electrification of railways. World trends and prospects (Analytical review) : monograph / V. V. Kornienko, A. V. Kotelnikov, V. T. Domansky. – Kyiv : Transport of Ukraine, 2004. – 196 p.
- 2 Improving the energy efficiency of electrical systems with traction loads / V. T. Domansky, I. V. Domansky, V. V. Domansky, G. A. Domanskaya // Proceedings of the 13th International Scientific and Expert Meeting on Information Technology for e-Education, Banja Luka, 24 – 25. 9. 2021 / Pan-European University Apeiron. – Bosnia and Herzegovina/RS, Banja Luka, 2021. – P. 99–113. – ISBN 978-99976-34-80-1.
- 3 **Nezevak, V.L.** Improving the model of the influence of train schedule parameters on traction power consumption in direct and alternating current sections with type I and II track profile using regression models and neural networks / V. L. Nezevak // Bulletin of Transport of the Volga Region. – 2017. – No. 6. – P. 34–44. – ISSN 1997-0722.
- 4 **Domansky, V. V.** Information technologies of minimization of payment for electric power consumption of traction substations at differentiated tariffs : monograph / V. V. Domansky. – Rostov-on-Don : RSTU, 2017. – 114 p. – ISBN 978-5-88814-519-7.
- 5 **Domansky, V. V.** Information technologies of operation modes of traction power energy and supplying their energy systems / V. V. Domansky, G. A. Domanskaya, V. A. Vasenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2020. – No. 3. – P. 154–165. – DOI 10.46973/0201-727X_2020_3_154.
- 6 **Markvard, K. G.** Electricity supply of electrified railways / K. G. Markvard. – Moscow : Transport, 1982. – 528 p.
- 7 **Karyakin, R. N.** Traction networks of alternating current / R. N. Karyakin. – 2nd ed., rev. and add. – Moscow : Transport, 1987. – 279 p.
- 8 **Osipova, V. E.** Application of neural network methods for forecasting power consumption in railway transport / V. E. Osipova, D. A. Yakovlev

Д. А. Яковлев // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2022. – Т. 18, – № 1. – С. 107–118. – DOI 10.25559/SITITO.18.202201.107-118.

9 **Хашев, А. И.** Комбинированное имитационно-аналитическое моделирование в транспортно-логистических системах // А. И. Хашев, Э. А. Мамаев, А. Н. Гуда // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 1 (85). – С. 117–125. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_1_117.

10 **Доманский, В. В.** Параметры электроснабжения тяги поездов для наполнения баз данных имитационных моделей / В. В. Доманский // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2 (90). – С. 91–99. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_91.

11 **Доманский, В. В.** Информационные технологии и метод расчета риска отказа при дрейфе технического состояния тягового трансформатора / В. В. Доманский // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1 (89). – С. 264–273. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_264.

// Modern information technologies and IT education. – 2022. – Vol. 18, – No. 1. – P. 107–118. – DOI 10.25559/SITITO.18.202201.107-118

9 **Khashev, A.I.** Combined simulation-analytical modeling in transport and logistics systems // A. I. Khashev, E. A. Mamaev, A. N. Guda // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2022. – No. 1 (85). – P. 117–125. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_1_117.

10 **Domansky, V. V.** Parameters of electric power supply of train traction for filling databases of simulation models / V. V. Domansky // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 2 (90). – P. 91–99. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_91.

11 **Domansky, V. V.** Information technologies and a method for calculating the risk of failure in case of drift of the technical condition of a traction transformer / V. V. Domansky // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 1 (89). – P. 264–273. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_264.

V. V. Domansky

INTELLIGENT SYSTEM FOR ANALYSIS OF ENERGY LOSS FOR AC TRACTION NETWORKS FOR DATABASE UPDATING

Abstract. The paper considers methodology for creating intelligent systems for analyzing energy losses in traction networks including goals, objectives, functional composition, structure, as well as information bases of the intelligent system. The directions of research on optimization of power consumption modes, the structure of databases and knowledge bases are highlighted. In order of the developed intelligent system, the problem of assessing energy losses in traction networks and transformers and the efficiency of the train traction power supply system was studied. Factors influencing the components of power consumption have been identified, generalizing dependences of energy losses have been obtained for inclusion in the knowledge bases of expert systems.

Keywords: energy losses, electric traction network, traction transformers.

For citation: Domansky, V. V. Intelligent system for analysis of energy loss for ac traction networks for database updating / V. V. Domansky // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 1. – P. 176–185. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_176.

Сведения об авторах

Доманский Василий Валерьевич
Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Информатика»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: domansk2015@mail.ru

Information about the authors

Domansky Vasily Valerievich
Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Computer Science»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: domansk2015@mail.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 667.5.033.33 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_186

*А. И. Азоян, Д. С. Мантуров, Д. Н. Шишияну, С. А. Данильченко***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА**

Аннотация. Изучено влияние температуры на физико-механические свойства композиционного материала. В качестве матрицы полимерного композита использовалась эпоксидно-диановая смола марки ЭД-20 с применением разных типов наполнителей. Экспериментальные данные были получены методами инструментального индентирования и термического анализа. Для оценки степени ползучести материала использовалось относительное изменение глубины индентирования. По полученным интегральным термогравиметрическим кривым было определено количественное изменение массы образца в процессе разложения, а по дифференциальным термогравиметрическим кривым – температурный интервал деструкции, температура начала и конца разложения. Показано, что введение наполнителей в полимерную матрицу оказывает существенное влияние не только на вязкоупругие свойства, но и на термическую устойчивость в результате структурных превращений и изменения подвижности молекул.

Ключевые слова: композит, вязкоупругость, индентирование, термогравиметрия.

Для цитирования: Экспериментальное исследование влияния температуры на физико-механические свойства композиционного материала / А. И. Азоян, Д. С. Мантуров, Д. Н. Шишияну, С. А. Данильченко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1. – С. 186–195. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_186.

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется способам повышения эксплуатационных свойств полимерных композиционных материалов. Полимерные композиты находят широкое применение в тяжелонагруженных узлах трения, так как могут работать в широком диапазоне тепловых и механических воздействий, имея хорошую структурно-термическую адаптивность. Дальнейшее расширение функциональных возможностей полимера возможно при введении модификаторов в матричную структуру материала [1–4]. Учитывая совместимость вводимого наполнителя с основой, а также его свойств, можно создавать композиционные материалы, которые сочетают низкий коэффициент трения, повышенный модуль упругости и долговечность с высокой износостойкостью, эластичностью и прочностью исходного полимера.

В процессе трибосопряжения у композиционных материалов наблюдается резкое повышение реологических свойств, ведущих к необратимым изменениям физико-механических параметров [5–10]. При использовании полимерных композитов в зоне повышенных нагрузок следует учитывать такой важный фактор, как температура. Анализ ее влияния на изменение физико-механических свойств позволяет установить, что существуют определенные диапазоны, в которых происходят резкие изменения характеристик материала. Причиной этого являются различные структурные превращения и изменение подвижности молекул в данных температурных интервалах. Увеличение скорости подвижности различных участков макромолекул отражает области релаксации, которые, в свою очередь, определяют макроскопические свойства полимеров [11].

Изучение вязкоупругих свойств композита в микро- и макромасштабах проводится с использованием методов механики сплошных сред, а определение напряженно-деформированного состояния – с помощью аналитических методов решения и различных вычислительных алгоритмов. Исследование влияния температуры на физико-механические свойства материала будем анализировать с помощью двух разных подходов: метода инструментального индентирования и метода термического анализа. Метод инструментального индентирования широко применяется для определения параметров линейных упругих и нелинейных материалов, а также для упругопластической и вязкоупругой среды. Данный метод имеет ряд преимуществ: небольшие требования к геометрическим параметрам образца вследствие локализованного поля исследования; простота проведения эксперимента; возможность исследовать материал на разной масштабной высоте поверхностного слоя, которая контролируется размером самого

индентора и зоны контакта его с образцом; процесс индентирования происходит без значительных повреждений композита. Благодаря таким преимуществам данный способ анализа физико-механических свойств композиционного материала вызывает большой интерес и является перспективным направлением [12–16].

Для оценки термической устойчивости материала используют методы термического анализа, такие как: термогравиметрический анализ (ТГА), дифференциальный термический анализ (ДТА) и дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) [17]. По результатам испытаний можно сделать выводы о термическом разложении как полимера, так и композиционного материала на его основе, а также исследовать процессы старения и степень отверждения исследуемых материалов.

Материалы и методы исследования

В настоящей работе приведены экспериментальные данные, по результатам которых оценивалось влияние гибридных наполнителей на физико-механические свойства композиционных материалов. Для основы композитов была выбрана эпоксидно-диановая смола марки ЭД-20, которая является продуктом дифенилолпропана и эпихлоргидрина, обладает высокой пластичностью, термостойкостью, хорошей адгезией, стойкостью к механическим повреждениям и т.д. Чтобы улучшить механические свойства полимерной матрицы, в качестве наноразмерной добавки была выбрана мелкодисперсная шпинель железа, а для повышения антифрикционных качеств композита был применен политетрафторэтилен (ПТФЭ) марки Ф4МБ, размеры частиц которых не превышали 50 нм.

После введения наполнителей в полученную смесь был добавлен отвердитель полиэтиленполиамин (ПЭПА). Он представляет собой этиленамин после процесса олигомеризации, молекулярная масса которого варьируется в пределах 230–250 г/моль. Отверждение проводилось за счет автоматической циркуляции горячего воздуха (~95 °С) в течение 12 ч в суховоздушном шкафу.

В работе [18] исследовалось влияние концентрации наполнителей на физико-механические характеристики композита. Было установлено, что наилучшими свойствами композит обладает при концентрации наполнителей с массовой долей 6 %. Исследования проводились на специально подготовленных образцах с разным составом: первый вариант – контрольный – представляет собой смолу марки ЭД-20 без наполнителей; второй вариант – в полимерную матрицу вводили 6 % мелкодисперсной шпинели железа; третий вариант модификации – ЭД-20 + 6 % шпинель + 6 % ПТФЭ. Для проведения испытаний все образцы подвергались идентичной обработке.

Анализ физико-механических характеристик композита проводился на приборе NanoTest 600. Данное оборудование оснащено алмазным индентором в виде трёхгранной пирамиды Берковича. Индентирование осуществлялось с помощью трапецеидального режима нагружения при максимальной нагрузке $P = 200$ мН и скорости нагружения $V = 10$ мН/с. Время нагрузки и разгрузки всегда составляло 20 с. Значения времени выдержки варьировались в пределах t_B : 5, 30, 60, 90 и 120 с. Погружение индентора в исследуемый материал происходило линейно.

Определение степени ползучести материала проводилось с помощью программного комплекса NanoTest Platform 3. Для оценки вязкоупругих характеристик использовалось относительное изменение глубины индентирования:

$$C_{IT} = \frac{h_2 - h_1}{h_1} \cdot 100\% ; \quad (1)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2}{n}} , \quad (2)$$

где h_1 – глубина индентирования при достижении испытательной нагрузки, поддерживаемой постоянной с момента t_1 ; h_2 – глубина индентирования после выдержки под нагрузкой к моменту времени $t_2 = t_1 + t_B$; x_i – экспериментально полученные значения; \bar{x}_i – математическое ожидание; n – количество наблюдений.

С целью определения зависимости вязкоупругих характеристик от нагрева был проведен аналогичный эксперимент с временем выдержки t_B : 300, 900, 1800, 2700 и 3600 с при температуре образца 25, 60, 85 и 100 °С.

Композиционные материалы широко применяются в тяжело нагруженных узлах трения, а повышение температуры при эксплуатации может достигать критических значений. Поэтому большой интерес представляет изменение физико-механических свойств композитов в зависимости от температуры. Термический анализ осуществлялся на высокочувствительном дериватографе STA 449 F3 Jupiter фирмы NETZSCH с использованием программного обеспечения Netzsch Proteus Analyses. Исследование проводилось в закрытых вентилируемых корундовых тиглях в атмосфере азота со скоростью 10 °С/мин при непрерывном нагревании от 30 до 650 °С. Навески образцов для анализа составляли 10–20 мг. По полученным интегральным термогравиметрическим кривым (ТГ) было определено количественное изменение массы образца в процессе разложения, а по дифференциальным термогравиметрическим кривым (ДТГ) – температурный интервал деструкции, температура начала и конца разложения, а также все ступени эндотермического эффекта. Пики на кривой ДТГ позволили определить температуру, при которой разложение происходит с максимальной скоростью.

Результаты экспериментальных исследований

При исследовании физико-механических характеристик как для чистого полимера, так и для модифицированного были определены средние значения относительного изменения глубины индентирования под воздействием постоянной нагрузки с увеличением времени выдержки t_B и среднеквадратического отклонения (табл. 1), а на рис. 1 – аппроксимированные кривые полученных данных из расчета по формулам (1) и (2).

Таблица 1

Относительное изменение глубины индентирования и среднеквадратическое отклонение под воздействием постоянной нагрузки с увеличением времени выдержки

n	t_B, c	$C_{IT}, \%$	S
Смола ЭД-20			
1	5	1,97	0,209
2	30	4,71	0,522
3	60	5,89	0,282
4	90	6,88	0,524
5	120	7,67	0,853
Смола ЭД-20 + 6 % шпинель			
1	5	3,55	0,191
2	30	6,96	0,781
3	60	9,27	0,621
4	90	11,04	0,771
5	120	12,45	0,681
ЭД-20 + 6 % шпинель + 6 % ПТФЭ			
1	5	1,36	0,169
2	30	3,18	0,305
3	60	4,21	0,211
4	90	4,89	0,299
5	120	5,18	0,488

Статистический анализ проведенных испытаний показал, что стабильностью полученных данных как в отношении твердости и приведенного модуля упругости [18], так и ползучести обладает композиционный материал на основе смолы ЭД-20 с добавками в виде 6 % шпинели железа и 6 % ПТФЭ. При этом среднее значение относительного изменения глубины индентирования варьируется от 1,36 до 5,18 % (~ 3,82 %). Вместе с тем композиции смолы ЭД-20 и ЭД-20 с использованием в качестве наполнителя только шпинели железа демонстрируют большой разброс полученных данных C_{IT} : для смолы ЭД-20 от 1,97 до 7,67 % (~ 5,7 %), а при использовании мелкодисперсной шпинели в качестве наполнителя: 3,55–12,45 % (~ 8,9 %), что говорит о значительном увеличении вязких свойств композита.

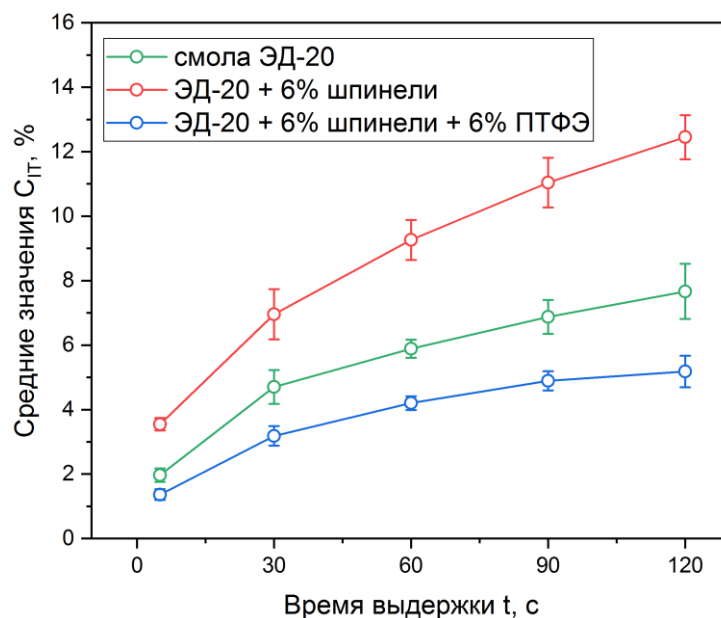


Рис. 1. Средние значения C_{IT} при разном времени выдержки t_B

На следующем этапе испытаний было исследовано влияние содержания наполнителя на термические превращения в полимерном композите. Процесс термического разложения у чистой смолы ЭД-20 проходит в одну стадию в интервале температур от 180 до 480 °С (рис. 2). Максимальная скорость деструкции равна 11,57 %/мин и наблюдается при температуре 364,06 °С, о чем свидетельствует пик на кривой ДТГ. Разложение происходит практически полностью, потеря массы образца составляет 94 %.

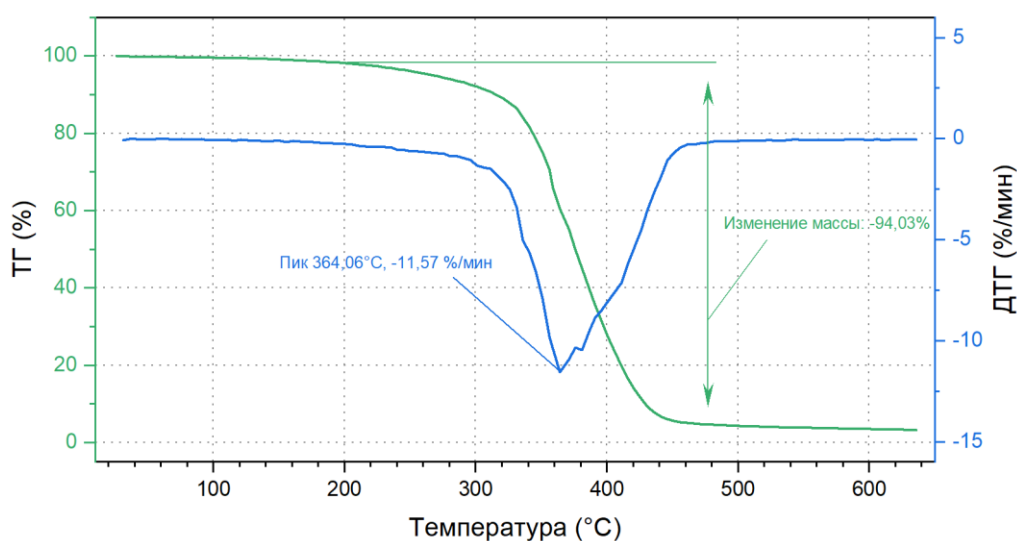


Рис. 2. Результаты термического анализа смолы ЭД-20

На рис. 3 представлены результаты термического анализа смолы ЭД-20 с добавлением 6 % шпинели железа в качестве наполнителя. Процесс разложения, как и в случае с ЭД-20 без добавок, одностадийный. Начало разложения смещается в область более высоких температур и составляет 315 °С. Максимальная скорость деструкции (23,45 %/мин) достигается при температуре 362 °С. Потеря массы образца прекращается при температуре 460 °С и составляет 65,93 %, что значительно меньше, чем у ЭД-20 без добавления шпинели.

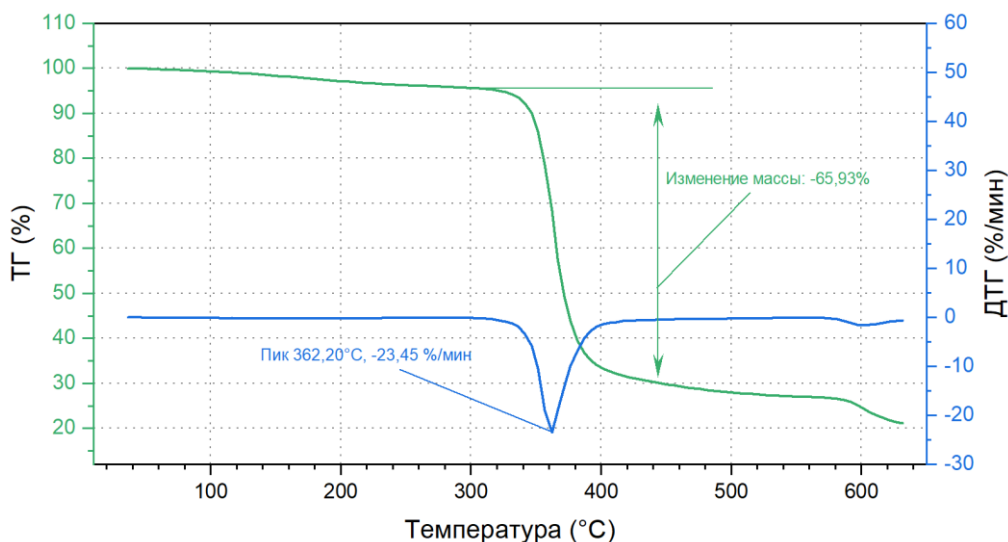


Рис. 3. Результаты термического анализа смолы ЭД-20 + 6 % шпинель

На рис. 4 у композиционного полимерного материала ЭД-20 + 6 % шпинели + 6 % ПТФЭ отчетливо наблюдается два эндотермических эффекта. Первая ступень разложения происходит в интервале температур от 295 °С до 450 °С, которая значительно выше, чем у образца из чистой смолы ЭД-20, но ниже, чем у образца с добавлением только шпинели в качестве добавки. При этом максимальная скорость деструкции, равная 12,67 %/мин, достигается при температуре 369 °С, а потеря массы составляет 51,49 %. Второй эндотермический эффект начинается практически без смещения и проходит в интервале от 450 °С до 600 °С. Анализ кривой ДТГ показал, что при температуре 499 °С достигается максимальная скорость деструкции 1,91 %/мин. Потеря массы на кривой ТГ составляет около 11,79 %. Если принять во внимание, что процесс деструкции происходил в две стадии, то суммарная потеря массы образца равна 63,28 %, что значительно меньше, чем для чистой смолы ЭД-20 и ЭД-20 + 6 % шпинели. Обобщенные результаты термического анализа исследуемых материалов приведены в табл. 2.

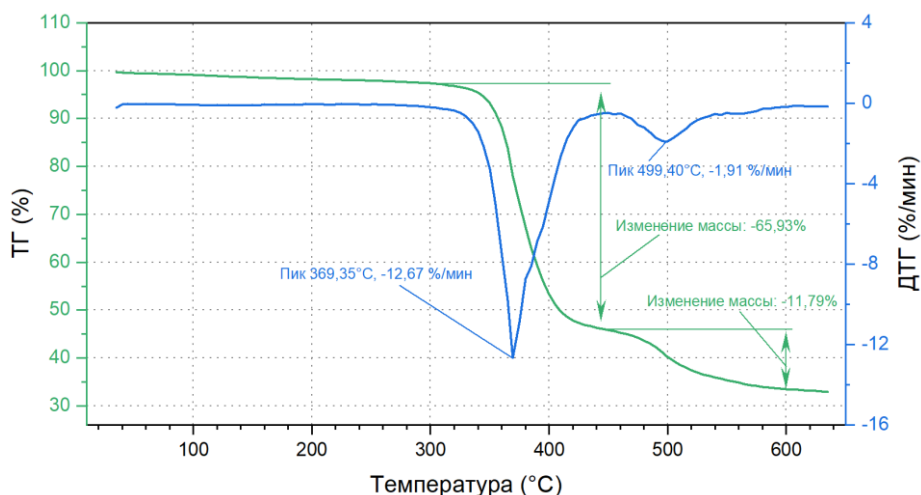


Рис. 4. Результаты термического анализа смолы ЭД-20 + 6 % шпинель + 6 % ПТФЭ

На основании полученных данных дифференциального термического анализа исследуемых образцов можно говорить о том, что наибольшей термической устойчивостью обладает модифицированный полимерный материал ЭД-20 + 6 % шпинели + 6 % ПТФЭ. Термическая деструкция происходит при

более высокой температуре (от 369 °С), а скорость разложения при этом не достигает предельных значений (12,67 %/мин). Суммарное изменение массы за два эндотермических эффекта показало наименьшее значение и составило 63,28 %. Таким образом, добавление шпинели и ПТФЭ в материалы на основе эпоксидной смолы ЭД-20 повышает устойчивость этих материалов к термическому разложению.

Таблица 2

Обобщенные данные термического анализа материалов

№ п/п	Состав образцов	Период термической деструкции, °С	Максимальная скорость деструкции, %/мин	Потеря массы, %	
1	ЭД-20	180–480	11,57 при $t = 364$ °С	94	
2	ЭД-20 + 6 % шпинель	315–460	23,45 при $t = 362$ °С	65,93	
3	ЭД-20 + 6 % шпинель + 6 % ПТФЭ	295–450	12,67 при $t = 369$ °С	51,49	63,28
		450–600	1,91 при $t = 499$ °С	11,79	

В процессе анализа результатов физико-механических и термических испытаний трех различных составов установлено, что для последующего исследования влияния температуры на вязкоупругие свойства следует выбрать композиционный материал ЭД-20 + 6 % шпинели + 6 % ПТФЭ. В табл. 3 представлены средние значения относительного изменения глубины индентирования и среднеквадратического отклонения под воздействием постоянной нагрузки с увеличением времени выдержки t_b . Аппроксимированные кривые полученных результатов из расчета по формулам (1) и (2) представлены на рис. 5.

Таблица 3

Относительное изменение глубины индентирования и среднеквадратическое отклонение для ЭД-20 + 6 % шпинели + 6% ПТФЭ при разной температуре в зоне контакта

n	t_b , с	S_{IT} , %	S
Температура 25 °С			
1	300	8,89	0,373
2	900	10,99	1,084
3	1800	13,21	2,284
4	2700	15,02	2,647
5	3600	16,73	2,906
Температура 60 °С			
1	300	9,41	0,366
2	900	11,51	1,016
3	1800	13,15	1,742
4	2700	14,65	2,013
5	3600	16,14	2,357
Температура 85 °С			
1	300	19,84	0,542
2	900	31,27	1,391
3	1800	39,31	1,166
4	2700	45,69	2,803
5	3600	50,69	5,014
Температура 100 °С			
1	300	36,99	0,981
2	900	55,62	2,262
3	1800	72,55	4,053
4	2700	85,65	4,465
5	3600	95,06	5,086

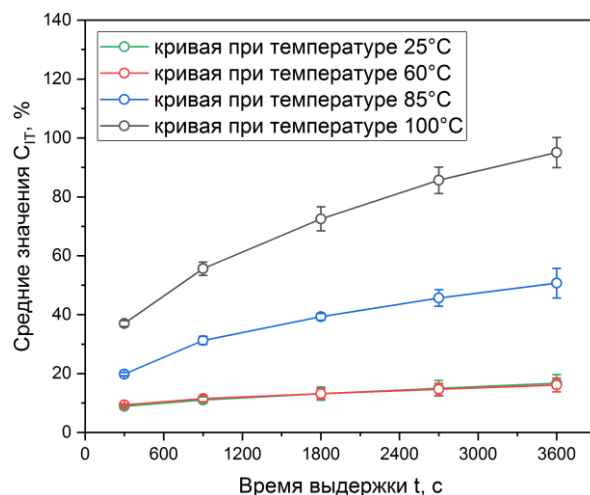


Рис. 5. Средние значения $C_{ГТ}$ для ЭД-20 + 6 % шпинели + 6% ПТФЭ при разной температуре в зоне контакта

Статистический анализ проведенных испытаний показал, что композиционный материал обладает хорошей стабильностью данных в отношении ползучести для всего периода времени выдержки. При $t = 25^\circ\text{C}$ изменение глубины indentирования варьируется от 8,89 до 16,73 % (~ 7,84 %), а при $t = 60^\circ\text{C}$ разница значений коэффициента ползучести не превышает ~ 6,73 %. Дальнейшее повышение температуры ведет к увеличению вязких свойств полимерного композита. Результаты испытаний показали, что ползучесть материала под постоянной нагрузкой начинается задолго до полной термической деструкции.

Выводы

В результате проведения экспериментальных исследований влияния температуры на физико-механические свойства композиционного материала установлено следующее:

1 По сравнению с исходным полимером применение модифицированного материала позволяет существенно повысить прочностные характеристики и, как следствие, износостойкость. Из аппроксимированной кривой на рис. 1 видно, что при добавлении шпинели металлов и ПТФЭ в полимерную основу относительное изменение глубины indentирования меняется незначительно. Установившееся значение $C_{ГТ}$ при увеличении времени выдержки свидетельствует о релаксационной твердости.

2 Эпоксидно-диановая смола ЭД-20 с применением наполнителей в виде шпинели железа и политетрафторэтилена марки Ф4МБ обладает наибольшей термической устойчивостью: термическая деструкция по сравнению с образцами других составов происходит в два этапа при более высоких температурах от 369°C , скорость разложения при этом не достигает предельной величины (12,67 %/мин), суммарная потеря массы за два эндотермических эффекта показала наименьшее значение и составила 63,28 %.

3 В процессе идентификации влияния температуры на механические свойства материала наблюдается рост $C_{ГТ}$ с увеличением температуры. Зависимость вязкоупругих характеристик носит экспоненциальный характер.

Список литературы

- 1 Исследование структуры полимерного композиционного материала на основе смолы ЭД-20 и нанодисперсии сополимера стирола и акриловой кислоты / Д. М. Мордасов, П. В. Макеев, Д. Л. Полушкин [и др.] // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2019. – Т. 25. – № 1. – С. 136–141. – DOI 10.17277/vestnik.2019.01.
- 2 Дисперсно-наполненные полимерные композиты технического и медицинского назначения / Б. А. Люкшин, С. В. Шилько, С. В. Панин [и др.]. – Новосибирск : Сибирское отделение РАН. – 2017. – 311 с. – ISBN 978-5-7692-1546-9.

References

- 1 Investigation of the structure of polymer composite material based on ED-20 resins and anodispersity of styrene copolymer and acrylic acids / D. M. Mordasov, P. S. Makeev, D. L. Polushkin [et al.] // Vestnik Tambov State Technical University. – 2019. – Vol. 25. – No. 1 – P. 136–141. – DOI 10.17277/vestnik.2019.01.
- 2 Dispersed-filled polymer composites for technical and medical purposes: monograph / B. A. Lyukshin, S. V. Shilko, S. V. Panin [et al.]. – Novosibirsk : Siberian Branch of the RAS. – 2017. – 311 p. – ISBN 978-5-7692-1546-9.

- 3 **Paluvai, N. R.** Synthesis and modifications of epoxy resins and their composites : A review / N. R. Paluvai, S. Mohanty, S. K. Nayak // *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. – 2014. – Vol. 53. – No 16. – P. 1723–1758.
- 4 Исследование кинетики и механизма формирования вторичных структур модифицированной эпоксидной смолы / Д. С. Мантуров, П. Г. Иваночкин, А. И. Азоян [и др.] // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. – 2022. – № 4 (88). – С. 41–51. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_4_41.
- 5 Исследование вязкоупругих свойств композиционных материалов на основе метода индентирования / В. И. Колесников, О. А. Беляк, Т. В. Суворова [и др.] // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. – 2023. – № 4 (92). – С. 25–33. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_4_25.
- 6 **Chyasnavichyus, M.** Probing of polymer surfaces in the viscoelastic regime / M. Chyasnavichyus, S. L. Young, V. V. Tsukruk // *Langmuir*. – 2014. – Vol. 30. – No. 35. – P. 10566–10582. – URL: <https://doi.org/10.1021/la404925h> (дата обращения: 18.01.2024).
- 7 **Zhai, M.** Viscoelastic modeling of nanoindentation experiments : A multicurve method / M. Zhai, G. B. McKenna // *J. Polymer Sci. B. Polymer Phys.* – 2014. – Vol. 52. – No. 9. – P. 633–639. – URL: <https://doi.org/10.1002/polb.23470> (дата обращения: 18.01.2024).
- 8 Measurement of viscoelastic properties for polymers by nanoindentation / Y. Wang, L. Shang, P. Zhang [et al.] // *Polymer Test.* – 2020. – Vol. 83. – P. 106353. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106353> (дата обращения: 18.01.2024).
- 9 **Stan, F.** Analysis of viscoelastic behavior of polypropylene/carbon nanotube nanocomposites by instrumented indentation / F. Stan, A. M. Turcanu, C. Fetecau // *Polymers*. – 2020. – Vol. 12. – No. 11. – P. 2535. – URL: <https://doi.org/10.3390/polym12112535> (дата обращения: 18.01.2024).
- 10 **Parvini, C. H.** Extracting viscoelastic material parameters using an atomic force microscope and static force spectroscopy / C. H. Parvini, M. A. S. R. Saadi, S. D. Solares // *Beilstein J. Nanotechnology*. – 2020. – Vol. 11. – P. 922–937. – URL: <https://doi.org/10.3762/bjnano.11.77> (дата обращения: 18.01.2024).
- 11 Исследование зависимости свойств модифицированных полиуретанов от температуры методом индентирования / Е. В. Торская, А. А. Яковенко, И. В. Шкалей [и др.] // *Физическая мезомеханика*. – 2023. – Т. 26. – № 3. –
- 3 **Paluvai, N. R.** Synthesis and modifications of epoxy resins and their composites : A review / N. R. Paluvai, S. Mohanty, S. K. Nayak // *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. – 2014. – Vol. 53. – No 16. – P. 1723–1758.
- 4 Investigation of kinetics and mechanism of secondary structures` formation of modified epoxy resin / D. S. Manturov, P. G. Ivanochkin, A. I. Azojan [et al.] // *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya*. – 2022. – No. 4 (88). – P. 41–51. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_4_41.
- 5 Study of viscoelastic properties of composite materials on the basis of indentation method / V. I. Kolesnikov, O. A. Belyak, T. V. Suvorova [et al.] // *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya*. – 2023. – No. 4 (92). – P. 25–33. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_4_25.
- 6 **Chyasnavichyus, M.** Probing of polymer surfaces in the viscoelastic regime / M. Chyasnavichyus, S. L. Young, V. V. Tsukruk // *Langmuir*. – 2014. – Vol. 30. – No. 35. – P. 10566–10582. – URL: <https://doi.org/10.1021/la404925h> (date of access: 01/18/2024).
- 7 **Zhai, M.** Viscoelastic modeling of nanoindentation experiments : A multicurve method / M. Zhai, G. B. McKenna // *J. Polymer Sci. B. Polymer Phys.* – 2014. – Vol. 52. – No. 9. – P. 633–639. – URL: <https://doi.org/10.1002/polb.23470> (date of access: 01/18/2024).
- 8 Measurement of viscoelastic properties for polymers by nanoindentation / Y. Wang, L. Shang, P. Zhang [et al.] // *Polymer Test.* – 2020. – Vol. 83. – P. 106353. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106353> (date of access: 01/18/2024).
- 9 **Stan, F.** Analysis of viscoelastic behavior of polypropylene/carbon nanotube nanocomposites by instrumented indentation / F. Stan, A. M. Turcanu, C. Fetecau // *Polymers*. – 2020. – Vol. 12. – No. 11. – P. 2535. – URL: <https://doi.org/10.3390/polym12112535> (date of access: 01/18/2024).
- 10 **Parvini, C. H.** Extracting viscoelastic material parameters using an atomic force microscope and static force spectroscopy / C. H. Parvini, M. A. S. R. Saadi, S. D. Solares // *Beilstein J. Nanotechnology*. – 2020. – Vol. 11. – P. 922–937. – URL: <https://doi.org/10.3762/bjnano.11.77> (date of access: 01/18/2024).
- 11 An indentation study of the temperature-dependent properties of modified polyurethanes / E. V. Torskaya, A. A. Yakovenko, I. V. Shkaley [et al.] // *Physical Mesomechanics*. – 2023. – Vol. 26. – No. 3. – P. 29–38. – DOI 10.55652/1683-

С. 29–38. – DOI 10.55652/1683-805X_2023_26_3_29.

12 Исследование методом микроиндентирования образцов эпоксидной смолы, упрочненной наночастицами диоксида кремния / С. В. Смирнов, Е. О. Смирнова, И. А. Веретенникова [и др.] // *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. – 2017. – № 1. – С. 24–35. – DOI 10.17804/2410-9908.2017.1.024-035.

13 An overview of microscale indentation fatigue : Composites, thin films, coatings, and ceramics / Md. M. Islam, S. I. Shakil, N. M. Shaheen [et al.] // *Micron*–2021. – Vol. 148. – No. 18 – 22 p. – DOI 10.1016/j.micron.2021.103110.

14 Оценка влияния отвердителя на механические свойства эпоксидных покрытий на основе смолы ЭД-20 / С. В. Смирнов, И. А. Веретенникова, Д.А. Коновалов [и др.] // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2023. – № 1. – С. 6–16. – DOI 10.17804/2410-9908.2023.1.006-016.

15 Studying the Mechanical Properties of Epoxy Adhesive Coatings by Instrumented Indentation / S. V. Smirnov, I. A. Veretennikova, E. O. Smirnova [et al.] // *Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures (MRDMS-2019)*. – 2019. – 22 p. – DOI 10.1063/1.5135120.

16 **Belyak, O. A.** Predicting the Mechanical Properties of Antifriction Composite Materials / O. A. Belyak, T. V. Suvorova // *Mechanics of Composite Materials*. – 2021. – Vol. 57. – No. 5. – P. 647–656. – DOI 10.1007/s11029-021-09986-7.

17 **Menczel, J. D.** Thermal Analysis of Polymers : Fundamentals and Applications / J. D. Mencze, R. B. Prime // John Wiley & Sons, Incorporated. – 2014. – 2009. – 698 p. – DOI 10.1007/s10973-010-1071-7.

18 Механические и трибологические характеристики модифицированной эпоксидной смолы наноразмерной шпинелью железа / П. Г. Ивановкин, С. А. Данильченко, Д. С. Мантуров [и др.] // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. – 2022. – № 3 (87). – С. 6–17. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_3_6.

805X_2023_26_3_29.

12 Studying epoxy resin reinforced with silica dioxide nanoparticles by microindentation / S. V. Smirnov, E. O. Smirnova, I. A. Veretennikova [et al.] // *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. – 2017. – No. 1. – P. 24–35. – DOI 10.17804/2410-9908.2017.1.024-035.

13 An overview of microscale indentation fatigue : Composites, thin films, coatings, and ceramics / Md. M. Islam, S. I. Shakil, N. M. Shaheen [et al.] // *Micron*–2021. – Vol. 148. – No. 18 – 22 p. – DOI 10.1016/j.micron.2021.103110.

14 Effect of hardeners on the mechanical properties of epoxy coatings based on ED-2 resin // S. V. Smirnov, I. A. Veretennikova, D. A. Konovalov [et al.] // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2023. – No. 1. – P. 6–16. – DOI 10.17804/2410-9908.2023.1.006-016.

15 Studying the Mechanical Properties of Epoxy Adhesive Coatings by Instrumented Indentation / S. V. Smirnov, I. A. Veretennikova, E. O. Smirnova [et al.] // *Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures (MRDMS-2019)*. – 2019. – 22 p. – DOI 10.1063/1.5135120.

16 **Belyak, O. A.** Predicting the Mechanical Properties of Antifriction Composite Materials / O. A. Belyak, T. V. Suvorova // *Mechanics of Composite Materials*. – 2021. – Vol. 57. – No. 5. – P. 647–656. – DOI 10.1007/s11029-021-09986-7.

17 **Menczel, J. D.** Thermal Analysis of Polymers : Fundamentals and Applications / J. D. Mencze, R. B. Prime // John Wiley & Sons, Incorporated. – 2014. – 2009. – 698 p. – DOI 10.1007/s10973-010-1071-7.

18 Studies of epoxy resin modified by nanoscale iron spinel / P. G. Ivanochkin, S. A. Danilchenko, D. S. Manturov [et al.] // *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya*. – 2022. – No. 3 (87). – P. 6–17. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_3_6.

A. I. Azoyan, D. S. Manturov, D. N. Shishiyanu, S. A. Danilchenko

EXPERIMENTAL STUDY OF THE INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF A COMPOSITE MATERIAL

Abstract. The influence of temperature on the physical and mechanical properties of the composite material has been studied. As the matrix of the polymer composite, epoxy-diane resin of the ED-20 brand was used using different types of fillers. The experimental data were obtained by instrumental indentation and thermal analysis. A relative change in indentation depth was used to estimate the creep rate of the material. Based on the obtained integral ther-

mogravimetric curves of TG, a quantitative change in the mass of the sample during decomposition was determined, and based on differential thermogravimetric curves of DTG, the temperature range of destruction, the temperature of the beginning and end of decomposition were determined. It has been shown that the introduction of fillers into the polymer matrix has a significant effect not only on viscoelastic properties, but also on thermal stability as a result of structural transformations and changes in the mobility of molecules.

Keywords: composite, viscoelasticity, indentation, thermogravimetry.

For citation: Experimental study of the influence of temperature on the physico-mechanical properties of a composite material / A. I. Azojan, D. S. Manturov, D. N. Shishiyanu, S. A. Danilchenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 1. – P. 186–195. – DOI 10.46973/0201–727X_2024_1_186.

Сведения об авторах

Азоян Анаид Иосиповна

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), кафедра «Теоретическая механика», младший научный сотрудник, e-mail: azojan.anaid@mail.ru

Мантуров Дмитрий Сергеевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), кафедра «Теоретическая механика», заведующий лабораторией, кандидат технических наук, e-mail: manturovds@rgups.ru

Шишияну Дарья Николаевна

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), кафедра «Химия», кандидат технических наук, доцент, e-mail: erm@rgups.ru

Данильченко Сергей Александрович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), кафедра «Теоретическая механика», младший научный сотрудник,

Южный федеральный университет (ЮФУ)

Институт математики, механики и компьютерных наук им. И. И. Воровича, лаборатория механики деформируемых тел и конструкций, младший научный сотрудник, e-mail: sergey.a.danilchenko@gmail.com

Information about the authors

Azoyan Anaid Iosipovna

Rostov State Transport University (RSTU), Chair «Theoretical Mechanics», Junior Researcher, e-mail: azojan.anaid@mail.ru

Manturov Dmitriy Sergeevich

Rostov State Transport University (RSTU), Chair «Theoretical Mechanics», Head of Laboratory, Candidate of Engineering Sciences, e-mail: manturovds@rgups.ru

Shishiyanu Dariya Nikolayevna

Rostov State Transport University (RSTU), Chair «Chemistry», Candidate of Engineering Sciences, Associated Professor, e-mail: erm@rgups.ru

Danilchenko Sergey Aleksandrovich

Rostov State Transport University (RSTU), Chair «Theoretical Mechanics», Junior Researcher,

Southern Federal University (SFU),

Institute for Mathematics, Mechanics and Computer Sciences named after I. I. Vorovich, Laboratory for Mechanics of Deformable Bodies and Constructions, Junior Researcher, e-mail: sergey.a.danilchenko@gmail.com

АНАЛИЗ КОНСТРУКТОРСКОГО РЕШЕНИЯ «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО» РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ТОКАРНЫХ ОПЕРАЦИЙ ОТРЕЗКИ

Аннотация. Предложена конструкция, реализующая принцип саморегулирования с помощью упругого элемента, увеличивающего его значение при возрастании сил резания, для проработки технического решения «интеллектуального» инструмента с управлением передним углом режущего клина для токарных операций отрезки. Рассмотрены результаты моделирования условий равновесия сил, действующих на поворотный сектор резца с изменяемым передним углом на операциях отрезки. Подтверждена техническая реализуемость предлагаемого технического решения с саморегулированием переднего угла. Получены рекомендации по выбору параметров узла саморегулирования, определены условия наиболее эффективного использования предлагаемого устройства резца. Подтверждена техническая реализуемость предложенного технического решения «интеллектуального» инструмента для управления процессом резания по переднему углу режущего клина на операциях отрезки.

Ключевые слова: «интеллектуальный» инструмент, операции отрезки, моделирование, условие равновесия сил, поворотный сектор, реакции опор, момент управления.

Для цитирования: Ерзин, О. А. Анализ конструкторского решения «интеллектуального» режущего инструмента для токарных операций отрезки / О. А. Ерзин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1. – С. 196–204. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_196.

Современный этап развития практически всех методов обработки связан с возрастанием роли оперативного управления параметрами, определяющими режимы и условия их реализации. В лезвийной обработке практически достигнут предел с точки зрения управления такими режимными параметрами, как скорость, подача и глубина резания.

Как показали проведенные ранее исследования, широкие перспективы повышения эффективности процессов резания связаны с управлением кинематическими углами режущего клина [1–4]. Анализ процессов управления, в частности, передним углом в предложенной конструкции проходного резца [5, 6] подтвердил его техническую реализуемость в условиях сложной нелинейной взаимосвязи его параметров, которая потребовала привлечения методов робастного управления и рационального выбора параметров систем управления и элементов конструкции на этапе синтеза законов управления [7–9].

К сложностям реализации управления передним углом, помимо нелинейности связей параметров, следует добавить нестационарность процесса резания, оказывающую отрицательное влияние практически на все технологические показатели операций точения. Нарушение стационарности определяется большим числом факторов, которые могут быть связаны с колебаниями припуска на обработку и параметров режима резания, характеристик заготовок, инструмента и оборудования, с погрешностями установки инструмента и т. п. Они носят стохастический характер. К детерминированным факторам, определяемым технологически обусловленным неуправляемым изменением параметров режима резания, следует отнести, например, скорость резания на операциях отрезки, прорезки канавок, подрезки торцов или поперечного точения.

В результате исследований операций отрезки [10], проведенных с использованием температурно-силовой модели С. С. Силина [11] и В. Ф. Безъязычного [12], установлено, что в рассмотренных условиях резания:

– абсолютные значения нормальных составляющих существенно зависят от оборотной подачи и увеличиваются по мере заглубления инструмента в заготовку более чем на 30 и 50 % для $S_o = 0,05$ мм / об и $S_o = 0,15$ мм / об соответственно;

– тангенциальная и радиальная составляющие равнодействующей силы резания по мере заглубления увеличиваются на 50 и 80 % для $S_o = 0,05$ мм / об и на 45 и 120 % для $S_o = 0,15$ мм / об соответственно;

– при увеличении переднего угла в пределах $-10 \geq \gamma \geq 15^\circ$ относительное значение нормальной составляющей силы стружкообразования к передней поверхности изменяется в пределах 38...50 %, слабо (не

более 5 %) зависит от оборотной подачи и погрешности установки инструмента, а момент поворота сектора вокруг режущей кромки носит экстремальный характер и изменяется всего на 15...25 %.

Относительно малые абсолютные значения момента поворота – менее (0,02...0,2) Нм – говорят о высокой энергоэффективности канала управления передним углом режущего клина на операциях отрезки.

Для проработки технического решения «интеллектуального» инструмента с управлением передним углом режущего клина для токарных операций отрезки предложена конструкция, реализующая принцип саморегулирования с помощью упругого элемента, увеличивающего его значение при возрастании сил резания (рис. 1).

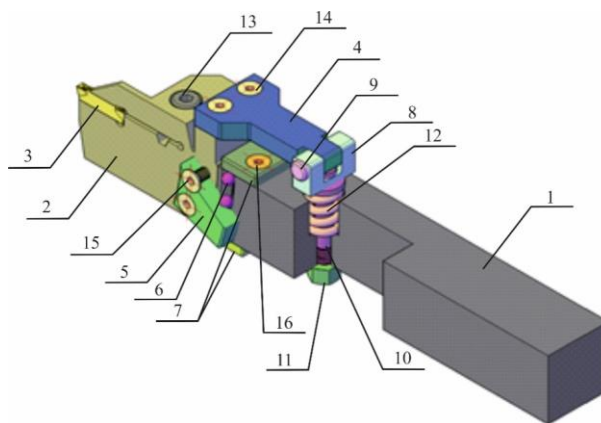


Рис. 1. Конструкторское решение отрезного резца с управляемым передним углом:

1 – державка; 2 – подвижный сектор; 3 – режущая пластина; 4 – рычаг; 5 – съемная круговая направляющая; 6 – шарикоподшипники; 7 – ограничители для шариков; 8 – серьга; 9 – штифт; 10 – шпилька; 11 – гайка; 12 – пружина механизма саморегулирования переднего угла; 13, 14, 15, 16 – винты крепления режущей пластины, рычага и съемных круговых направляющих к сектору, ограничителей шариков круговых направляющих к державке соответственно

Конструктивно выделенный элемент предложенного резца – сектор 2 – характеризуется теми же параметрами, что и элемент проходного резца для продольного точения [6]: радиусами сектора R_s , положением его центра масс R_{CS} , центральным углом или углом заострения β и весом P_s , приложенным к центру масс CS . Его угловое положение относительно оси 0 задается углами γ , α передним и задним соответственно. На сектор действуют силы: нормальные составляющие и силы трения $N_{\text{п}}$, $F_{\text{ттр}}$ на передней поверхности режущего клина и N_3 , $F_{\text{зтр}}$ на задней его поверхности; усилие управления передним углом $F_{\text{упр}}$; реакции опор R_A , R_B , верхней и нижней соответственно [10].

Базирование режущей кромки пластины 3 в подвижном секторе 2 определяется центром его поворота вокруг режущей кромки. Точка приложения усилия управления определяется расстоянием радиуса сектора R_s и длины рычага от точки приложения управляющей силы $F_{\text{упр}}$ до образующей сектора:

$$H_y = R_s + h_y.$$

Нормальные и тангенциальные составляющие сил резания на передней и задней поверхностях режущего клина $N_{\text{п}}$, $F_{\text{птр}}$, N_3 , $F_{\text{зтр}}$ соответственно, а также координаты точек их приложения $X_{\text{п}}$, X_3 являются нелинейными функциями переднего угла и текущего относительного времени выполнения операции отрезка $T_{om} = t / t_k f_i(\gamma, T_{om})|_{\hat{S}_o, \hat{V}_p, \hat{t}_k, \hat{t}_p, \hat{h}_{p=}}$. Они определяются для расчетных значений $\hat{S}_o, \hat{V}_p, \hat{t}_k, \hat{t}_p, \hat{h}_{p=}$ – оборотной подачи, скорости резания, ширины резца, времени окончания операции и погрешности установки резца по модели, рассмотренной в [10].

Система уравнений, описывающих условие равновесия сектора в процессе резания в плоскости, перпендикулярной режущей кромке [6],

$$\begin{aligned} N_3 \cos \alpha - N_{\text{п}} \sin \gamma + F_{\text{птр}} \cos \gamma + F_{\text{зтр}} \sin \alpha - R_A \cos \gamma - R_B \sin \alpha &= 0; \\ N_{\text{п}} \cos \gamma - N_3 \sin \alpha + F_{\text{зтр}} \cos \alpha + F_{\text{птр}} \sin \gamma + P_s - R_B \cos \alpha - R_A \sin \gamma - F_{\text{упр}} &= 0; \end{aligned} \quad (1)$$

$$M_{пз} - M_{упр} = 0; \quad (2)$$

$$M_{пз} = N_{п} \cdot X_{п} - N_{з} \cdot X_{з} + P_{s} \cdot h_{st}; \quad M_{упр} = F_{упр} \cdot H_y,$$

где $M_{пз}$ – момент, повораивающий подвижный сектор резца под действием сил резания; $M_{упр}$ – момент, предназначенный для изменения его углового положения.

Для равновесия режущего клина из последнего уравнения следует, что сила управления должна изменяться по следующему закону:

$$F_{упр} = \frac{N_{п} \cdot X_{п} - N_{з} \cdot X_{з} + P_{s} \cdot R_{cs} \cdot \cos(\gamma + \beta / 2)}{H_y}. \quad (3)$$

Принцип саморегулирования, реализованный в предлагаемом техническом решении с помощью пружины, имеет следующий вид:

$$M_{упр}(\gamma) = M_{упр}^{\min}(\gamma, T_{om}) \Big|_{T_{om}=0} + C_{пр} \cdot (H_y \cdot \sin \gamma - X_0) \cdot H_y, \quad (4)$$

где $C_{пр}$, X_0 – жесткость и предварительная деформация пружины 3 (см. рис. 1).

Моделирование токарной операции отрезки заготовок проведено на примере и режимах, рассмотренных в [10] для стали 40X. Параметры инструмента: отрезной резец с пластиной T15K6 с углами $\gamma = -10...+15^\circ$, $\beta = 65^\circ$, $r_1 = 0.2 \cdot 10^{-3}$ м, $r = 0.5 \cdot 10^{-3}$ м; погрешность установки по высоте отсутствует; державка $B_d \times h_d = 20 \times 20$ мм; сектор с $R_s = 20 \cdot 10^{-3}$ м и $H_y = 30 \cdot 10^{-3}$ м. В частности, в соответствии с (1) получены значения реакций опор R_A, R_B и $F_{упр}$ (рис. 2) для различных значений переднего угла $\gamma = -10...+10^\circ$ и подачи на оборот $S_o = 0,05...0,15$ мм/об.

По мере заглублиения инструмента в заготовку увеличение R_A, R_B наиболее интенсивно происходит только при $T_{om} > 0,8...0,85$. При $S_o = 0,05$ мм/об до этого момента в зависимости от переднего угла реакции опор увеличиваются: R_A – на 70...100 Н, R_B – на 50...100 Н, после него – на 170...200 Н и 250...400 Н (рис. 2, а). При $S_o = 0,15$ мм/об до этого момента в зависимости от переднего угла реакции опор увеличиваются: R_A – на 100...300 Н, R_B – на 100...200 Н, после него – на 350...700 Н и 500...700 Н (рис. 2, б). По мере уменьшения переднего угла, независимо от подачи на оборот, реакция R_A уменьшается, а R_B увеличивается, причем R_A может изменить знак, то есть возникают размыкающие усилия в верхней части круговых направляющих.

Из рис. 2, в, г видно, что для стабилизации углового положения сектора $\gamma = +5^\circ$ в предложенном техническом решении инструмента достаточно приложить силу управления $F_{упр} = f(T_{om})$, более чем на порядок меньшую значений реакции в верхней опоре и практически повторяющую закон изменения $R_A = f(T_{om})$. Причем для $S_o = 0,05$ мм/об $R_A > 0$ и $F_{упр} < R_A$, а для $S_o = 0,15$ мм/об $F_{упр} > R_A$ и при $T_{om} = 0,9$ изменяет знак с $R_A < 0$ на $R_A > 0$.

Поскольку, как показали исследования [10] и рис. 2, нестационарность процесса резания на токарных операциях отрезки наиболее существенно проявляется на финише при относительном значении времени их выполнения $T_{om} > 0,8...0,85$, то целесообразно параметры $C_{пр}$, X_0 выбирать из следующих соображений:

$$X_0 = H_y \sin \gamma_{\min}; \quad C_{пр} = \frac{M_{пз}^{\max}(\gamma, T_{om}) \Big|_{T_{om}=0,95} - M_{пз}^{\min}(\gamma, T_{om}) \Big|_{T_{om}=0}}{H_y^2 (\sin \gamma_{\max} - \sin \gamma_{\min})}. \quad (5)$$

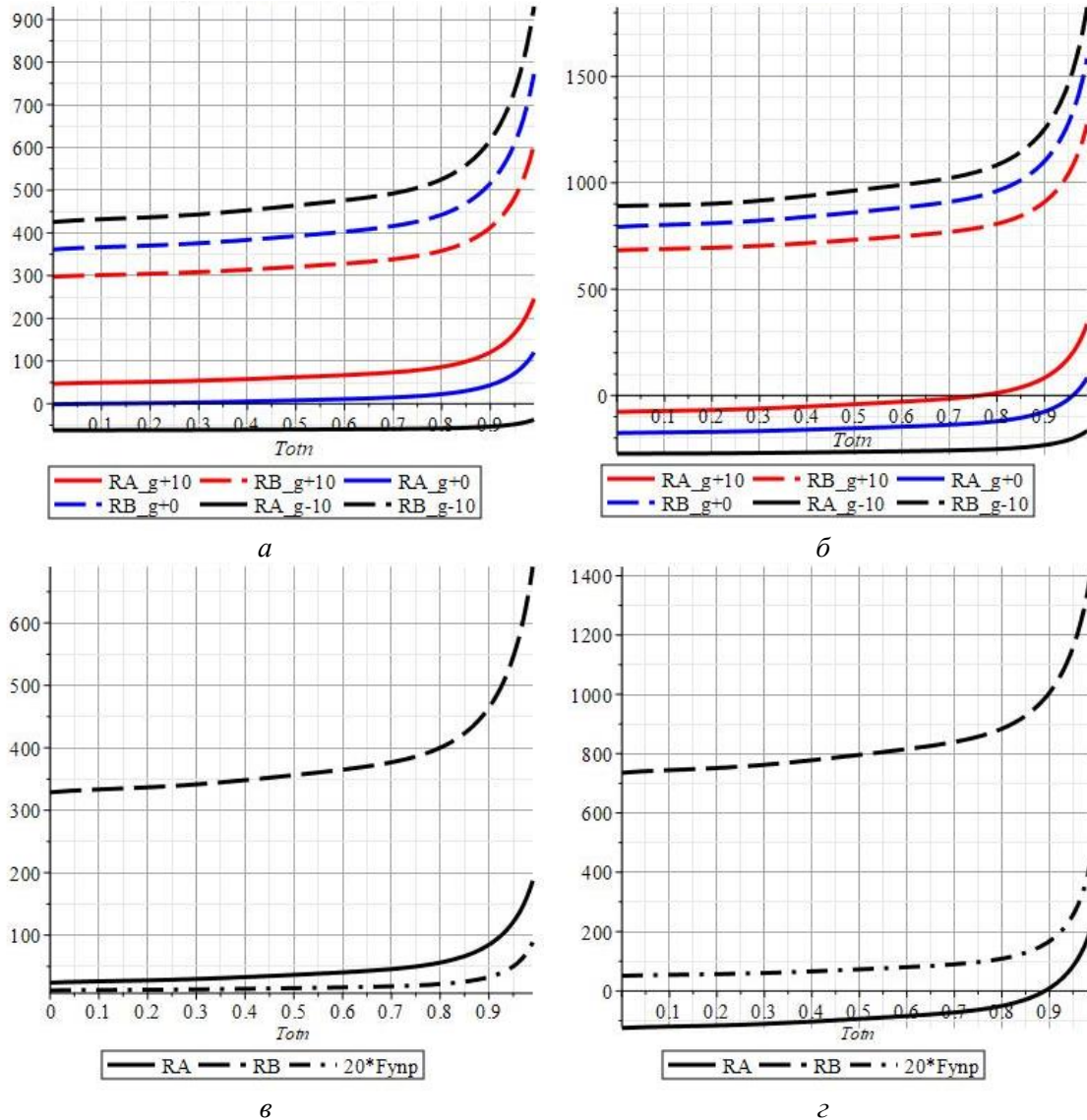


Рис. 2. Зависимости $R_A = f(T_{om})$, $R_B = f(T_{om})$ и $F_{yup} = f(T_{om})$:

a и $в$ – при $S_0 = 0,05$ мм/об; $б$ и $г$ – при $S_0 = 0,15$ мм/об;

a и $б$ – при $\gamma = -10^\circ, 0, +10^\circ$; $в$ и $г$ – при $\gamma = +5^\circ$

Для настройки узла саморегулирования $M_{yup}(\gamma)$ (4) и (5) на весь диапазон изменения подачи на оборот ($S_0 = 0,05 \dots 0,15$ мм/об) на основании зависимостей изменения момента поворота режущего клина по мере заглупления инструмента в заготовку $M_{пз}(\gamma, T_{om})$ (рис. 3, a) были выбраны следующие координаты точек $M_{yup}(\gamma)$: $\gamma_{max} = 15,0^\circ$; $\gamma_{min} = 0^\circ$ и $M_{пз}^{max}(\gamma, T_{om})|_{T_{om}=0,95} = 0,16$; $M_{пз}^{min}(\gamma, T_{om})|_{T_{om}=0} = 0,01$. С их помощью на основании выражения (5) получены значения $X_0 = 0$; $C_{np} = 644,0$ Н/м. Путем решения нелинейного уравнения $M_{пз}(\gamma, T_{om}) - M_{yup}(\gamma) = 0$ (см. рис. 3, a) получена зависимость управляемого изменения угла поворота сектора по мере заглупления инструмента в заготовку $\gamma_{yup}(T_{om})$ (рис. 3, $б$), реализующая принцип саморегулирования в диапазоне $S_0 = 0,05 \dots 0,15$ мм/об.

Из приведенных графиков (рис. 3, $в$ и $г$) видно, что использование выбранной настройки $M_{yup}(\gamma)$ узла саморегулирования позволяет при $S_0 = 0,15$ мм/об уменьшить силы резания $P_z = f(T_{om})$, $P_x = f(T_{om})$ на финише операции на 15...20 %. При этом реакция на опоре A возрастает, а на опоре B уменьшается.

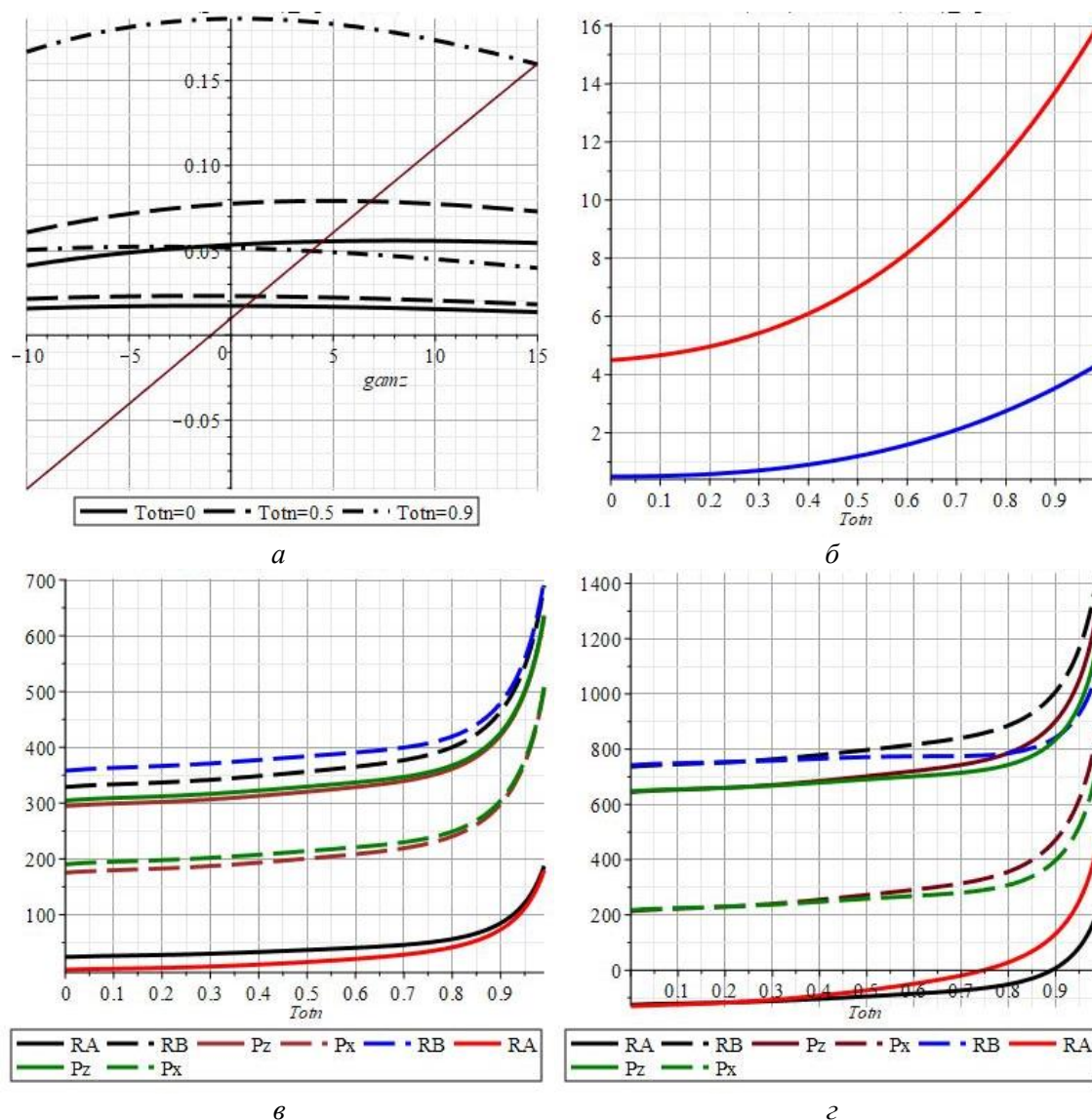


Рис. 3. Результаты моделирования силовых характеристик при постоянной настройке узла саморегулирования:

a – моментов нагрузки $M_{н3}(\gamma, T_{om})$ и момента управления $M_{ynp}(\gamma)$; *б* – углов поворота сектора $\gamma_{ynp}(T_{om})$;

в и *г* – реакции опор $R_A = f(T_{om})$, $R_B = f(T_{om})$ и составляющие сил резания $P_z = f(T_{om})$, $P_x = f(T_{om})$;

в – для $S_o = 0,05$ мм / об; *г* – для $S_o = 0,15$ мм / об;

$\gamma = +5^\circ$ – черный, коричневый; $\gamma = \gamma_{ynp}(T_{om})$ – красный, синий, зеленый

Можно видеть, что на малых значениях подачи на оборот ($S_o = 0,05$ мм / об) при определенной выше настройке $M_{ynp}(\gamma)$ саморегулирование практически не оказывает влияния на силы резания на финише операции и даже приводит к незначительному их увеличению на большей части врезания инструмента в заготовку (рис. 3, *в*).

В связи с этим было проведено моделирование силовых характеристик при различных значениях настройки узла саморегулирования: $M_{ynp1}(\gamma)$ при $S_o = 0,05$ мм / об и $M_{ynp2}(\gamma)$ при $S_o = 0,15$ мм / об. Результаты моделирования приведены на рис. 4.

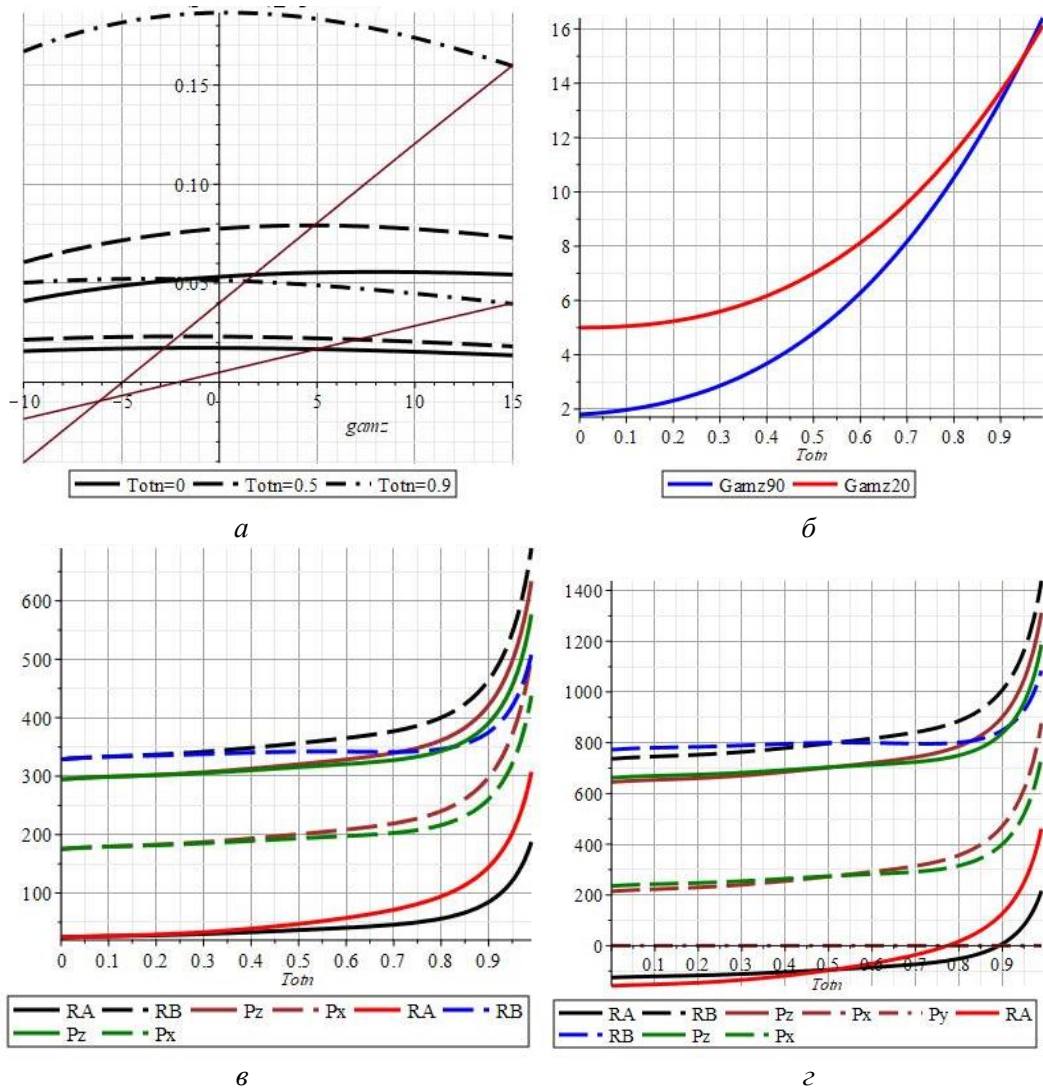


Рис. 4. Результаты моделирования силовых характеристик при различных значениях настройки узла саморегулирования:

a – момента нагрузки $M_{п3}(\gamma, T_{ом})$, моментов управления $M_{упр1}(\gamma)$, $M_{упр2}(\gamma)$; *б* – углов поворота сектора $\gamma_{упр1}(T_{ом})$, $\gamma_{упр2}(T_{ом})$; *в* и *г* – реакции опор $R_A = f(T_{ом})$, $R_B = f(T_{ом})$ и составляющие сил резания $P_z = f(T_{ом})$, $P_x = f(T_{ом})$;
в – для $S_o = 0,05$ мм/об; *г* – для $S_o = 0,15$ мм/об;
 $\gamma = +5^\circ$ – черный, коричневый; $\gamma = \gamma_{упр}(T_{ом})$ – красный, синий, зеленый

По аналогии с предыдущими рассуждениями по зависимостям $M_{п3}(\gamma, T_{ом})$ определены значения параметров $X_{o1} = 0,008$ м; $C_{пр1} = 150,3$ Н/м для $M_{упр1}(\gamma)$ и $X_{o2} = 0,01$ м; $C_{пр2} = 515,1$ Н/м для $M_{упр2}(\gamma)$. На основании решения нелинейных уравнений $M_{п3}(\gamma, T_{ом}) - M_{упр}(\gamma) = 0$ (рис. 4, *a*) получены зависимости управляемого изменения угла поворота сектора по мере заглубления инструмента в заготовку $\gamma_{упр1}(T_{ом})$ и $\gamma_{упр2}(T_{ом})$ (рис. 4, *б*), реализующие принцип саморегулирования для $S_o = 0,05$ мм/об и $S_o = 0,15$ мм/об соответственно.

Результаты изменения настроек узла саморегулирования $M_{упр2}(\gamma)$ для $S_o = 0,15$ мм/об (рис. 4, *г*) существенно отличаются от результатов, приведенных на рис. 4, *в*. Изменение настроек узла саморегулирования $M_{упр1}(\gamma)$ для $S_o = 0,05$ мм/об (см. рис. 4, *в*) привело на финише операции к уменьшению при $T_{ом} > 0,6$ составляющих силы резания $P_z = f(T_{ом})$, $P_x = f(T_{ом})$ на 50...70 Н. В то же время при

$T_{om} > 0,4$ реакция опоры $R_A = f(T_{om})$ увеличилась, реакция опоры $R_B = f(T_{om})$ уменьшилась, например, при $T_{om} = 0,98$ на 120 и 200 Н соответственно.

Проведенные исследования показали, что узел саморегулирования, приведенный на рис. 1, не может обеспечить одинакового качества управления передним углом режущего клина по мере его заглубления в заготовку на операциях отрезки для различных условий обработки. Предложенное техническое решение требует поднастройки узла при изменении, например, подачи на оборот, что практически невозможно в оперативном режиме. Это показывает, что для стабилизации сил резания в желаемом диапазоне на операции отрезки глубины регулирования переднего угла режущего клина, технически реализуемой в рассмотренном устройстве, совершенно недостаточно.

С учетом того, что погрешность установки резца относительно оси обрабатываемой заготовки оказывает влияние на его кинематический передний угол и силы резания [10], проведен анализ влияния ее изменения на распределение сил в предложенной конструкции резца (см. рис. 1). Результаты моделирования при установке резца выше оси на $h_d = 0,3 \cdot S_o$ приведены на рис. 5.

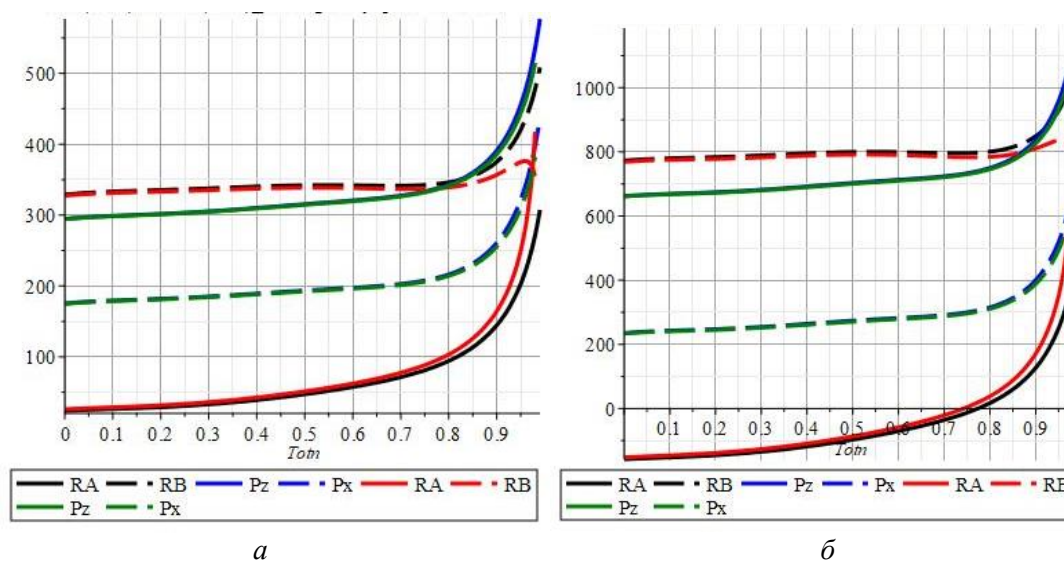


Рис. 5. Зависимости $R_A = f(T_{om})$, $R_B = f(T_{om})$, $P_z = f(T_{om})$, $P_x = f(T_{om})$:

a – для $S_o = 0,05$ мм / об ; b – для $S_o = 0,15$ мм / об ;

$h_d = 0$ – черный, синий; $h_d = 0,3 \cdot S_o$ – красный, зеленый

Из анализа приведенных графиков можно сделать вывод, что смещение резца вверх относительно оси детали практически не сказывается на составляющих сил резания. В то же время на финише операции $T_{om} = 0,98$ реакция на верхней опоре $R_A = f(T_{om})$ увеличивается, а на нижней опоре $R_B = f(T_{om})$ уменьшается при $S_o = 0,05$ мм / об на 120 и 150 Н, при $S_o = 0,15$ мм / об – на 220 и 210 Н соответственно. Наблюдается практически стабилизация реакции на нижней опоре на уровне 320 и 800 Н.

На основании проведенных исследований установлено, что предложенное техническое решение «интеллектуального» инструмента для управления процессом резания по переднему углу режущего клина на операциях отрезки технически реализуемо. Однако оно может быть эффективно использовано только в узком диапазоне изменения режимов резания, что связано с применением принципа саморегулирования, основанного на упругом элементе, определяющем угловое положение режущего клина в зависимости от нагрузки на него. Для использования предлагаемого подхода в более широком диапазоне изменения условий резания необходимо совместить регулирование переднего угла и подачи на основе принципов робастного управления. Поскольку канал управления передним углом в связи с малыми усилиями и подвижными массами обладает высоким быстродействием, то наибольший результат от его применения следует ожидать на частотах управления, соизмеримых с частотами образования сегментов стружки. Для моделирования таких процессов управления необходимо использовать ранее предложенные авторами дискретные модели процесса резания [13, 14].

Список литературы

- 1 **Sellmer, D.** High-performance processing by means of the “intellektualnyq” cutting tools / D. Sellmer // Werkstatt und Betrieb. – 2001. – No. 3. – P. 38–40.
- 2 **Шадский, Г. В.** Принципы регулирования направления вектора внешнего воздействия при лезвийном разрушении материала в режиме реального времени / Г. В. Шадский, В. С. Сальников, О. А. Ерзин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 10. – С. 585–590. – ISSN 2071-6168.
- 3 **Шадский, Г. В.** Перспективы управления кинематическими углами режущего клина на операциях точения / Г. В. Шадский, В. С. Сальников, О. А. Ерзин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – Вып. 12. – С. 342–349. – ISSN 2071-6168.
- 4 **Шадский, Г. В.** Анализ технических возможностей кинематическими углами режущего клина при точении / Г. В. Шадский, В. С. Сальников, О. А. Ерзин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – Вып. 12. – С. 360–367. – ISSN 2071-6168.
- 5 **Патент RU2741397C1.** Резец с изменяемым передним углом / Г. В. Шадский, В. С. Сальников, О. А. Ерзин. – № RU2020129113A ; заявл. 02.09.2020 ; опубл. 25.01.2021.
- 6 **Сальников, В. С.** Анализ конструкторского решения «интеллектуального» режущего инструмента с управляемым передним углом / В. С. Сальников, Г. В. Шадский, О. А. Ерзин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – Вып. 10. – С. 400–406. – DOI 10.24412/2071-6168-2022-10-400-406.
- 7 **Шадский, Г. В.** Синтез системы управления передним углом режущего клина при точении / Г. В. Шадский, В. С. Сальников, О. А. Ерзин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – Вып. 8. – С. 313–322. – DOI 10.24412/2071-6168-2021-8-313-322.
- 8 **Шадский, Г. В.** Робастное управление передним углом режущего клина при точении / Г. В. Шадский, В. С. Сальников, О. А. Ерзин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – Вып. 8. – С. 297–302. – DOI 10.24412/2071-6168-2021-8-297-302.
- 9 **Шадский, Г. В.** Параметризация системы управления передним углом режущего клина для операций точения / Г. В. Шадский, В. С. Сальников, О. А. Ерзин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – Вып. 9. – С. 620–629. – DOI 10.24412/2071-6168-2021-9-620-629.

References

- 1 **Sellmer, D.** High-performance processing by means of the “intellektualnyq” cutting tools / D. Sellmer // Werkstatt und Betrieb. – 2001. – No. 3. – P. 38–40.
- 2 **Shadskiy, G. V.** Principles of regulation of the external impact vector direction at blade material destruction in real time mode / G. V. Shadskiy, V. S. Salnikov, O. A. Erzin // Proceedings of the Tula State University. Technical Sciences. – 2018. – No. 10. – P. 585–590. – ISSN 2071-6168.
- 3 **Shadsky, G. V.** Prospects of controlling the kinematic angles of the cutting wedge at turning operations / G. V. Shadsky, V. S. Salnikov, O. A. Erzin // Proceedings of the Tula State University. Technical Sciences. – 2019. – Issue. 12. – P. 342–349. – ISSN 2071-6168.
- 4 **Shadsky, G. V.** Analysis of technical possibilities by kinematic angles of a cutting wedge at turning / G. V. Shadsky, V. S. Salnikov, O. A. Erzin // Proceedings of the Tula State University. Technical Sciences. – 2019. – Issue. 12. – P. 360–367. – ISSN 2071-6168.
- 5 **Patent RU2741397C1.** Cutter with variable front angle / G. V. Shadsky, V. S. Salnikov, O. A. Erzin. – No. RU2020129113A ; application form 09.02.2020 ; published 01/25/2021.
- 6 **Salnikov, V. S.** Analysis of the design solution of the “intellectual” cutting tool with a controlled front angle / V. S. Salnikov, G. V. Shadskiy, O. A. Erzin // Proceedings of the Tula State University. Technical Sciences. – 2022. – Issue. 10. – P. 400–406. – DOI 10.24412/2071-6168-2022-10-400-406.
- 7 **Shadskiy, G.V.** Synthesis of the control system of the cutting wedge front angle at turning / G. V. Shadskiy, V. S. Salnikov, O. A. Erzin // Proceedings of the Tula State University. Technical sciences. – 2021. – Issue. 8. – P. 313–322. – DOI 10.24412/2071-6168-2021-8-313-322.
- 8 **Shadskiy, G. V.** Robust control of the cutting wedge front angle during turning / G. V. Shadskiy, V. S. Salnikov, O. A. Erzin // Proceedings of the Tula State University. Technical Sciences. – 2021. – Issue. 8. – P. 297–302. – DOI 10.24412/2071-6168-2021-8-297-302.
- 9 **Shadskiy, G. V.** Parametrization of the control system of the cutting wedge front angle for turning operations / G. V. Shadskiy, V. S. Salnikov, O. A. Erzin // Proceedings of the Tula State University. Technical Sciences. – 2021. – Issue. 9. – P. 620–629. – DOI 10.24412/2071-6168-2021-9-620-629.

10 Сальников, В. С. Перспективы управления передним углом режущего клина при технологической обусловленности изменения скорости резания / В. С. Сальников, Г. В. Шадский, О. А. Ерзин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 12. – С. 276–284. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-12-276-277.

11 Силин, С. С. Методы подобия при резании материалов / С. С. Силин. – Москва : Машиностроение, 1979. – 162 с.

12 Безъязычный, В. Ф. Расчет режимов резания : учебное пособие / В. Ф. Безъязычный, И. Н. Аверьянов, А. В. Кордюков. – Рыбинск : РГАТА, 2009. – 185 с.

13 Шадский, Г. В. Дискретная модель движения стружки по передней поверхности режущего клина / Г. В. Шадский, О. А. Ерзин, В. С. Сальников // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – Вып. 11. – Ч. 2. – С. 553–560. – ISSN 2071-6168.

14 Shadskii, G. V. Dynamic Aspects of Chip Formation / G. V. Shadskii, O. A. Erzin, S. V. Salnikov // Russian Engineering Research. – 2018. – Vol. 38. – No. 2. – P. 130–134.

10 Salnikov, V. S. Prospects of the cutting wedge front angle control at technological conditionality of the cutting speed change / V. S. Salnikov, G. V. Shadskiy, O. A. Erzin // Proceedings of the Tula State University. Technical Sciences. – 2023. – No. 12. – P. 276–284. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-12-276-277.

11 Silin, S. S. Similarity methods in cutting of materials / S. S. Silin. – Moscow : Mashinostroenie, 1979. – 162 p.

12 Bezyazichny, V. F. Calculation of cutting modes : tutorial / V. F. Bezyazichny, I. N. Averyanov, A. V. Kordyukov. – Rybinsk : RSATA, 2009. – 185 p.

13 Shadskiy, G. V. Discrete model of a chip motion on the front surface of a cutting wedge / G. V. Shadskiy, O. A. Erzin, V. S. Salnikov // Proceedings of the Tula State University. Technical Sciences. – 2016. – Issue. 11. – Part 2. – P. 553–560. – ISSN 2071-6168.

14 Shadskii, G. V. Dynamic Aspects of Chip Formation / G. V. Shadskii, O. A. Erzin, S. V. Salnikov // Russian Engineering Research. – 2018. – Vol. 38. – No. 2. – P. 130–134.

O. A. Erzin

ANALYSIS OF THE DESIGN SOLUTION OF AN “INTELLIGENT” CUTTING TOOL FOR TURNING OPERATIONS

Abstract. The invention proposes a design implementing the principle of self-regulation with the help of an elastic element which improves its value at increasing cutting forces, for working out the technical solution of the “intelligent” tool with control of the front angle of the cutting wedge for section turning operations. It is considered the results of simulating conditions of equilibrium of forces acting on cutter rotary sector with variable front angle at section operations. The technical feasibility of the proposed technical solution with front angle self-regulation has been confirmed. The recommendations on selection of parameters of self-adjustment unit are obtained. It is determined the conditions of most effective use of proposed cutter device. The technical feasibility of the proposed technical solution for an “intelligent” tool for controlling the cutting process along the front angle of the cutting wedge during cutting operations has been confirmed.

Keywords: intelligent” tool, cutting operations, modeling, force equilibrium condition, rotary sector, support reactions, control torque.

For citation: Erzin, O. A. Analysis of the design solution of an “intelligent” cutting tool for turning operations / O. A. Erzin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 1. – P. 196–204. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_196.

Сведения об авторе

Ерзин Олег Александрович
Тульский государственный университет
(ТулГУ),
кафедра «Промышленная автоматика и робототехника»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail:erzin79@mail.ru

Information about the author

Erzin Oleg Alexandrovich
Tula State University (TulSU),
Chair «Industrial Automation
and Robotics»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: erzin79@mail.ru

О. А. Ерзин

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕДНИМ УГЛОМ РЕЖУЩЕГО КЛИНА НА ОПЕРАЦИЯХ ОТРЕЗКИ

Аннотация. Рассмотрена математическая модель процесса управления передним углом режущего клина на токарных операциях отрезки, проведен синтез системы управления, обеспечивающий требуемые показатели качества ее реакции на периодические процессы образования и схлопывания поверхностей сдвига при стружкообразовании. На основании проведенных исследований подтверждена возможность и перспективность создания «интеллектуального» инструмента, использующего управление передним углом его режущего клина в зависимости от условий резания. Предложенный подход к созданию «интеллектуальных» инструментов для выполнения операций токарной обработки носит инновационный характер и позволит повысить эффективность выполнения работ в широком диапазоне изменения условий резания.

Ключевые слова: математическая модель, поворотная режущая головка, передний угол, момент поворота, синтез.

Для цитирования: Ерзин, О. А. Техническое обеспечение управления передним углом режущего клина на операциях отрезки / О. А. Ерзин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1. – С. 205–211. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_205.

Одно из перспективных направлений совершенствования технологического оборудования, в частности для обработки резанием, связано с увеличением числа управляемых координат. Это в большей степени обусловлено стремлением к расширению технологических возможностей с точки зрения формообразования. Известные попытки управления условиями резания, в частности путем изменения кинематических углов режущего клина, определили тенденцию создания «интеллектуального» инструмента [1–4]. Это направление, несмотря на первое упоминание в 2001 г. [1], к сожалению, до сих пор не получило должного теоретического обоснования и практической проработки. В то же время известны работы, например, по лазерной обработке, где наряду с типовыми осями координатных перемещений введены «электронные оси» управления параметрами лазерного воздействия [5, 6].

Анализ конструкторского решения проходного резца [3, 4] и проблем управления его передним кинематическим углом [7] подтвердил техническую реализуемость предложенного подхода в условиях нелинейной взаимосвязи параметров процесса резания. Сложность его реализации усугубляется нестационарностью, оказывающей отрицательное влияние практически на все технологические показатели операций, например, отрезки [8].

Предложено оригинальное техническое решение «интеллектуального» инструмента для управления процессом резания по переднему углу режущего клина на операциях отрезки. Оно основано на принципе саморегулирования, реализуемом упругим элементом, увеличивающим значение угла при возрастании сил резания [9].

Для целей более широкого исследования перспектив построения систем управления передним углом режущего клина на операциях отрезки, обеспечивающих желаемые динамические характеристики, механическое звено саморегулирования в [9] заменено электрическим каналом управления аналогично [3]. Как и в рассмотренном ранее подходе к синтезу [7], резец представлен состоящим из конструктивно выделенного элемента резца – поворотного сектора, рычага, линейного двигателя (или двигателя с ШВП) и преобразователя – усилителя мощности. Угол поворота сектора вокруг режущей кромки определяет передний угол режущего клина инструмента.

Линеаризованная математическая модель такой системы управления характеризуется теми же координатами состояния: γ – угол поворота сектора; $\dot{\gamma}$ – скорость поворота сектора; x – величина перемещения штока двигателя; \dot{x} – скорость штока двигателя; I_d – ток якоря двигателя; e_n – выходное напряжение преобразователя [7]. Она отличается от рассмотренной в [7] системы управления только значениями параметров: R_s , L_r – радиус и длина рычага сектора; J_s , C_s , h_s – момент инерции, жесткость и коэффициент вязкого трения сектора; m_{np} , C_d , h_d – приведенная масса, жесткость и коэффициент вязкого трения привода;

L_d, R_d, C_e, C_m – индуктивность, активное сопротивление, электрическая и механическая постоянные двигателя; K_n, τ, U_s – коэффициент преобразования, постоянная времени и входное напряжение преобразователя системы управления; D_m – коэффициент линеаризации зависимости момента разворота сектора вокруг режущей кромки под действием сил резания от переднего угла.

Для обеспечения ее технической реализуемости устройства на основании статических расчетов и разработанной методики параметризации [7] обоснованы конкретные значения конструктивных характеристик узлов и параметров элементов системы. В частности, в державке сечением 25×25 мм конструктивно выделен сектор радиусом $R_s = 20$ мм, меньшей высоты державки [9]. Это обеспечивает расчетную прочность инструмента в направлении действия равнодействующей сил резания. Центральный угол сектора 60° и длина рычага $L_r = 10$ мм обеспечивают изменение угла поворота сектора до 15° , перекрывающего практически весь диапазон используемых углов [3, 4, 8]. При этом максимальная величина перемещения штока привода не превышает 7 мм.

В результате выполненной параметризации рекомендованы следующие значения параметров элементов системы управления: $J_s = 32,0 \cdot 10^{-6}$ Нмс²/рад; $C_s = 1,0 \cdot 10^4$ Нм/рад; $h_s = 0,6$ Нмс/рад; $K_{fi} = 0,052$ м; $m_{np} = 0,02$ кг; $C_d = 1,2 \cdot 10^7$ Н/м; $h_d = 600,0$ Нс/м; $R_d = 3,4$ Ом; $L_d = 0,1 \cdot 10^{-3}$ Гн; $C_m = 16,43$ Н/А; $C_e = 5,25$ Вс/м; $K_n = 1200,0$; $\tau = 0,15 \cdot 10^{-3}$ с; $D_m = -(0,04 \dots 0,2)$ Нм/рад.

Для известных условий резания [8]: отрезка заготовок из стали 40X ($\sigma_b = 6,15 \cdot 10^8$ Н/м², $\tau_p = 5,63 \cdot 10^8$ Н/м², $a = 6,75 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $\lambda = 33,9$ Дж/м·с·град.) отрезным резцом с пластиной из стали Т15К6 шириной $t = (2,0 \dots 4,0) \cdot 10^{-3}$ м и углами $\alpha = 5^\circ$, $\gamma = 0^\circ$, $\phi_1 = 5^\circ$, $r_1 = 0,2 \cdot 10^{-3}$ м, $r = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м и при использовании рекомендованных режимов резания: $S_0 = (0,05 \dots 0,15) \cdot 10^{-3}$ м, $V_p = 0,5 \dots 1,5$ м/с максимальный момент разворота режущего клина относительно режущей кромки составляет 0,22 Нм, а минимальный – 0,05 Нм [8]. Этому соответствует максимальное усилие на рычаге не более 7,5 Н.

В соответствии с подходами, апробированными для синтеза систем управления передним углом на операциях точения [7], для их описания использована матричная форма записи:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{b}\mathbf{u}, \quad (1)$$

где $\mathbf{A} = \|a_{ij}\|_{6 \times 6}$; $\mathbf{b} = \|b_1 \dots b_6\|_{6 \times 1}^T$ – вещественные матрицы параметров системы указанных размерностей; $\mathbf{X} = \|x_i\|_{1 \times 6}^T$ – вектор координат состояния системы; $\mathbf{u} = \|u_i\|_{1 \times 6}^T$ – вектор управляющих воздействий.

Вид и форма используемых матриц, а также зависимости их коэффициентов от параметров системы управления определяются аналогично [6].

Задача синтеза модального регулятора для рассматриваемой системы заключается в определении коэффициентов обратных связей по координатам состояния k_i ($i = \overline{1,6}$) [10, 11].

$$u = -k_1 x_1 - \dots - k_6 x_6 = -\mathbf{k}^T \mathbf{X}, \quad (2)$$

при которых замкнутая система имела бы желаемый «стандартный» характеристический полином 6-го порядка [10], определяющий соответствующее ему качество процесса управления:

$$g(p) = p^6 + \omega_0 g_5 p^5 + \omega_0^2 g_4 p^4 + \omega_0^3 g_3 p^3 + \omega_0^4 g_2 p^2 + \omega_0^5 g_1 p + \omega_0^6 g_0, \quad (3)$$

где g_i – нормированные коэффициенты полинома ($i = \overline{1,6}$); ω_0 – техническая постоянная, имеющая размерность частоты и определяющая масштаб представления переходной характеристики системы во времени.

Этому полиному соответствует каноническая форма записи матрицы желаемой системы управления \mathbf{G} .

С учетом обратных связей (2) уравнение свободного движения замкнутой системы примет вид:

$$\dot{\mathbf{X}} = (\mathbf{A} - \mathbf{b}\mathbf{k}^T) \mathbf{X}. \quad (4)$$

Матрица коэффициентов может быть найдена из сравнения матрицы \mathbf{G} с матрицей параметров системы (4), представленной в той же канонической форме, что и \mathbf{G} .

На основании матрицы канонического преобразования \mathbf{P} уравнение (1) может быть записано в канонической форме

$$\dot{\tilde{\mathbf{X}}} = \tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{X}} + \tilde{\mathbf{b}}\tilde{\mathbf{u}}, \quad (5)$$

где $\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{P}\mathbf{A}\mathbf{P}^{-1}$; $\tilde{\mathbf{b}} = \mathbf{P}\mathbf{b}$; $\tilde{\mathbf{X}} = \mathbf{P}\mathbf{X}$ и $\mathbf{X} = \mathbf{P}^{-1}\tilde{\mathbf{X}}$.

Для полностью управляемой системы матрица канонического преобразования \mathbf{P} пары $\{\mathbf{A}, \mathbf{b}\}$ в пару $\{\tilde{\mathbf{A}}, \tilde{\mathbf{b}}\}$ единственна и вычисляется по формуле [11]

$$\mathbf{P} = \tilde{\mathbf{R}}\mathbf{R}^{-1}, \quad (6)$$

где $\mathbf{R}, \tilde{\mathbf{R}}, \mathbf{R}^{-1}$ – матрицы управляемости систем (1) и (5), а также обратная к матрице (1).

Полагая по аналогии с (2) $\tilde{\mathbf{u}} = -\tilde{\mathbf{k}}^T\tilde{\mathbf{X}}$, уравнение свободного движения замкнутой системы запишем в канонической форме:

$$\dot{\tilde{\mathbf{X}}} = (\tilde{\mathbf{A}} - \tilde{\mathbf{b}}\tilde{\mathbf{k}}^T)\tilde{\mathbf{X}}. \quad (7)$$

Матрица канонического преобразования устанавливает связь между матрицами коэффициентов обратных связей уравнений (2) и (7):

$$\mathbf{k}^T = \tilde{\mathbf{k}}^T \cdot \mathbf{P}. \quad (8)$$

Для обеспечения требуемого качества проектируемой системы, формируемого выбранным желаемым «стандартным» характеристическим полиномом (3), достаточно тождественно приравнять матрицу правой части уравнения (7) матрице \mathbf{G} :

$$\tilde{\mathbf{A}} - \tilde{\mathbf{b}}\tilde{\mathbf{k}}^T = \mathbf{G}. \quad (9)$$

Исходя из этого матричного уравнения решение можно записать в следующем виде:

$$\tilde{k}_i = g_{i-1} - \tilde{a}_{i-1}, \quad i = \overline{1, \dots, 6}, \quad (10)$$

то есть $\tilde{k}_1 = g_0 - \tilde{a}_0$; $\tilde{k}_2 = g_1 - \tilde{a}_1$; $\tilde{k}_3 = g_2 - \tilde{a}_2$; $\tilde{k}_4 = g_3 - \tilde{a}_3$; $\tilde{k}_5 = g_4 - \tilde{a}_4$; $\tilde{k}_6 = g_5 - \tilde{a}_5$.

Используя решение (10) на основании (8), получим искомую матрицу – строку коэффициентов передачи модального регулятора в исходном базисе \mathbf{k}^T .

Синтезированная система управления позволяет определить ее динамические характеристики, а также оценить возможную реакцию на дискретное воздействие сил резания на режущий клин.

Результаты исследований

Коэффициенты матриц \mathbf{A} и \mathbf{b} для приведенных выше параметров системы принимают следующие значения: $a_{12} = 1$; $a_{21} = -3,125 \cdot 10^8$; $a_{22} = -1,875 \cdot 10^4$; $a_{23} = 6,01 \cdot 10^9$; $a_{24} = 3,61 \cdot 10^5$; $a_{34} = 1$; $a_{41} = 9,62 \cdot 10^8$; $a_{42} = 576,92$; $a_{43} = -7,85 \cdot 10^8$; $a_{44} = -4,109 \cdot 10^4$; $a_{45} = 821,5$; $a_{54} = -5,25 \cdot 10^4$; $a_{55} = -3,4 \cdot 10^4$; $a_{56} = 1,0 \cdot 10^4$; $a_{66} = 6,67 \cdot 10^3$; $b_{61} = 8,0 \cdot 10^6$.

Не указанные коэффициенты равны нулю.

Получены матрицы управляемости систем (1) и (5)

$$\mathbf{R} = \begin{vmatrix} \mathbf{b} & \mathbf{A} \cdot \mathbf{b} & \mathbf{A}^2 \cdot \mathbf{b} & \mathbf{A}^3 \cdot \mathbf{b} & \mathbf{A}^4 \cdot \mathbf{b} & \mathbf{A}^5 \cdot \mathbf{b} \end{vmatrix}_{6 \times 6};$$

$$\tilde{\mathbf{R}} = \begin{vmatrix} \tilde{\mathbf{b}} & \tilde{\mathbf{A}} \cdot \tilde{\mathbf{b}} & \tilde{\mathbf{A}}^2 \cdot \tilde{\mathbf{b}} & \tilde{\mathbf{A}}^3 \cdot \tilde{\mathbf{b}} & \tilde{\mathbf{A}}^4 \cdot \tilde{\mathbf{b}} & \tilde{\mathbf{A}}^5 \cdot \tilde{\mathbf{b}} \end{vmatrix}_{6 \times 6}.$$

Учитывая исходные данные, дальнейший расчет показал, что $\text{rang} \|\mathbf{R}\| = 6$ и $\text{rang} \|\tilde{\mathbf{R}}\| = 6$. Это подтверждает полную управляемость исходной системы и позволяет использовать рассмотренную выше методику.

Конкретизированный вид «стандартного» характеристического полинома, в частности Баттерворта 6-го порядка, имеет вид [10]

$$g(p) = (p^2 + 0,51764\omega_0 p + \omega_0^2) \cdot (p^2 + 1,41421\omega_0 p + \omega_0^2) \cdot (p^2 + 1,93185\omega_0 p + \omega_0^2). \quad (11)$$

Исходя из требований к динамическим характеристикам системы управления углом поворота сектора в области частот дискретного воздействия на него сил резания $f = 0,5...20$ кГц [12, 13, 14] приемлемой технической постоянной $\omega_0 = 50\,000,0$ с⁻¹.

На основании приведенной выше методики, используя (8), получили искомую матрицу – строку коэффициентов передачи модального регулятора в исходном базисе \mathbf{k}^T .

Для упрощения практической реализации системы управления выполнено округление коэффициентов обратной связи. Округление потребовало осторожного подхода, поскольку в определенных случаях оно приводило к существенному ухудшению качества переходных процессов. Наиболее рациональный вариант матрицы коэффициентов принял вид:

$$\mathbf{k}_{\text{round}}^T = \left\| 2,0 \cdot 10^4 \quad 0,12 \cdot 10^5 \quad 3,0 \cdot 10^5 \quad 5,45 \quad 0,07 \quad 0,01 \right\|. \quad (12)$$

Исходя из (1) и (12) нормированные переходные характеристики систем: h_{ish} – исходной, h_{ig} – желаемой и h_{it} – с модальным регулятором вида (12) – приведены на рис. 1.

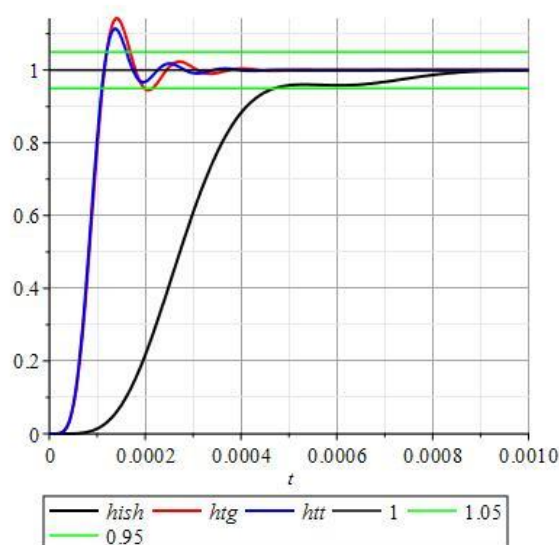


Рис. 1. Нормированные переходные характеристики систем: исходной, желаемой и с модальным регулятором вида (12)

Из рис. 1 видно, что применение модального регулятора позволило уменьшить длительность переходного процесса с 0,45 до 0,17 мс, т. е. более чем 2,5 раза. Реакция системы на обратный импульс длительностью 300 мкс, поданный на вход системы с задержкой на завершение в ней переходного процесса от установки заданного значения переднего угла режущего клина, приведена на рис. 2. На нем показаны: U_{bx} – импульсное входное воздействие, h_{imp} – реакция системы на входное воздействие и h_{it} – переходный процесс установки заданного значения переднего угла режущего клина. Можно видеть, что задержка импульса достигает 50 мкс, а длительности фронтов – 80 мкс. Это говорит о возможности системы достаточно адекватно реагировать на воздействия с частотой до 2,5 кГц, соответствующей цикличности сегментации стружки на операции отрезки [12–15].

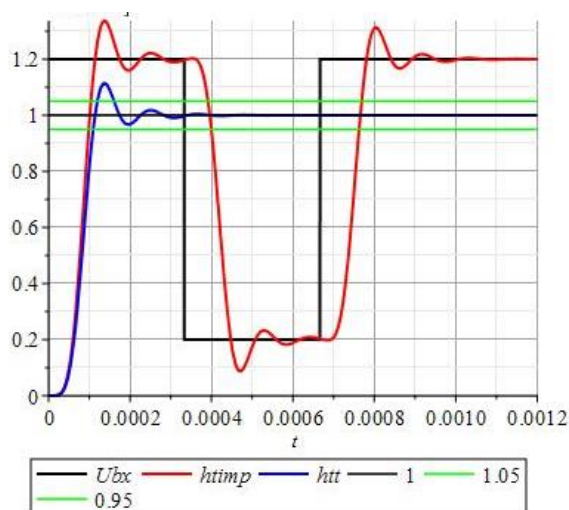


Рис. 2. Реакция системы на обратный импульс по входу

На основании проведенных исследований подтверждена возможность и перспективность создания «интеллектуального» инструмента, использующего управление передним углом его режущего клина в зависимости от условий резания. Проведенный синтез его системы управления показал, что она позволяет отслеживать и адекватно реагировать на периодически (до 2,5 кГц) изменяемое состояние системы.

Предложенный подход к созданию инструментов для операций токарной обработки носит инновационный характер и позволит повысить ее эффективность в широком диапазоне изменения условий резания.

Список литературы

- 1 **Sellmer, D.** High-performance processing by means of the “intellektualnyq” cutting tools / D. Sellmer // Werkstatt und Betrieb. – 2001. – No. 3. – P. 38–40.
- 2 **Патент на изобретение RU 2443510 C1.** Токарный резец с изменяемым передним углом / Е. Б. Шелкунов, О. Н. Порошин / № RU2010144908/02A ; заявл. 02.11.2010 ; опубл. 27.02.2012.
- 3 **Патент RU2741397C1.** Резец с изменяемым передним углом / Г. В. Шадский, В. С. Сальников, О. А. Ерзин. – № RU2020129113A ; заявл. 02.09.2020 ; опубл. 25.01.2021.
- 4 **Сальников, В. С.** Анализ конструкторского решения «интеллектуального» режущего инструмента с управляемым передним углом / В. С. Сальников, Г. В. Шадский, О. А. Ерзин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2022. – Вып. 10. – С. 400–406.
- 5 **Мартинов, Г. М.** Расширение функциональных возможностей системы ЧПУ для управления установкой электронно-лучевой сварки / Г. М. Мартинов, В. В. Плихунов, А. В. Коваленко // Авиационная промышленность. – 2009. – № 1. – С. 16–21. – ISSN 0869-530X.
- 6 Синтез и анализ системы автоматического управления лазерным технологическим комплексом / В. В. Звездин, С. М. Портнов, Р. А. Кисаев, И. Н. Кузнецов // Проектирование и

References

- 1 **Sellmer, D.** High-performance processing by means of the “intellektualnyq” cutting tools / D. Sellmer // Werkstatt und Betrieb. – 2001. – No. 3. – P. 38–40.
- 2 **Patent RU 2443510 C1.** Turning cutter with variable front corner / E. B. Shelkunov, O. N. Poroshin. – No. RU2010144908/02A ; filed 11.02.2010 ; published 02.27.2012.
- 3 **Patent RU2741397C1.** Cutter with variable front angle / G. V. Shadsky, V. S. Salnikov, O. A. Erzin. – No. RU2020129113A ; filed 09.02.2020 ; published 01/25/2021.
- 4 **Salnikov, V. S.** Analysis of the design solution of an “intelligent” cutting tool with a controlled front angle / V. S. Salnikov, G. V. Shadsky, O. A. Erzin // Proceedings of the Tula State University. Technical Sciences. – Tula : Publishing House of TulSU, 2022. – Issue. 10. – P. 400–406.
- 5 **Martinov, G. M.** Expansion of CNC system functionality for control of electron beam welding plant / G. M. Martinov, V. V. Plikhunov, A. V. Kovalenko // Aviation industry. – 2009. – No. 1. – P. 16–21. – ISSN 0869-530X.
- 6 Synthesis and analysis of the automatic control system of the laser process complex / V. V. Zvezdin, S. M. Portnov, P. A. Kisaev, I. N. Kuznetsov // Design and study of technical

- исследование технических систем : межвузовский научный сборник. – Наб. Челны : Изд-во ИНЭКА, 2010. – № 15. – С. 9–45.
- 7 **Шадский, Г. В.** Параметризация системы управления передним углом режущего клина для операций точения / Г. В. Шадский, В. С. Сальников, О. А. Ерзин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – Вып. 9. – С. 620–629. – DOI 10.24412/2071-6168-2021-9-620-629.
- 8 **Сальников, В. С.** Перспективы управления передним углом режущего клина при технологической обусловленности изменения скорости резания / В. С. Сальников, Г. В. Шадский, О. А. Ерзин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 12. – С. 276–284. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-12-276-277.
- 9 **Сальников, В. С.** Техническое решение отрезного резца с управляемым передним углом / В. С. Сальников, Г. В. Шадский, О. А. Ерзин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула : Изд-во ТулГУ, 2024. – №. 2. – С. 3–6. – DOI 10.24412/2071-6168-2024-2-3-6.
- 10 **Гайдук, А. Р.** Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления (полиномиальный подход) : монография / А. Р. Гайдук. – Москва : Физматлит, 2012. – 360 с. – ISBN 978-5-9221-1424-0.
- 11 **Афанасьев, В. Н.** Математическая теория конструирования систем управления / В. Н. Афанасьев, В. Б. Колмановский, В. Р. Носов. – 3-е изд., испр. и доп. – Москва : Высшая школа, 2003. – 615 с. – ISBN 5-06-004162-X.
- 12 **Волков, Д. И.** Разработка модели процесса резания с учетом цикличности формирования стружки / Д. И. Волков, С. Л. Проскуряков // Вестник УГАТУ. Машиностроение. – Уфа : Изд-во УГАТУ, 2011. – Т. 15, № 3 (43). – С. 72–78. – ISSN 1992-6502.
- 13 **Ye, G. G.** Influence of cutting conditions on the cutting performance of TiAl6V4 / G. G. Ye1, Shi Feng Xue, Xing Hua Tong, Lan-Hong Dai // Advanced Materials Research. – 2011. – Vol. 337. – P. 387–391. – DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.337.387.
- 14 **Евсеев, Л. Л.** Исходные положения и зависимости для расчета характеристик динамики процесса резания металлов / Л. Л. Евсеев // Вестник машиностроения. – 1995. – № 12. – С. 1–7. – ISSN 0042-463.
- 15 **Евсеев, Л. Л.** Расчет оптимальной скорости резания по коэффициенту динамичности процесса
- systems : intercollegiate scientific collection. – Nab. Chelny : INECA Publishing House, 2010. – No. 15. – P. 39–45.
- 7 **Shadsky, G. V.** Parametrization of the front angle control system of the cutting wedge for turning operations / G. V. Shadsky, V. S. Salnikov, O. A. Erzin // Proceedings of the Tula State University. Technical Sciences. – 2021. – Issue. 9. – P. 620–629. – DOI 10.24412/2071-6168-2021-9-620-629.
- 8 **Salnikov, V. S.** Prospects for controlling the front angle of the cutting wedge with the technological conditioning of the change in cutting speed / V. S. Salnikov, G. V. Shadsky, O. A. Erzin // Proceedings of the Tula State University. Technical Sciences. – 2023. – No. 12. – P. 276–284. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-12-276-277.
- 9 **Salnikov, V. S.** Technical solution of a cutting cutter with a controlled front angle/V.S. Salnikov, G. V. Shadsky, O. A. Erzin // Proceedings of the Tula State University. Technical Sciences. – Tula : Publishing House of TulSU, 2024. – No. 2. – P. 3–6. – DOI 10.24412/2071-6168-2024-2-3-6.
- 10 **Gaiduk, A. R.** Theory and methods of analytical synthesis of automatic control systems (polynomial approach) : monograph / A. R. Gaiduk. – Moscow : Fizmatlit, 2012. – 360 p. – ISBN 978-5-9221-1424-0.
- 11 **Afanasyev, V. N.** Mathematical theory of design of control systems / V. N. Afanasyev, V. B. Kolmanovsky, V. R. Nosov. – 3rd ed., rev. and expand. – Moscow : Higher School, 2003. – 615 p. – ISBN 5-06-004162-X.
- 12 **Volkov, D. I.** Development of a model of the cutting process taking into account the cyclical nature of the formation of chips / D. I. Volkov, S. L. Proskuryakov // USATU Bulletin. Mechanical engineering. – Ufa : Publishing House of USATU, 2011. – Vol. 15, No. 3 (43). – P. 72–78. – ISSN 1992-6502.
- 13 **Ye, G. G.** Influence of cutting conditions on the cutting performance of TiAl6V4 / G. G. Ye1, Shi Feng Xue, Xing Hua Tong, Lan-Hong Dai // Advanced Materials Research. – 2011. – Vol. 337. – P. 387–391. – DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.337.387.
- 14 **Evseev, L. L.** Initial positions and dependencies for calculating the characteristics of the dynamics of the metal cutting process / L. L. Evseev // Russian Engineering Research. – 1995. – No. 12. – P. 1–7. – ISSN 0042-463.
- 15 **Evseev L. L.** Calculation of the optimal cutting speed by the dynamic factor of the chip formation

стружкообразования / Л. Л. Евсеев // СТИН. – process / L. L. Evseev // STIN. – 1994. – No. 4. –
1994. – № 4. – С. 41–43. – ISSN 0869-7566. P. 41–43. – ISSN 0869-7566.

O. A. Erzin

TECHNICAL SUPPORT FOR FRONT ANGLE CONTROL WEDGE ON CUTTING OPERATIONS

Abstract. The paper considers a mathematical model of the process of controlling the front angle of the second wedge at turning operations of the section. It is carried out a synthesis of the control system which provides the required indicators of the quality of its reaction to periodic processes of formation and collapse of shear surfaces during chip formation. Based on the studies carried out, the possibility and prospects of creating an "intelligent" tool using the control of the front angle of its wedge depending on the cutting conditions have been confirmed.

Keywords: mathematical model, rotary cutting head, front angle, moment of rotation, synthesis.

For citation: Erzin, O. A. Technical support for front angle control wedge on cutting operations / O. A. Erzin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 1. – P. 205–211. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_205.

Сведения об авторе

Ерзин Олег Александрович
Тульский государственный
университет (ТулГУ),
кафедра «Промышленная автоматика и
робототехника»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail:erzin79@mail.ru

Information about the author

Erzin Oleg Alexandrovich
Tula State University (TulSU),
Chair «Industrial Automation
and Robotics»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: erzin79@mail.ru

В. А. Крутова, А. Н. Чукарин, А. А. Порческо

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВИБРАЦИЙ В РАМАХ МОСТОВЫХ КРАНОВ

Аннотация. Несущие рамы мостовых кранов изготавливаются из швеллеров разного типоразмера. В качестве модели источника шума приняты линейные излучатели, поскольку длина источника значительно превышает максимальный размер поперечного сечения. Расчет скоростей колебаний для энергетически замкнутой системы, состоящей из стержневых элементов, основан на уравнениях энергетического баланса. Снижение интенсивности звукового излучения может быть выполнено либо уменьшением вводимой в раму вибрационной мощности от источников вибрации, таких как редукторы механизмов подъема и перемещения, узлы колесных пар и барабан механизма подъема, либо увеличением диссипативных свойств элементов рамы. В данной статье приведен расчет скоростей колебаний несущей рамы и показано влияние системы вибропоглощения на снижение уровней шума.

Ключевые слова: шум, вибрация, несущие рамы, мостовые краны.

Для цитирования: Крутова, В. А. Моделирование возникновения вибраций в рамах мостовых кранов / В. А. Крутова, А. Н. Чукарин, А. А. Порческо // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1. – С. 212–219. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_212.

Введение

Предпосылкой настоящего исследования послужило то, что существующие на данный момент работы по изучению уровней шума были посвящены в основном оценке уровней звукового давления, создаваемых внутри производственных помещений. При оценке уровней шума внутри кабин такое допущение является грубым, и поэтому в данной статье приведены исследования, основанные на эксперименте с системой поршневых источников, излучающих звуковую энергию в замкнутый объем, при этом размеры самих излучателей соизмеримы с габаритными размерами кабины. Для кабин с большой площадью остекления характерно то, что само остекление является «слабым» элементом не только в плане звукоизоляции, но и по распределению вибраций.

Основная часть

Несущие рамы практически всех типов мостовых кранов представляют собой замкнутые стержневые конструкции из швеллеров, балок двутаврового сечения [1–10]. Несущие элементы кабин с большой площадью остекления [11] представляют собой также замкнутую стержневую конструкцию из уголков (рис. 1).

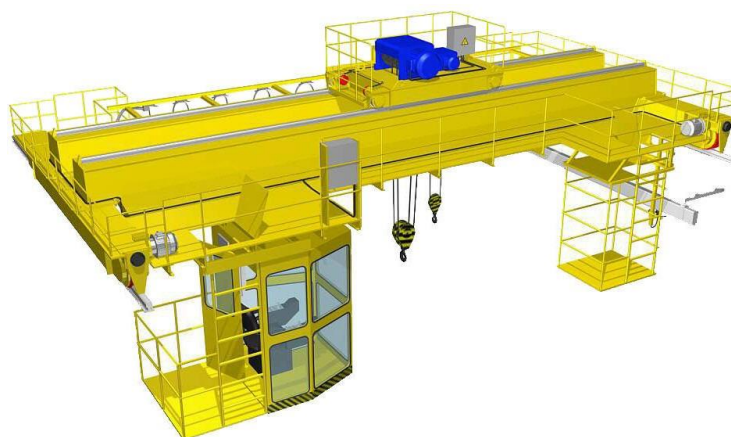


Рис. 1. Кабина крана

Для расчета виброскоростей таких конструкций целесообразно рассмотреть распространение вибраций в замкнутой стержневой системе (рис. 2).

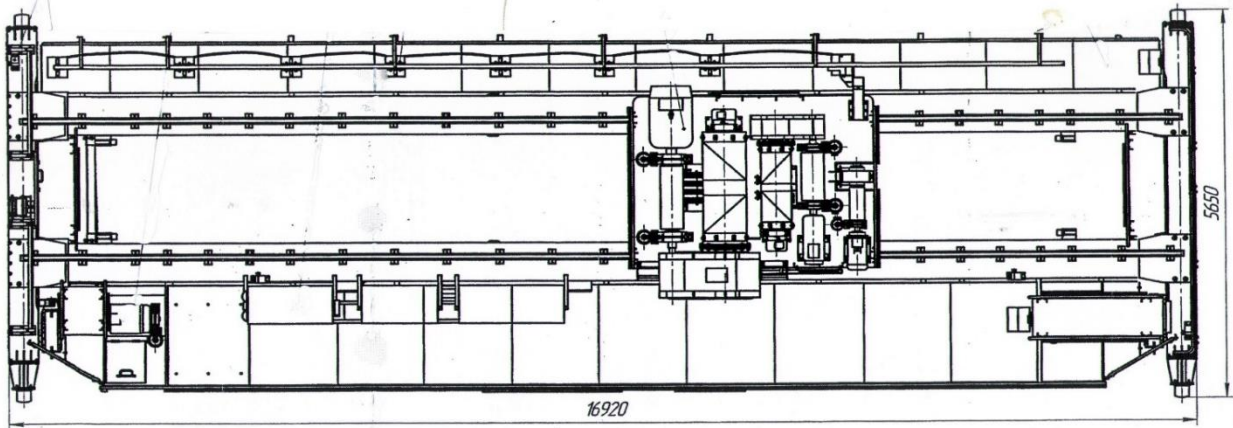


Рис. 2. Несущая рама мостового крана

На основании закона сохранения энергии для схемы (рис. 3):

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \Pi_1 - \Pi_2, \quad (1)$$

где ε – энергия элементарного объема;
 Π_1 и Π_2 – потоки энергии через сечение $x = x_1$ и $x = x_2$.

На границе $x = x_2$: координаты торцов стержней в исходном состоянии, соответственно концы торцов элементов рамы, представляющие собой стержни, плотно касаются друг друга и равны – первого стержня x_1 и x_1 , второго x_2 и x_2 . Существующие характеристики первого стержня будем обозначать индексом I, второго – II.

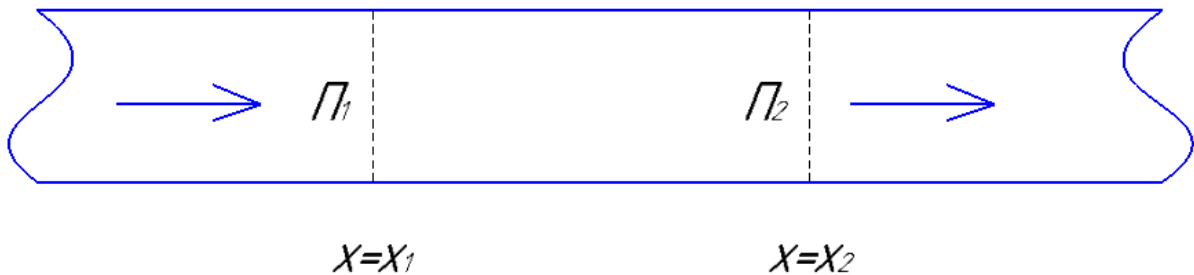


Рис. 3. Схема распределения потоков энергии

На основании (1) запишем:

$$\frac{d[\mathcal{E}(x,t)]^I}{dt} = [\Pi(x_1,t)]^I - [\Pi(x_2,t)]^I;$$

$$\frac{d[\mathcal{E}(x,t)]^{II}}{dt} = [\Pi(x_2,t)]^{II} - [\Pi(x_3,t)]^{II},$$

где \mathcal{E} – энергия; $x = x_1$ у первого стержня и $x = x_3$ у второго стержня свободны, а потому через них изменение потоков энергии в данной системе стержней не происходит. Отсюда следует, что возможен обмен энергией только через границу сопряжения $x = x_2$, следовательно,

$$\frac{d\left\{[\mathcal{E}(x,t)]^I - [\mathcal{E}(x,t)]^{II}\right\}}{dt} = [\Pi(x_2,t)]^I - [\Pi(x_2,t)]^{II},$$

т. е. установившийся режим между двумя стержнями возможен в двух случаях: во-первых, если потоки будут равны между собой в любой момент времени и, во-вторых, если со временем каждый из потоков устремится в пределе к нулю.

С целью изучения поведения потоков энергии между двумя стержнями воспользуемся методом Даламбера, в котором основой структурного построения является представление решения волнового уравнения в виде суммы двух функций, имеющих с учетом суперпозиции вид:

$$u(x, t) = \Phi(ct - x) + \varphi(ct + x), \quad (2)$$

где Φ и φ – функции, описывающие прямую и обратную волну соответственно.

Деформация и скорость смещения сечения определяются после дифференцирования уравнения (2) по координате и времени:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} &= -\Phi(ct - x) + \varphi(ct + x), \\ \frac{\partial u}{\partial x} &= +c[\Phi(ct - x) + \varphi(ct + x)] \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

На основании закона Гука для границы сопряжения стержней запишем граничное уравнение в виде:

$$\left[ES \frac{\partial u(x_2, t)}{\partial x} \right]^I = -[ku(x_2, t)]^{II},$$

$$\frac{\partial u(x_2, t)}{\partial x} + \frac{k}{ES} u(x_2, t) = 0. \quad (4)$$

Величина $[u(x_2, t)]^I = [u(x_2, t)]^{II}$, иначе бы стержни не находились в постоянном контакте (в рамках принятой модели условие разрывности механической связи исключается).

Подставляя соотношение (3) в уравнение (4) и обозначив через $r = \frac{k}{ES}$, получим неоднородное дифференцированное уравнение относительно $\varphi(ct + x)$:

$$\varphi(ct + l) + r\varphi(ct + x) = -r\Phi(ct - l) + \Phi(ct - x).$$

Общее решение имеет вид:

$$\varphi(ct + x) = e^{-\int r d(ct-x)} \left\{ \int [-r\Phi(ct - x) + \Phi(ct - x)] e^{\int r d(ct-x)} d(ct - x) + C \right\}. \quad (5)$$

Если допустить, что для прямой волны скорости всех сечений одинаковы, включая границу $x = x_2$, то имеем:

$$\Phi(ct - x) = \text{const} = \left(\frac{V}{C} \right)^*$$

или

$$\frac{d\Phi(ct - x)}{d(ct - x)} = \frac{V}{C}. \quad (6)$$

Интегрирование этого выражения дает:

$$\Phi(ct - x) = \frac{V}{C}(ct - x) + \bar{C}.$$

Указанная здесь константа \bar{C} войдет в общую константу решения (5).

Подставляя выражение (6) в уравнение (5) и интегрируя по частям, находим решение уравнения:

$$\Phi(ct+x) = \frac{2V}{Cr} \left(1 - e^{-r(ct-l)}\right) - \frac{V}{C}(ct-x).$$

Полученное выражение подставим в выражение (2), где x_2 означает длину l стержня от $x_2 - x$, получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u(l,t)}{\partial t} &= 2Ve^{-r(ct-l)}, \\ \frac{\partial u(l,t)}{\partial x} &= \left(-\frac{2V}{C}\right) \left[1 - e^{-r(ct-l)}\right]; \left(t \geq \frac{2l}{C}\right). \end{aligned} \quad (7)$$

На основании одного из методов решения волнового уравнения, допускающего разделение переменных по координате и по времени, представляемого как произведение их функций:

$$u(x,t) = X(x) \cdot T(t),$$

можно записать выражение для потока энергии в виде:

$$\Pi(x,t) = ES \left(-\frac{4v^2}{c}\right) e^{-r(ct-l)} \left[1 - e^{-r(ct-l)}\right]. \quad (8)$$

Анализ последнего выражения показывает, что поток энергии на границе сопряжения стремится с течением времени к нулю. Вследствие чего границей совершается работа, величина которой принимает постоянное значение после некоторого отрезка времени. Таким образом, разница энергий в сопряженных стержнях стремится к постоянству. Система принимает стационарное энергетическое состояние во времени.

$$\frac{\partial(\mathcal{E}^I - \mathcal{E}^{II})}{\partial t} \rightarrow 0, \text{ откуда } \mathcal{E}^I - \mathcal{E}^{II} = \text{const} = \mathcal{E}_0.$$

В соответствии с законом сохранения энергии с другой стороны имеем количество энергии A :

$$A = \mathcal{E}^I + \mathcal{E}^{II}.$$

Из решения последних уравнений устанавливаем, что:

$$\mathcal{E}^I = \frac{1}{2}[A + \mathcal{E}_0] \text{ и } \mathcal{E}^{II} = \frac{1}{2}[A - \mathcal{E}_0].$$

Указанные последними равенствами представления решений $(\mathcal{E}^I - \mathcal{E}^{II})$, несмотря на их трактуемую общность, позволяет сделать заключение о том, что при взаимодействии двух ограниченных стержней в каждом из них устанавливается предельное энергетическое состояние, измеряющееся своим конечным числом:

$$(0 < \mathcal{E}^{I,II} < +\infty).$$

Кроме того, из анализа решения с учетом выражения (8) становится ясно, что равновесное состояние между рассматриваемыми стержнями означает отсутствие результирующего потока через сопряженные поверхности, в то же время внутренние энергии имеют произвольные значения и их сумма равна затрачиваемой работе, подведенной к стержневой системе.

Особый интерес вызывает исследование процесса распределения энергии в системе, где осуществляется постоянный поток энергии. Моделью такой системы может служить полубесконечный стержень или сопряженные между собой стержни, один из которых имеет ограниченные размеры, а другой – полубесконечный. Решение этой задачи поможет определить конечные размеры изолированной акустической системы, для которой приемлема изложенная теория.

Рассмотрим один полубесконечный стержень. Допустим, скорость изменения энергии этого стержня в виде потока описывается следующим экспоненциальным выражением.

$$\frac{d\mathcal{E}}{dt} \Pi(x, t) = A_0 \alpha \cdot e^{-\alpha t},$$

где A_0 – количество энергии в начальный момент; α – некоторый коэффициент, учитывающий геометрию и свойства материала стержня (податливость).

Интегрирование последнего уравнения от $t = 0$ до $t = t^*$ позволяет получить:

$$d\mathcal{E} = A_0 \alpha \cdot e^{-\alpha t} \cdot dt$$

или

$$\mathcal{E} = A_0 \int_0^{t^*} \alpha \cdot e^{-\alpha t} \cdot dt = -A_0 \int_0^{t^*} e^{-\alpha t} \cdot d(-\alpha t) = A_0 \int_0^{t^*} e^{-\alpha t} \cdot d(-\alpha t) = A_0 \cdot e^{-\alpha t} = A_0 \cdot e^{-\alpha t} - A_0 \cdot e^{-\alpha t^*} = A_0 (1 - e^{-\alpha t^*}).$$

Здесь константа интегрирования учтена выбором A_0 в качестве коэффициента при экспоненте. Полученное выражение описывает закон изменения энергии во времени. При $t^* \rightarrow \infty$ значение подведенной энергии будет совпадать с внутренней энергией стержня. Иначе говоря, какой бы ни была величина совершаемой над стержнем работы, с течением времени он «поглотит» ее всю без остатка.

Теперь следует выяснить, каково будет поведение в изменении этой энергии, если с полубесконечным стержнем будет сопряжен стержень для Δl , к которому подводится энергия A_0 . Во-первых, ясно, что установленное выше изменение энергии, вызванное ее обменом, будет здесь сдвинуто во времени

на величину $\Delta t = \frac{2\Delta l}{C}$, являющуюся мерой запаздывания или периодом по отношению к рассмотрению

отдельного полубесконечного стержня. Во-вторых, наличие запаздывания распределения энергии с необходимостью требует внести, наряду с операцией интегрирования, операцию суммирования, учитывающую меру задержки энергии, связанную с ее обменом при повторяющемся цикле. Эта мера задержки энергии, как нетрудно установить, будет зависеть от физических свойств материала стержня Δl и его геометрических параметров. Поэтому подводимая к стержневой системе энергия будет претерпевать изменения в процессе обмена на величину, соответствующую периоду колебаний ограниченного стержня.

Тогда при рассматриваемом законе изменения энергии в первом периоде колебаний будем иметь следующее выражение:

$$\Delta t^* = T : \Delta \mathcal{E}_1 = -A_0 \int_0^T e^{-\alpha t} d(\alpha t) = A_0 (1 - e^{-\alpha T}).$$

Для второго периода колебаний выражение запишется аналогичным образом:

$$2 \cdot \Delta t^* = 2T : \Delta \mathcal{E}_2 = -A_0 \int_T^{2T} e^{-\alpha t} d(-\alpha t) = A_0 (e^{-\alpha T} - e^{-2\alpha T}).$$

Для третьего периода:

$$3 \cdot \Delta t^* = 3T : \Delta \mathcal{E}_3 = -A_0 \int_{2T}^{3T} e^{-\alpha t} d(-\alpha t) = A_0 (e^{-2\alpha T} - e^{-3\alpha T}).$$

и так далее, для n -го периода:

$$n \cdot \Delta t^* = nT : \Delta \mathcal{E}_n = -A_0 \int_{(n-1)T}^{nT} e^{-\alpha t} d(-\alpha t) = A_0 (e^{-(n-1)\alpha T} - e^{-n\alpha T}).$$

Изменение энергии, проходящей через рассматриваемое сечение сопряжение стержней к n -му интервалу времени, определится их непосредственным сложением, т. е. для наблюдаемого времени t , $(n-1) \ll t \ll nT$, начиная с исходного момента времени $t = 0$, получаем выражение:

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_n = \Delta\mathcal{E} &= \sum_{i=1}^n \Delta\mathcal{E}_i = A_0 \left[(1 - e^{-\alpha t}) + (e^{-\alpha T} - e^{-2\alpha T}) + (e^{-2\alpha T} - e^{-3\alpha T}) + \dots + (e^{-(n-1)\alpha T} - e^{-n\alpha T}) \right] = \\ &= A_0 [1 - e^{-n\alpha T}] = A_0 - A_0 e^{-n\alpha T}.\end{aligned}$$

Поскольку все промежуточные слагаемые взаимно уничтожаются, то отсюда ясно, что изменение потока энергии для достаточно больших n (или времени $t = nT$) стремится в пределе к исходной энергии A_0 .

Заметим, полученный результат остается в силе независимо от длительности задержки и от поэтапного обмена энергией. Так, например, если определяющие характеристики стержня, описывающие его податливость, таковы, что во время задержки в обмене энергией составляют кратное число по отношению к предыдущему исследованию:

$$m\Delta t^* = mt = \bar{T},$$

где \bar{T} – период колебания ограниченного стержня в рассматриваемом случае;

m – любое (конкретное) целое число.

Выполнение аналогичных преобразований, как нетрудно установить, приведет нас к тому же самому результату, причем m может быть этому необязательно кратным.

Выводы

Таким образом мы показали, что в случае взаимодействия конечного стержня с полубесконечным при неразрывности их механической связи вся величина прикладываемой к конечному стержню энергии, независимо от его податливости, перейдет с течением времени в полубесконечный стержень. Этот результат имеет большое значение потому, что при рассмотрении стержневой системы, состоящей из конечного числа элементов с различной податливостью, именно соотношение податливости первого стержня к общей податливости системы будет определять протяженность системы, которую можно считать изолированной.

Особую роль при распределении энергии по элементам системы будет иметь местоположение (координаты) каждого из них. Например, элементы с большей податливостью возьмут на себя большую часть приложенной к системе энергии, поэтому, если таковые элементы находятся в первых рядах указанной гирлянды, то практически на другие элементы энергия не распространяется и, следовательно, естественная граница между такими элементами (податливым и жестким) будет границей двух отдельных изолированных систем.

Список литературы

- 1 **Krutova, V.** Vibrations of the closed frame structures in a steady-state condition / Veronika Krutova, Besarion Meskhi // Journal Akustika. – 2021. – Vol. 41, No. 41. – P. 4–7. – DOI 10.36336/akustika/2021414.
- 2 **Krutova, V.** Theoretical study of the closed bar system loss factor condition / Veronika Krutova, Besarion Meskhi // Journal Akustika. – 2021. – Vol. 41, No. 41. – P. 8–12. – DOI <https://doi.org/10.36336/akustika/2021418>.
- 3 **Пронников, Ю. В.** О расчете составляющей шума в кабинах машинистов подвижного состава, создаваемой вибрацией элементов остекления / Ю. В. Пронников // Транспорт. Безопасность. Логистика : сборник трудов международной научно-практической конференции. – Ростов на-Дону, 2010. – С. 8–14.
- 4 **Пронников, Ю. В.** Совершенствование методов виброакустического расчета и проектирова-

Reference

- 1 **Krutova, V.** Vibrations of the closed frame structures in a steady-state condition / Veronika Krutova, Besarion Meskhi // Journal Akustika. – 2021. – Vol. 41, No. 41. – P. 4–7. – DOI 10.36336/akustika/2021414.
- 2 **Krutova, V.** Theoretical study of the closed bar system loss factor condition / Veronika Krutova, Besarion Meskhi // Journal Akustika. – 2021. – Vol. 41, No. 41. – P. 8–12. – DOI <https://doi.org/10.36336/akustika/2021418>.
- 3 **Pronnikov, Yu. V.** On the calculation of the noise component in the cabins of drivers of rolling stock created by the vibration of the glazing elements / Yu. V. Pronnikov // Transport. Safety. Logistics : Collection of scientific International Scientific and Practical Conference – Rostov-on-Don, 2010. – P. 8–14.
- 4 **Pronnikov, Yu. V.** Improvement of methods of vibroacoustic calculation and cabin design : abstract of

ния кабин : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.02.02, 05.26.01 / Пронников Юрий Викторович. – Ростов на-Дону, 2012. – 18 с.

5 **Спиридонов, В. М.** Применение энергетического метода для расчета уровне звуковой вибрации / В. М. Спиридонов // В сборник : Борьба с шумом на судах. – Ленинград, 1965. – 108 с.

6 **Пронников, Ю. В.** Моделирование структурной составляющей шума в кабинах машинистов подвижного состава / Ю. В. Пронников // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2010. – № 3. – С. 64–68. – ISSN 0201-727X.

7 **Груничев, Н. С.** Пути снижения шума в кабинах локомотивов на железнодорожном транспорте / Н. С. Груничев, С. А. Аксенов, Т. А. Хоренко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 7. – С. 178–182. – ISSN 0236-1493.

8 **Колесников, И. В.** Звукоизолирующие и звукопоглощающие характеристики кабин локомотивов / И. В. Колесников, Ю. В. Пронников // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2011. – № 2. – С. 13–16. – ISSN 0201-727X.

9 **Подуст, С. Ф.** Увеличение звукоизоляции элементов остекления электровозов / С. Ф. Подуст // Известия Института управления и инноваций авиационной промышленности. – 2011. – № 3–4 (25–26). – С. 137–142 – ISSN 1814-2109.

10 **Ржевкин, С. Н.** Курс лекций по теории звука / С. Н. Ржевкин. – Москва : Издательство МГУ, 1960. – 335 с.

11 **Бондаренко, В. А.** Уточнение расчета спектров структурной составляющей шума в кабинах с большой площадью остекления / В. А. Бондаренко, Т. А. Финоченко // Вестник Донского государственного технического университета. – 2017. – Т. 17, № 3 (90). – С. 96–102. – DOI 10.23947/1992-5980-2017-17-3-96-102.

the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences : 05.02.02, 05.26.01/ Pronnikov Yuri Victorovich. – Rostov-on-Don, 2012. – 18 p.

5 **Spiridonov, V. M.** Application of the energy method for calculating the level of sound vibration / V. M. Spiridonov // In the proceeding : Combating noise on ships. – Leningrad, 1965. – 108 p.

6 **Pronnikov, Yu. V.** Modeling of the structural component of noise in the cabins of drivers of rolling stock / Yu. V. Pronnikov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2010. – No. 3. – P. 64–68. – ISSN 0201-727X.

7 **Grunichev N. S.** Ways to reduce noise in the cabins of locomotives on railway transport / N. S. Grunichev, S. A. Aksenov, T. A. Khorenko // Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal). – 2014. – No. 7. – P. 178–182. – ISSN 0236-1493.

8 **Kolesnikov, I. V.** Sound-insulating and sound-absorbing characteristics of locomotive cabins / I. V. Kolesnikov, Yu. V. Pronnikov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2011. – No. 2. – P. 13–16. – ISSN 0201-727X.

9 **Podust, S. F.** Increase of sound insulation of glazing elements of electric locomotives / S. F. Podust // Proceedings of the Institute of Management and Innovation of the Aviation Industry. – 2011. – No. 3–4 (25–26). – С. 137–142 – ISSN 1814-2109.

10 **Rzhevkin, S. N.** Course of lectures on the theory of sound / S. N. Rzhevkin. – Moscow : Publishing house of MSU, 1960. – 335 p.

11 **Bondarenko, V. A.** Refinement of the calculation of the spectra of the structural component of noise in cabins with a large glazing area / V. A. Bondarenko, T. A. Finochenko // Vestnik of Don State Technical University. – 2017. – Vol. 17, No. 3 (90). – P. 96–102. – DOI 10.23947/1992-5980-2017-17-3-96-102.

V. A. Krutova, A. N. Chukarin, A. A. Porchesko

SIMULATION OF THE OCCURRENCE OF VIBRATIONS IN THE FRAMES OF OVERHEAD CRANES

Abstract. The bearing frames of overhead cranes are made of channels of different sizes. Linear radiators are used as a noise source model, since the length of the source significantly exceeds the maximum size of the cross-section. The calculation of oscillation rates for an energetically closed system consisting of rod elements is based on the energy balance equations. Reducing the intensity of sound radiation can be performed either by reducing the vibration power introduced into the frame from vibration sources such as gearboxes of lifting and moving mechanisms, wheelset assemblies and the drum of the lifting mechanism, or by increasing

the dissipative properties of the frame elements. This paper presents the calculation of the oscillation rates of the supporting frame and shows the effect of the vibration absorption system on reducing noise levels.

Keywords: noise, vibration, load-bearing frames, overhead cranes.

For citation: Krutova, V. A. Simulation of the occurrence of vibrations in the frames of overhead cranes / V. A. Krutova, A. N. Chukarin, A. A. Porchesko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 1. – P. 212–219. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_212.

Сведения об авторах

Крутова Вероника Александровна

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Основы проектирования машин»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: nikarostov@bk.ru

Чукарин Александр Николаевич

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Основы проектирования машин»,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой,
e-mail: opm@rgups.ru

Порческо Александра Александровна

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Основы проектирования машин»,
аспирант,
e-mail: aporchesco@gmail.com

Information about the authors

Krutova Veronika Aleksandrovna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Fundamentals of Machine Design»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: nikarotov@bk.ru

Chukarin Aleksander Nikolayevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Fundamentals of Machine Design»,
Doctor of Engineering Sciences,
Professor,
Head of the Chair,
e-mail: opm@rgups.ru

Porchesko Aleksandra Aleksandrovna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Fundamentals of Machine Design»,
Postgraduate,
e-mail: aporchesco@gmail.com

кондиционер, и внешних, акустическое излучение которых создается четырьмя источниками, они рассмотрены в работе [1]. Уровни шума, создаваемые в кабине, определяются энергетическим суммированием по формуле

$$L_{\Sigma\text{каб}} = 10\lg(10^{0,1L_g} + 10^{0,1L_{\text{ВЫХ}}} + 10^{0,1L_c} + 10^{0,1L_M} + 10^{0,1L_{\text{ВН}}}), \quad (1)$$

где L_g – уровни шума, излучаемого корпусом дизеля, дБ; $L_{\text{ВЫХ}}$ – уровни шума, создаваемые выхлопом, дБ; L_c – уровни шума, излучаемые сваей, дБ; L_M – уровни шума, излучаемые молотом, дБ; $L_{\text{ВН}}$ – уровни шума, создаваемые внутри кабины внутренними источниками шума, дБ.

Аналитические зависимости акустических характеристик в кабине от воздействия внешних источников на основании данных, приведенных в работах [1, 2], имеют следующий вид:

$$L_g = 0,5L_p + 10\lg S_g v_{iqb} - K_{gb} l_g R_{gb} + 10\lg \frac{\sum_1^5 S_{\text{каб}i} \cdot 10^{-0,1(3I_i + t_{g_i})}}{S_{\text{каб}} \alpha} + 56 \text{ дБ}, \quad (2)$$

где L_p – октавные уровни звукового давления корпуса, принимаемые по паспортным или экспериментальным данным, дБ; S_g – площадь поверхности двигателя, дБ; v_i – октавные уровни виброскорости корпуса, дБ, задаваемые по экспериментальным данным; K_{gb} – эмпирический коэффициент, учитывающий расстояние (R_{gb}) от корпуса двигателя до рабочего места крановщика. При $R_{gb} \leq 2$ м $K_{gb} = 10$, при $R_{gb} > 2$ м $K_{gb} = 20$; $S_{\text{каб}i}$ – площадь i -го элемента ограждения кабины, м²; $3I_i$ – звукоизоляция i -го элемента кабины, дБ; t_{g_i} – добавка к звукоизоляции i -го элемента кабины, учитывающая его расположение по направлению к источнику шума, дБ. Эти данные принимаются по результатам исследований Г.М. Курцева (табл. 1) [1]; $S_{\text{каб}}$ – площадь внутренней поверхности кабины, м²; α – средний коэффициент звукопоглощения кабины.

Таблица 1

Дифракционные поправки к звукоизоляции элементов кабин ПМ и СДМ*

Расположение кабины к источнику, м	Элементы ограждения кабин	Усредненные значения поправок, дБ, в октавных полосах частот, Гц						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
Вблизи источника ($0,1 \leq R_{\text{каб}} \leq 2,0$)	Боковые стены	7	7	7	7	7	9	9
	Потолок	8	8	8	8	8	10	10
	Задняя стена	12	12	12	12	12	18	18
$R_{\text{каб}} > 2,0$	Боковые стены	9	9	9	9	9	13	17
	Потолок	9	9	12	12	12	15	18
	Задняя стена	14	14	14	14	14	17	20

* данные получены Г.М. Курцевым.

Уровни шума, создаваемые в кабине от воздействия шума выхлопа:

$$L_{\text{ВЫХ}} = L_{W_{\text{ВЫХ}}} - 20\lg R_{\text{ВЫХ}} + 10\lg \frac{\sum_1^5 S_{\text{каб}i} 10^{-0,1(3I_i + t_{g_i})}}{S_{\text{каб}} \alpha} + \text{ПН} - \beta_{\text{ВЫХ}} + 7 \text{ дБ}, \quad (3)$$

где $L_{W_{\text{ВЫХ}}}$ – октавные уровни звуковой мощности выхлопа, задаются по паспортным или экспериментальным данным, дБ; ПН – показатель направленности выпуска, ПН = 0 при расположении выхлопной трубы по направлению в сторону рабочего места или вниз, ПН = -4 дБ при расположении выхлопной трубы в направлении, противоположном рабочему месту; $R_{\text{ВЫХ}}$ – расстояние от среза выхлопной трубы до рабочего места, м; $\beta_{\text{ВЫХ}}$ – коэффициент, учитывающий расположение выхлопной трубы, $\beta = 0$ при направлении выхлопной трубы вверх, $\beta = 5$ дБ при направлении выхлопной трубы вбок, $\beta = 8$ дБ при выводе выхлопной трубы за капот.

Уровни шума в кабине, создаваемые системой «свая – молот», определяются по формуле

$$L_{c-M} = 10 \lg(10^{0,1L_c} + 10\lg^{0,1L_H}) - K_l \lg R + 10 \lg \frac{\sum_1^5 S_{\text{каб}} \cdot 10^{-0,1(3I_i + t_{g_i})}}{S_{\text{каб}} \alpha} - 17 \text{ дБ}, \quad (4)$$

где K и R – коэффициент и расстояние от источника рабочего места.

Вышеприведенные зависимости получены при допущении, что акустическое воздействие внешних источников формирует звуковое поле внутри кабины за счет прохождения звуковой энергии через потолок, боковые стенки, переднюю и заднюю, т.е. за исключением пола. При расчете звукоизоляции элементов кабины следует учитывать, что боковые стенки, передняя и задняя панель имеют окна и двери, звукоизоляция которых отличается от звукоизоляции основных конструкций панелей. С учетом данных, приведенных в работе [2], звукоизоляция определяется по формуле

$$ЗИ = ЗИ_0 - 10 \lg \frac{[S_0 + \sum_1^n S_i \cdot 10^{0,1(ЗИ_0 - ЗИ_i)}]}{S_n + \sum_1^n S_i}, \quad (5)$$

где $ЗИ_0$ – звукоизоляция основной конструкции, дБ; $ЗИ_i$ – звукоизоляция i -го элемента (в данном случае остекления), дБ; S_0 – площадь основной конструкции, м²; S_i – площадь элементов с отличающей от основной конструкции звукоизоляцией, м²; n – количество элементов с отличающейся от основной конструкции звукоизоляцией.

Звукоизоляция соответствующих элементов в данном случае определяется по закону массы для плоских пластин [3–6] и приведена к виду

$$ЗИ = 10 \lg \left[1 + 5,7 \cdot 10^{-5} \left(\frac{f_i M_i}{S_i} \right)^2 \right], \quad (6)$$

где f_i – октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц (31,5; 63; 125; 250; 500; 1000; 2000; 4000; 8000); M_i – масса i -го элемента, кг; S_i – площадь i -го элемента, м².

Для октавных полос зависимость (5) примет следующий вид:

$$\begin{aligned} ЗИ_{31,5} &= 10 \lg \left[1 + 5,7 \cdot 10^{-2} \left(\frac{M_i}{S_i} \right)^2 \right] \text{ дБ;} \\ ЗИ_{63} &= 10 \lg \left[1 + 2,3 \cdot 10^{-1} \left(\frac{M_i}{S_i} \right)^2 \right] \text{ дБ;} \\ ЗИ_{125} &= 10 \lg \left[1 + 0,9 \left(\frac{M_i}{S_i} \right)^2 \right] \text{ дБ;} \\ ЗИ_{250} &= 20 \lg \frac{M_i}{S_i} + 11 \text{ дБ;} \\ ЗИ_{500} &= 20 \lg \frac{M_i}{S_i} + 23 \text{ дБ;} \\ ЗИ_{1000} &= 20 \lg \frac{M_i}{S_i} + 35 \text{ дБ;} \\ ЗИ_{2000} &= 20 \lg \frac{M_i}{S_i} + 47 \text{ дБ;} \\ ЗИ_{4000} &= 20 \lg \frac{M_i}{S_i} + 59 \text{ дБ;} \\ ЗИ_{8000} &= 20 \lg \frac{M_i}{S_i} + 71 \text{ дБ.} \end{aligned}$$

Для рассматриваемых в работе объектов добиться снижения шума в самом источнике практически невозможно. Снижение уровней шума в кабинах до санитарных норм может быть реализовано за счет увеличения звукопоглощающих и звукоизолирующих свойств элементов кабины.

Отличие акустического воздействия внутренних источников заключается в том, что звуковая энергия излучается в замкнутый внутренний объем кабины [7, 8], это соответствует схеме для расчета, приведенной на рис. 2.

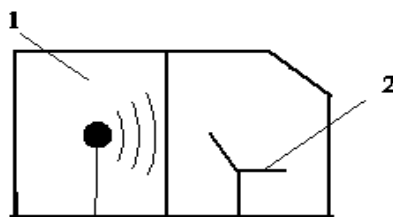


Рис. 2. Расчетная схема формирования звукового поля в кабине при воздействии внутренних источников:

1 – источник шума; 2 – рабочее место

В этом случае на основе данных работы [2] выражение для определения уровней шума в кабине приведено к следующему виду:

$$L = L_p + 20 \lg r + 10 \lg \left(\frac{\chi_M \varphi_M \cdot 8 \cdot 10^{-2}}{r^2} + \frac{4 \psi_k}{B_k} \right) + 8 \text{ дБ}, \quad (7)$$

где L_p – уровни звукового давления источника, дБ; r – расстояние от источника шума до рабочего места, м; φ_M – показатель направленности звукового излучения источника; χ_M – коэффициент искажения звукового поля источника шума; ψ_k – коэффициент диффузного звукового поля внутри кабины; B_k – постоянная кабины, м², которая определяется соотношением [1, 2]

$$B_k = \frac{S_{\text{каб}} \alpha}{1 - \alpha_{\text{каб}}}.$$

Поскольку звук излучается в замкнутый объем, то $\varphi_M = 1$. Коэффициент χ для соотношения длины источника и расстояния до рабочего места равен $\chi = 1$. Коэффициент χ_M задается по данным, приведенным в работе [2] (табл. 2).

Таблица 2

Поправки на ближнее поле

Третьеоктавные полосы частот, Гц	50 и ниже	63	80	100	125 и выше
χ_M	100	14	4	2	1
$10 \lg \chi_M$	20	15	6	3	0

Коэффициент диффузности ψ по данным работы [2]

$$\psi = 1 - 0,3 \frac{\alpha}{1 - \alpha} = \frac{1 - 1,3\alpha}{1 - \alpha},$$

тогда выражение (7) примет вид

$$L = L_p + 10 \lg \left(2 \cdot 10^{-2} \chi_M + \frac{1 - 1,3\alpha}{\alpha S_k} r^2 \right) + 14.$$

Поскольку целью исследований процесса шумообразования является соблюдение допустимых нормативов шума, то в приведенных выше уравнениях (1)–(4), (7) в первую часть необходимо подставить выражение $L_c - (7 \div 8)$ дБ, где L_c – предельно допустимые октавные уровни звукового давления.

Заключение

Уменьшение санитарных норм на 7–8 дБ объясняется одновременным воздействием звукового излучения нескольких источников вследствие логарифмического суммирования уровней источников [9]. Действительно, даже при условии выполнения санитарных норм каждым источником логарифмическое суммирование их уравнений приведет к превышению предельно допустимых значений.

Список литературы

- 1 **Иванов, Н. И.** Борьба с шумом и вибрациями на путевых и строительных машинах / Н. И. Иванов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 1987. – 223 с.
- 2 **Борисов, Л. П.** Звукоизоляция в машиностроении / Л. П. Борисов, Д. Р. Гужас. – Москва : Машиностроение, 1990. – 256 с. – ISBN 5-217-00885-7.
- 3 **Чукарин, А. Н.** Теория и методы акустических расчетов и проектирования технологических машин для механической обработки / А. Н. Чукарин. – Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2004. – 152 с. – ISBN 5-7890-0326-5.
- 4 **Заборов, В. И.** Теория звукоизоляции ограждающих конструкций / В. И. Заборов. – Москва : Стройиздат, 1969. – 185 с.
- 5 Безопасность жизнедеятельности : учебное пособие / И. Г. Переверзев, Т. А. Финоченко, И. А. Яицков [и др.] ; ФГБОУ ВО РГУПС. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ростов-на-Дону, 2019. – 308 с. – ISBN 978-5-88814-843-3.
- 6 Расчеты на прочность в машиностроении. В 3 т. Т. 1 : Теоретические основы и экспериментальные методы / под редакцией С. Д. Пономарева. – Москва : Mashgiz, 1956. – 884 с.
- 7 **Баланова, М. В.** Методика и техническое обеспечение проведения экспериментальных исследований по определению шума на рабочих местах / М. В. Баланова, Т. А. Финоченко, И. А. Яицков // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 1 (46). – С. 5–8. – ISSN 1818-5509.
- 8 **Кравченко, М. А.** Теоретическое исследование процессов шумообразования компрессорных установок / М. А. Кравченко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 4. – С. 19–25. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_4_19.
- 9 **Финоченко, Т. А.** Влияние количественной оценки условий труда на величину производственного риска / Т. А. Финоченко, И. Г. Переверзев, В. А. Финоченко // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 4 (47). – С. 139. – EDN YUQKXO.

References

- 1 **Ivanov, N. I.** Combating noise and vibrations on track and construction machines / N. I. Ivanov. – 2nd ed., revised and additional – Moscow : Transport, 1987. – 223 p.
- 2 **Borisov, L. P.** Soundproofing in mechanical engineering / L. P. Borisov, D. R. Guzhas. – Moscow : Mashinostroenie, 1990. – 256 p. – ISBN 5-217-00885-7.
- 3 **Chukarin, A. N.** Theory and method of acoustic calculations and design of technological machines for mechanical processing / A. N. Chukarin. – Rostov-on-Don : Publishing Center DSTU, 2004. – 152 p. – ISBN 5-7890-0326-5.
- 4 **Zaborov, V. I.** Theory of sound insulation of enclosing structures / V. I. Zaborov. – Moscow : Stroyizdat, 1969. – 185 p.
- 5 Life safety: textbook / I. G. Pereverzev, T. A. Finochenko, I. A. Yaitskov [et al.] ; FSBEI HE RSTU – 2nd ed., rev. and add. – Rostov-on-Don, 2019. – 308 p. – ISBN 978-5-88814-843-3.
- 6 Strength calculations in mechanical engineering. In 3 vols. Vol. 1 : Theoretical foundations and experimental methods / edited by S. D. Ponomarev. – Moscow : Mashgiz, 1956. – 884 p.
- 7 **Balanova, M. V.** Methodology and technical support for experimental studies of determining noise at workplaces / M. V. Balanova, T. A. Finochenko, I. A. Yaitskov // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2019. – No. 1 (46). – P. 5–8. – ISSN 1818-5509.
- 8 **Kravchenko, M. A.** Theoretical study of the processes of excitation of vibrations and noise generation of compressor installations / M. A. Kravchenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2022. – No. 4. – P. 19–25. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_4_19.
- 9 **Finochenko, T. A.** The influence of quantitative assessment of working conditions on the value of production risk / T. A. Finochenko, I. G. Pereverzev, V. A. Finochenko // Engineering Bulletin of the Don. – 2017. – No. 4 (47). – P. 139. – EDN YUQKXO.

A. S. Kudasova

THEORETICAL STUDIES OF THE INFLUENCE OF THE AIR COMPONENT NOISE ON ACOUSTIC CHARACTERISTICS IN PILE HOPPER CABINS

Abstract. This paper discusses an approach to determining the sound pressure levels of noise sources that are generated by the air component in the cabins of pile drivers. The purpose of research into the noise generation process is to meet sanitary noise standards. The air component of noise influences the formation of the sound field in the driver's cab and includes

sound radiation from internal and external noise sources. The noise levels generated in the cabin are determined by energy summation. Consequently, each source complies with sanitary standards that will lead to exceeding the maximum permissible values.

Keywords: noise sources, acoustic models, sanitary standards, airborne noise component, pile driver cabins, energy summation.

For citation: Kudasova, A. S. Theoretical studies of the influence of the air component of noise on the acoustic characteristics in pile hopper cabins / A. S. Kudasova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 1. – P. 220–225. – DOI 10.46973/0201–727X_2024_1_220.

Сведения об авторах

Кудасова Анна Сергеевна

Донской государственный технический университет (ДГТУ),
кафедра «Железобетонные и каменные конструкции»,
старший преподаватель,
e-mail: as.kudasova@yandex.ru

Information about the authors

Kudasova Anna Sergeevna

Don State Technical University (DSTU),
Chair «Reinforced Concrete and Stone Structures»,
Senior Lecturer,
e-mail: as.kudasova@yandex.ru

И. А. Майба, И. И. Майба

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЯГОВО-СЦЕПНЫХ СВОЙСТВ ЛОКОМОТИВОВ, ОБОРУДОВАННЫХ УСТРОЙСТВОМ АКТИВАЦИИ ТРЕНИЯ

Аннотация. Представлены результаты сравнительных тягово-энергетических эксплуатационных испытаний и подконтрольной эксплуатации на полигоне Восточно-Сибирской Дирекции тяги локомотива серии ЗЭС5К № 1147 производства ООО «ПК «НЭВЗ» 2021 года выпуска в комплектации с поосным регулированием силы тяги и моторно-осевыми подшипниками качения, оборудованного устройством активации трения локомотивов (далее – УАТЛ), а также локомотива серии ЗЭС5К № 1271 с поосным регулированием, не оборудованного УАТЛ (оборудован штатной пескоподачей).

Проведены анализ и обобщение полученных экспериментальных данных, сравнение тягово-сцепных свойств опытного электровоза № 1147, оборудованного УАТЛ, и контрольного электровоза, не оборудованного УАТЛ.

Сделаны выводы об эффективности применения УАТЛ в условиях грузового движения при эксплуатационной работе на полигоне в голове состава грузовых поездов массой 7100 т на участке Мариинск (Междуреченск) – Находка (чётное направление).

Ключевые слова: подконтрольная эксплуатация, испытания, устройство активации трения, тягово-энергетические испытания, показатели тягово-сцепных свойств локомотивов, сравнительные результаты применения устройств активации трения.

Для цитирования: Майба, И. А. Исследование тягово-сцепных свойств локомотивов, оборудованных устройством активации трения / И. А. Майба, И. И. Майба // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1. – С. 226–232. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_226.

Введение

Одним из вопросов, ограничивающих возможности увеличения провозных и пропускных способностей железных дорог в условиях растущего объёма перевозок при организации работы локомотивного парка по полигонной технологии, являются внеплановые отцепки локомотивов от поездов (сход с кольца) между техническим обслуживанием в объёме ТО-2 для захода на пункты технического обслуживания (ПТОЛ) на экипировку песком.

Один из сценариев исключения схода локомотивов с кольца на экипировку песком базируется на развитии инфраструктурных объектов и предусматривает строительство дополнительных экипировочных пунктов или реконструкцию существующих пунктов экипировки песком. Альтернативным сценарием является модернизация локомотивов специальным оборудованием, которое обеспечивает работу без применения песка или с сокращением расхода песка от 80 % и более.

Анализ мирового опыта показывает, что одним из способов увеличения пробега между экипировками песком и устранения внеплановых заходов на экипировку является применение современных средств активации трения (сцепления) колёс локомотивов [1–10]. Применение систем активации трения (сцепления) позволяет улучшить тягово-сцепные возможности локомотивов, повысить производительность локомотивов и снизить негативное влияние песка на верхнее строение пути, характеристики балластной призмы, работу рельсовых цепей СЦБ.

Среди отечественных разработок наиболее предпочтительным является инновационный проект компании ООО «ТрансИнТех», специалисты которой совместно с учёными РГУПС и специалистами ООО «НЭВЗ» разработали устройство активации трения локомотивов (далее – УАТЛ). В условиях завода ООО «ПК «НЭВЗ» установка оборудования УАТЛ на электровоз № 1147 ЗЭС5К производства ООО «ПК «НЭВЗ» 2021 года выпуска с поосным регулированием силы тяги производилась в соответствии с проектом «ТМХ Инжиниринг» «Оборудование электровозов устройствами активации трения локомотивов УАТЛ».

Материалы и методы исследований

С целью оценки возможности применения опытных электровозов, оборудованных УАТЛ, в режиме штатной работы в головном движении при эксплуатационной работе на полигоне была организована подконтрольная эксплуатация локомотивов серии ЗЭС5К, оборудованных и не оборудованных системой УАТЛ на участке Мариинск (Междуреченск) – Находка в рамках сравнительных эксплуатаци-

онных испытаний устройств снижения расхода песка локомотивами в соответствии с требованиями Программы и методики ПКБ ЦТ. Эксплуатация опытного электровоза № 1147, оборудованного устройствами УАТЛ, в период с 28 октября 2022 года по апрель 2023 года производилась на участке Мариинск – Карымская.

В первую очередь были проведены испытания локомотивов серии ЗЭС5К с поосным регулированием тяги, оборудованных и не оборудованных УАТЛ в голове состава грузовых поездов массой свыше 7000 т при их движении в чётном направлении.

Объекты испытаний: электровозы серии ЗЭС5К – № 1147 (оборудован УАТЛ), № 1271 (не оборудован УАТЛ, оборудован песочными форсунками инжекторного типа).

Цель испытаний: сравнительные тягово-энергетические испытания локомотива серии ЗЭС5К с поосным регулированием тяги, оборудованного УАТЛ, и локомотива серии ЗЭС5К с поосным регулированием, не оборудованного УАТЛ.

Для проведения испытаний были задействованы две тягово-энергетические лаборатории и локомотивы прикрытия. Испытания проводились с перекрытыми кранами песка на опытном локомотиве с УАТЛ. За опытным электровозом ЗЭС5К № 1147 следовал контрольный поезд с локомотивом ЗЭС5К № 1271, у которого предупреждение боксования производилось с помощью штатной системы пескоподачи.

Основные технические характеристики объекта испытаний представлены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование характеристики	Единица измерения	Значение характеристики
Количество секций локомотива	–	3
Количество осей локомотива	–	12
Длина локомотива	м	52,5
Осевая формула	–	3(2o-2o)
Расчётная масса локомотива	т	300
Сцепная масса локомотива	т	300
Конструкционная скорость локомотива	км/ч	110

Климатические условия при проведении испытаний представлены в табл. 2.

Таблица 2

Дата	Температура, °С		Влажность, %		Давление		Осадки
	окружающего воздуха	внутри лаборатории	атмосферная	внутри лаборатории	мм рт. ст.	МПа	
27.10.22	+1 ÷ +11	+24 ÷ +26	42 ÷ 83	22 ÷ 25	726,7 ÷ 747,7	0,0969 ÷ 0,997	Нет
28.10.22	+2 ÷ +10,9	+25 ÷ +26	54 ÷ 93	23 ÷ 24	714,1 ÷ 748,4	0,0952 ÷ 0,998	Дождь
29.10.22	+2,9 ÷ +8,4	+24 ÷ +25	59 ÷ 83	21 ÷ 22	720,1 ÷ 744,1	0,0960 ÷ 0,992	Снег
30.10.22	+1,8 ÷ +4,6	+24 ÷ +25	65 ÷ 94	27 ÷ 25	716,3 ÷ 726,5	0,0955 ÷ 0,0986	Снег
30–31.10.22	–5,1 ÷ +2,5	+23 ÷ +25	56 ÷ 88	21 ÷ 24	670,5 ÷ 709,8	0,0894 ÷ 0,0938	Нет

Характеристика экспериментальных поездов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Дата	Участок	№ поезда	Масса поезда брутто, т	Количество осей	Количество физических вагонов	Количество условных вагонов	Вид груза
1	2	3	4	5	6	7	8
27.10.2022	Красноярск-Вост.	1824	7107* (6915+192)	300* (292+8)	75* (73+2)	76* (74+2)	Уголь
28.10.2022	Мариинск – Красноярск-Вост.	9654	7044* (6852+192)	288* (280+8)	72* (70+2)	73* (71+2)	Уголь
29.10.2022	Нижеудинск – Зима	1824	7107* (6915+192)	300* (292+8)	75* (73+2)	76* (74+2)	Уголь

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8
29.10.2022	Нижнеудинск – Зима	9654	7044* (6852+192)	288* (280+8)	72* (70+2)	73* (71+2)	Уголь
29– 30.10.2022	Слюдянка-1 – Улан-Удэ	1824	7107* (6915+192)	300* (292+8)	75* (73+2)	76* (74+2)	Уголь
30.10.2022	Улан-Удэ – Хилок	1824	7107* (6915+192)	300* (292+8)	75* (73+2)	76* (74+2)	Уголь
30.10.2022	Слюдянка-1 – Улан-Удэ	9660	7044* (6852+192)	288* (280+8)	72* (70+2)	73* (71+2)	Уголь

* с учётом электровоза прикрытия ВЛ80р № 1834 (192 т, 8 осей).

Нормы массы грузовых поездов принимались в соответствии с приказом от 17 декабря 2021 года № ЦТ-200 на участке Мариинск – Юрты для локомотива серии ЗЭС5К с поосным регулированием тяги – 7100 т при условии соблюдения межпоездного интервала не менее 15 мин.

Схема формирования экспериментального поезда на участке, не требующем дополнительной тяги, представлена на рис. 1.

Поезд с локомотивом, оборудованным УАТЛ



Поезд с локомотивом, не оборудованным УАТЛ



Рис. 1

Схема формирования экспериментального поезда на участке, на участке Горхон – Кижя с локомотивом-толкачом серии ЗЭС5К в хвосте поезда представлена на рис. 2.

Поезд с локомотивом, оборудованным УАТЛ



Поезд с локомотивом, не оборудованным УАТЛ



Рис. 2

Участки следования поездов и характеристики руководящих (лимитирующих) подъёмов перегонов представлены в табл. 4.

Таблица 4

Участок	Лимитирующий подъем перегона	Величина подъема, %	Радиус кривых, м	% длины кривых
1 Мариинск – Красноярск-Вост.	Ачинск-1 – Тарутино	9,4	439	58
	Кемчуг – Зеледеево – Кача	10,1	354	72
2 Красноярск-Вост. – Иланская	Таежный – Камарчага	10,1	313	64
	Камала – Солянка	9,9	401	49
3 Иланская – Нижнеудинск	Иланская – Стайный	10,2	415	39
	Решоты – Ключи – Юрты	11	405	77
	Камышет – Ук	10,1	300	84
4 Нижнеудинск – Зима	Хингуй – Худоеланская	10,3	501	65
	Тулюшка – Куйтун	9,9	534	25
	Кимильтей – Перевоз	10,1	517	45
5 Зима – Слюдянка-1	Зима – Делюр	10	510	45
	Забитуй – Черемхово	10,1	600	16
	Залари – Хотхор	10,1	398	45
	Большой Луг – Подкаменная	17,4	293	93
6 Слюдянка-1 – Улан-Удэ – Хилок	Подкаменная – Глубокая	18	300	70
	Горхон – Кижя	18,6	487	40
	Хилок – Чита-1 – Карымская	9,1	–	–

Результаты исследований

В период 28–30 октября 2022 года были проведены семь контрольных поездок опытного и контрольного электровозов ЗЭС5К с локомотивами прикрытия ВЛ-80 с поездами весом 7 100 т с перекрытыми кранами пескоподачи у опытного электровоза 31147. За опытным электровозом ЗЭС5К № 1147 следовал контрольный поезд с локомотивом ЗЭС5К № 1271, у которого предупреждение боксования производилось штатной системой пескоподачи. Поездки проводились при переходных значениях температур окружающей среды в пределах $-5...+11$ °С. По ходу испытаний были зафиксированы как благоприятные, так и неблагоприятные погодные условия (дождь, снег).

Сравнительная оценка тягово-цепных свойств локомотива серии ЗЭС5К № 1147, оборудованного УАТЛ, и локомотива серии ЗЭС5К № 1271, не оборудованного УАТЛ, проводилась в ходе анализа параметров, зарегистрированных тягово-энергетическими лабораториями. Регистрация параметров проводилась при движении локомотивов по участкам с лимитирующими подъемами на перегонах.

Анализ расшифровок МСУД поездок показал, что присутствуют нештатные срабатывания системы УАТЛ, необходимы наладка программного обеспечения МСУД и доработка алгоритма работы УАТЛ, адаптированного к условиям работы на полигоне.

Сравнение параметров, характеризующих тягово-цепные свойства локомотивов при следовании по участкам, приведено в табл. 5 и на рис. 3.

Таблица 5

Наименование показателя	Сила тяги на автосцепке F , кН		Реализованный ПКС, ψ_{kr}		
	Участок. Лимитирующий подъем перегона	Факт электровоза с УАТЛ	Факт электровоза без УАТЛ	Факт электровоза с УАТЛ	Факт электровоза без УАТЛ
1	2	3	4	5	
1 Мариинск – Красноярск-Вост.					
Ачинск-1 – Тарутино	860	795	2,89	2,48	
Кемчуг – Зеледеево – Кача	859	808	2,81	2,5	
2 Красноярск-Вост. – Иланская					
Таежный – Камарчага	822	829	2,72	2,82	
Камала – Солянка	752	825	2,47	2,58	
3 Иланская – Нижнеудинск					
Иланская – Стайный	823	800	2,8	2,47	
Решоты – Ключи – Юрты	827	803	2,74	2,68	
Камышет – Ук	784	746	2,8	2,53	
4 Нижнеудинск – Зима					
Хингуй – Худоеланская	824,7	715	2,7	2,3	
Тулюшка – Куйтун	717,8	657	2,49	2,23	
Кимильтей – Перевоз	776,7	733	2,66	2,35	

Окончание табл. 5

1	2	3	4	5
5 Зима – Слюдянка-1				
Зима – Делюр	768	700	2,61	2,38
Забитуй – Черемхово	887	817	2,78	2,77
Залари – Хотхор	833	742	2,8	2,47
Большой Луг – Подкаменная	748	747	2,79	2,44
Подкаменная – Глубокая	760	674	2,53	2,29
6 Слюдянка-1 – Улан-Удэ – Хилок				
Горхон – Кижя	812	720	2,64	2,35
7 Хилок – Чита-1 – Карымская				
Сохондо – Тургутуй	832	798	2,57	2,5
Средние значения	805	759	2,69	2,47

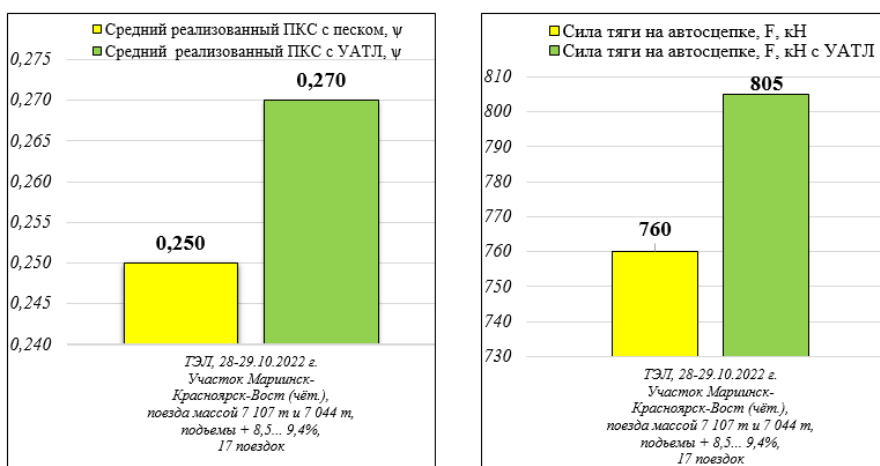


Рис. 3

Заключение

Сравнительный анализ представленных в табл. 5 зарегистрированных параметров, характеризующих тягово-сцепные свойства испытуемых локомотивов, показал следующее.

По итогам обработки данных контрольных поездок испытуемых локомотивов установлено, что средние значения силы тяги на автосцепке опытного электровоза ЗЭС5К № 1147, оборудованного УАТЛ, на 6 % выше, чем у контрольного электровоза № 1271, не оборудованного УАТЛ.

При этом установлено, что средние значения реализованного ПКС опытного электровоза ЗЭС5К № 1147, оборудованного УАТЛ, на 9 % выше, чем у контрольного электровоза № 1271, не оборудованного УАТЛ.

Анализ поездок с ТЭЛ показал необходимость повышения эффективности работы системы УАТЛ в неблагоприятных погодных условиях – при снеге и в условиях минусовых температур, а также доработки алгоритма системы управления УАТЛ.

Список литературы

- 1 Перспективы использования активаторов трения колес тягового подвижного состава с рельсом на Восточном полигоне ОАО «РЖД»: сборник научных статей по материалам VIII Международной научно-практической конференции, 15 апреля 2022 г., г. Уфа / О. С. Валинский, А. А. Воробьев. – Уфа : Издательство НИЦ Вестник науки, 2022. – С. 56–68.
- 2 **Bergman, E.** Friction propertied of spattered dichalcogenide Layers / E. Bergman, G. Melet, A. Simon-Vermet // Tribology International. – 1981. – No. 6 (14). – P. 329–332.

References

- 1 Prospects for the use of friction activators for wheels of traction rolling stock with rails at the Eastern landfill of JSC Russian Railways: a collection of scientific articles based on the materials of the VIII International Scientific and Practical Conference, April 15, 2022, Ufa / O. S. Valinsky, A. A. Vorobyov. – Ufa : Publishing house of SIC Bulletin of Science, 2022. – P. 56–68.
- 2 **Bergman, E.** Friction propertied of spattered dichalcogenide Layers / E. Bergman, G. Melet, A. Simon-Vermet // Tribology International. – 1981. – No. 6 (14). – P. 329–332.

3 **Эндрюс, Х. И.** Механизм сцепления / Х. И. Эндрюс // Железные дороги мира. – 1972. – № 9. – С. 27–31.

4 **Mouginsteine, L.** Technical and Economical Problems of Locomotive Wheelsets Adhesion with Rail / L. Mouginsteine // Proceedings of IHHA'99 STS-Conference on Wheel / Rail Interface. – Moscow, 1999. – P. 307–311.

5 **Gage, S.** Evaluation of Century Oil Lubrication Products / S. Gage, R. Reiff : TTCI Report. – 1991. – P. 95–107.

6 **Маiba, I. A.** Optimization of Tribotechnical Characteristics of Wheel-Rail Friction Modifiers / I. A. Maiba, D. V. Glazunov // Friction and wear. – 2020. – No. 6 (41). – P. 517–520. – DOI 10.3103/S1068366620060136.

7 **Лужнов, Ю. М.** Управление фрикционным взаимодействием колес подвижного состава с рельсами – резерв снижения себестоимости перевозочной работы / Ю. М. Лужнов, А. Т. Романова // Инновационная экономика : информация, аналитика, прогнозы. – 2016. – № 3. – С. 11–15. – ISSN 2411-9520.

8 **Патент № 2 721 993 Российская Федерация, МПК В61К 3/02 (2006.01), С10М 125/10 (2006.01), F16N 15/00 (2006.01).** Устройство активации трения и активатор повышенного трения : № 2019117405 : заявл. 04.06.2019 : опубл. 25.05.2020 / Валинский, О. С., Выщепан, А. Л., Лубягов, А. М., Маiba, I. A. – 10 с. : ил.

9 Улучшение сцепления колёс железнодорожного экипажа с рельсами подачей в область контакта частиц окислы или магнетита / И. И. Соснов, Ю. Ю. Осенин, Ю. И. Осенин, [и др.] // Трение и износ. – 2018. – № 4. – С. 415–420. – ISSN 0202-4977.

10 **Воробьев, А. А.** Прогнозирование ресурса и совершенствование технологии ремонта колес железнодорожного подвижного состава : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / А. А. Воробьев. – Санкт-Петербург : ПГУПС, 2018. – 289 с.

3 **Andrews, H. I.** Clutch mechanism / H. I. Andrews // Railways of the world. – 1972. – No. 9. – P. 27–31.

4 **Mouginsteine, L.** Technical and Economical Problems of Locomotive Wheelsets Adhesion with Rail / L. Mouginsteine // Proceedings of IHHA'99 STS-Conference on Wheel / Rail Interface. – Moscow, 1999. – P. 307–311.

5 **Gage, S.** Evaluation of Century Oil Lubrication Products / S. Gage, R. Reiff : TTCI Report. – 1991. – P. 95–107.

6 **Maiba, I. A.** Optimization of Tribotechnical Characteristics of Wheel-Rail Friction Modifiers / I. A. Maiba, D. V. Glazunov // Friction and wear. – 2020. – No. 6 (41). – P. 517–520. – DOI 10.3103/S1068366620060136.

7 **Luzhnov, Yu. M.** Control of friction interaction of rolling stock wheels with rails – a reserve for reducing the cost of transportation work / Yu. M. Luzhnov, A. T. Romanova // Innovative Economy : information, analytics, forecast. – 2016. – No. 3. – P. 11–15. – ISSN 2411-9520.

8 **Patent No. 2,721,993 Russian Federation, IPC В61К 3/02 (2006.01), С10М 125/10 (2006.01), F16N 15/00 (2006.01).** Friction activation device and increased friction activator : No. 2019117405 : application 04.06.2019 : publ. 05/25/2020 / Valinsky, O. S., Vyshchepan, A. L., Lubyagov, A. M., Maiba, I. A. – 10 p. : ill.

9 Improving the adhesion of the wheels of a railway carriage with rails by feeding into the area of contact of particles of scale or magnetite / I. I. Sosnov, Yu. Yu. Osenin, Yu. I. Osenin, [et al.] // Friction and wear. – 2018. – No. 4. – P. 415–420. – ISSN 0202-4977.

10 **Vorobyov, A. A.** Resource forecasting and improvement of wheel repair technology for railway rolling stock : dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / A. A. Vorobyov. – Saint Petersburg : PGUPS, 2018. – 289 p.

I. A. Maiba, I. I. Maiba

RESEARCH OF TRACTION PROPERTIES OF LOCOMOTIVES EQUIPPED WITH A FRICTION ACTIVATION DEVICE

Abstract. The results of comparative traction and energy operational tests and controlled operation at the landfill of the East Siberian Traction Directorate of the 3ES5K series locomotive No. 1147 manufactured by PC NEVZ LLC in 2021, complete with axial traction control and motor-axial rolling bearings equipped with a locomotive friction activation device (hereinafter – UATL), with locomotive of the 3ES5K series No. 1271 with axial control, not equipped with a UATL (equipped with a standard sand supply).

The analysis and generalization of the experimental data obtained, a comparison of the traction properties of the experimental electric locomotive No. 1147 equipped with UATL and the control electric locomotive not equipped with UATL.

Conclusions are drawn about the effectiveness of the use of UATL in freight traffic conditions during operational work at the landfill at the head of freight trains weighing 7,100 tons on the Mariinsk (Mezhdurechensk) – Nakhodka section (even direction).

Keywords: controlled operation, tests, friction activation device, traction and energy tests, indicators of traction properties of locomotives, comparative results of the use of friction activation devices.

For citation: Maiba, I. A. Reseach of traction properties of locomotives equipped with a friction activation device / I. A. Maiba, I. I. Maiba // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No 1. – P. 226–232. – DOI 10.46973/0201–727X_2024_1_226.

Сведения об авторах

Майба Игорь Альбертович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
факультет «Дорожно-строительные машины»,
доктор технических наук, профессор, декан,
e-mail: mia@rgups.ru

Майба Илья Игоревич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Транспортные машины и триботехника»,
аспирант,
e-mail: tmt@rgups.ru

Information about the authors

Maiba Igor Albertovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Faculty «Road Construction Machinery»,
Doctor of Engineering Science, Professor, Dean,
e-mail: mia@rgups.ru

Mayba Ilya Igorevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Transport Machines and Tribotechnics»,
Postgraduate Student,
e-mail: tmt@rgups.ru

А. Г. Отока, О. В. Холодилов

ОБНАРУЖЕНИЕ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ В МЕСТАХ ЛОКАЛИЗАЦИИ «ОСТАТОЧНЫХ РИСУНКОВ» НА ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ ЦЕЛЬНОКАТАНОГО КОЛЕСА ПОСЛЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЕГО ПРОФИЛЯ НА КОЛЕСОТОКАРНОМ СТАНКЕ

Аннотация. Описаны случаи, связанные с образованием «остаточных рисунков» после механической обточки поверхности цельнокатаных колёс на колёсотокарном станке, причиной которых является зачастую неправильный режим и условия резания глубоких выщербин и ползунов. Рассмотрена проблема оставления «остаточных рисунков» на поверхности катания колеса после выставления токарем минимального прохода резца по глубине с целью увеличения производительности обточки и сохранения, в том числе, минимально допустимой толщины обода, допускаемой в эксплуатации. На практике имеет место выявление подповерхностных дефектов в местах локализации таких участков, не описанных в технических нормативных правовых актах на ремонт и техническое обслуживание колесных пар вагонов. Показана проблематика ультразвукового контроля поверхности катания цельнокатаных колес поверхностной волной Рэлея при выявлении подповерхностных дефектов в колесных парах с тонким ободом. В целях недопущения пропуска дефектов в местах «остаточных рисунков» предложен вихретоковый метод, который будет использоваться в качестве подтверждающего на наличие скрытых поверхностных и подповерхностных дефектов.

Ключевые слова: остаточный рисунок, поверхность катания, цельнокатаное колесо, колесная пара, ползун, выщербина, подповерхностный дефект, трещина, колесотокарный станок, вихретоковый метод, ультразвуковой метод.

Для цитирования: Отока, А. Г. Обнаружение подповерхностных дефектов в местах локализации «остаточных рисунков» на поверхности катания цельнокатаного колеса после восстановления его профиля на колесотокарном станке / А. Г. Отока, О. В. Холодилов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1. – С. 233–239. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_233.

Введение

В условиях эксплуатации колёсные пары грузовых и пассажирских вагонов испытывают огромные статические и динамические нагрузки, приводящие к появлению различных дефектов. В первую очередь это относится к поверхности катания цельнокатаных колёс, имеющей специальный профиль, обеспечивающий устойчивое положение колёсной пары на рельсовой колее и определяющий направление движения подвижного состава [1].

Дефекты на поверхности катания колёс, возникающие в эксплуатации, при ремонте колёсных пар в колёсных участках вагонных предприятий устраняют механической обработкой на колёсотокарных станках. В соответствии с нормативными документами для продления срока службы старогонных цельнокатаных колёс разрешается оставлять на их поверхности черновины глубиной до 0,5 мм. Другие дефекты после обточки не допускаются.

Шероховатость R_a поверхностей катания колёс после их обточки должна быть не хуже 1,25 мкм. Однако её получение после обточки колеса на деле практически невыполнимо. В работе [2] приведены значения шероховатости различных колёс при обточке на одном и том же колёсотокарном станке, которые показывают большую вариабельность. В настоящее время самым сложным в нормировании, измерении и метрологическом обеспечении является шероховатость поверхности, т. к. она определяет многие функциональные и эксплуатационные свойства поверхности.

Организационно-технические факторы, влияющие на производительность, предполагают правильное использование колёсотокарного станка по режимным и мощностным показателям с учётом реальных дефектов на поверхности катания колёс обрабатываемых колёсных пар.

Главным движением при обтачивании колёс на колёсотокарных станках является вращение колёсной пары, а движением подачи – поступательное перемещение режущего инструмента по заданной траектории, соответствующей профилю поверхности катания обода колеса.

При выборе параметров режима обработки необходимо учитывать не только конечную производительность станка, но и качество обработанной поверхности катания колёс. Глубину резания, подачу и скорость резания на колёсотокарных станках устанавливают, как правило, опытным путём, а также исходя из технических характеристик станка. При этом должен учитываться фактический износ колёс, наличие и виды повреждений на поверхности катания [3].

При наличии глубокого дефекта на поверхности катания колеса в виде выщербины, токарь проводит операцию обточки колёс за несколько проходов резца, начиная с верхней части дефекта и заканчивая снятием металла самого корня.

Состояние вопроса и пути решения проблемы

Профиль колеса на практике, как правило, восстанавливают за два прохода резца, поэтому первый проход считается грубой обработкой, а второй – чистовой.

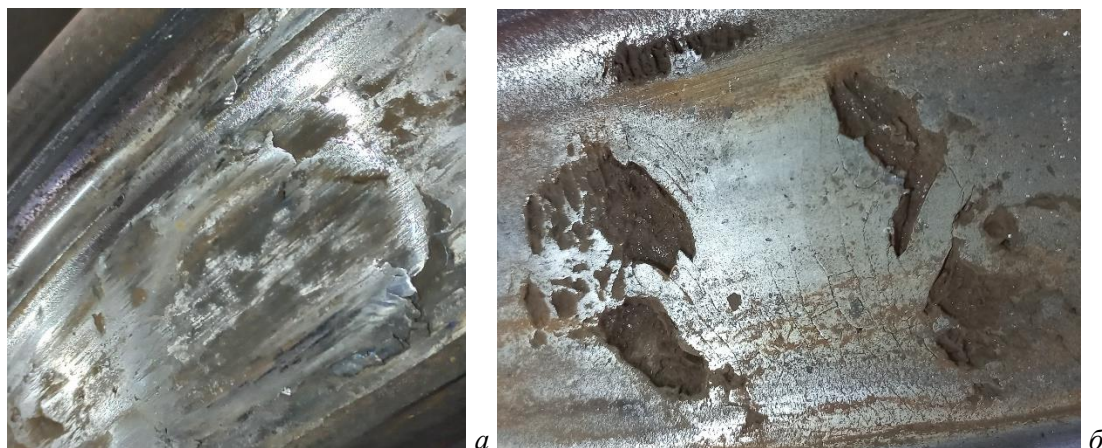
Однако на практике имеются случаи, когда остаются трещины после двух, трёх и даже четырёх проходов резца (рис. 1). Как правило, токарь ставит наименьшую глубину резания, надеясь на то, что трещина неглубокая. В частности, когда толщина обода уже практически составляет 26–27 мм (после обточки максимально допустимая 24 мм) и требуется ещё одна обточка колеса – такой процедуры просто не избежать. Все это приводит к тому, что на практике снимаемой части основного металла ($\approx 0,5 \dots 2,0$ мм) недостаточно и на выходе получаем т. н. «остаточный рисунок», который может скрывать имеющийся дефект (трещину).



Рис. 1. Дефекты на поверхности катания после обточки колеса:

- a* – трещины поперечные длиной 20 мм и 16 мм, остатки выщербины после первой обточки;
- б* – трещина поперечная длиной 5 мм, остатки выщербины после второй обточки;
- в* – поперечная трещина длиной 22 мм; *г* – отдельные трещины (продольная и поперечная), выходящие из одной точки (протяжённость продольной трещины 4 мм, протяжённость поперечной 9 мм); *д* – сетка волосяных трещин после первой обточки (длина максимальной трещины 23 мм); *е* – сетка трещин после второй обточки (длина максимальной трещины 39 мм)

Такие «остаточные рисунки» наблюдаются после устранения ползунов (рис. 2, *a*) и выщербин (рис. 2, *б*).



**Рис. 2. Дефекты поверхности катания колеса, требующие устранения
обточкой на колесотокарном станке:**

а – дефект типа «ползун»; *б* – выщербины с развивающимися трещинами вглубь металла

Выщербины на поверхности катания обода колеса – местное разрушение в виде выкрашивания металла поверхности катания колеса (по светлым пятнам, ползунам, наварам (611), усталостным (612) и термическим трещинам (613).

Ползун (212) – локальный износ колеса, характеризующийся образованием плоской площадки на поверхности катания.

Однако наибольшую опасность они представляют совместно с трещинами, которые развиваются вглубь металла, т. к. из-за малой глубины резания и воздействия температуры часть металла может смещаться (налегать друг на друга) и происходит процесс т. н. «запайки».

Известно, что в процессе резания в основном происходят:

- 1) упругая и пластическая деформация в срезаемом слое металла, отходящем в виде стружки;
- 2) упругая и пластическая деформация металла за линией среза в обработанной детали;
- 3) трение срезаемого слоя металла (стружки) о переднюю грань резца;
- 4) трение задних граней резца об обрабатываемую деталь. Эти явления вызывают изменение свойств металла в поверхностном и срезаемом слоях, теплообразование (нагрев изделия и резца).

При минимальной глубине резания температура у режущей части резца увеличивается весьма быстрее, чем при резании на большей глубине.

Стоит отметить, что температура процесса резания при прочих равных условиях зависит от скорости резания, глубины резания и подачи. При этом в процессе обточки резцами (твердосплавными пластинами) положение плоскости резания (плоскость, проходящая через главную режущую кромку касательно к поверхности резания) может изменяться вследствие движения резца относительно изделия. По этой причине может изменяться передний и задний углы резания [4].

Учитывать следует также износ резца (пластины), который в основном зависит от материала цельнокатаного колеса (Сталь 1, 2, 2Г, Т) и материала твердосплавных пластин LNMХ (СТ15М, VT110, ТРС15М, VT323, ТРС15), режима резания.

Все вышеперечисленное, в том числе и размеры устраняемых дефектов (ползунов и выщербин), может повлиять на образование «остаточных рисунков».

В нормативных документах [1, 5, 6] такое понятие как «остаточный рисунок» не используется, однако на практике среди токарей и дефектоскопистов по магнитному и ультразвуковому контролю вагонных предприятий этот термин пользуется популярностью и носит систематический характер (рис. 3).

Что касается неразрушающего контроля поверхности колеса, то здесь в соответствии с нормативным документом [7] «обязательным» методом является только ультразвуковой. Однако на практике этот метод не позволяет принять однозначное решение о состоянии колеса.

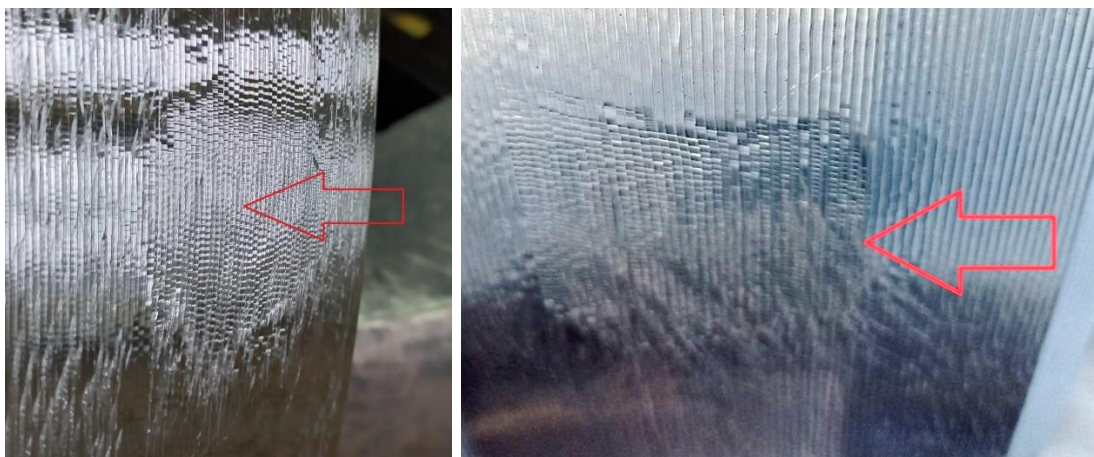


Рис. 3. Вид «остаточного рисунка» после обточки поверхности катания колеса, образовавшийся в результате устранения дефекта типа «ползун»

Все дело в том, что чувствительность контроля при использовании поверхностных волн очень высокая и отличить полезный сигнал от ложного с учётом пересчёта расстояния созданной искусственно настройки довольно проблематично. Опыт показывает, что ложные сигналы возникают в результате попадания грязи, масла, остатков ворса от ветоши или волос кисти для нанесения контактной жидкости, а также контакта колеса с рельсом или роликами-опорами на участке дефектоскопии и т.д. Особенно остро эта проблема возникает для колёс с тонким ободом, когда срезаются клейма на внешней стороне обода.

Срезанные клейма являются главным мешающим фактором в ультразвуковой дефектоскопии, т. к. отражение от них ведёт к росту общего усиления сигнала за счёт автоматической регулировки усиления второго прошедшего сквозного сигнала до середины зоны временной селекции, препятствующего идентификации полезных сигналов (рис. 4).

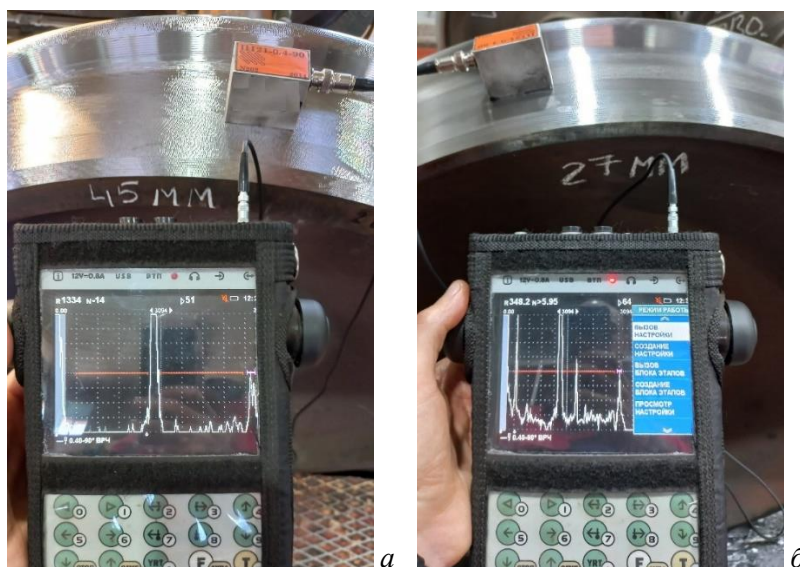


Рис. 4. Вид экрана дефектоскопа УД2-102ВД при контроле бездефектной поверхности катания колёс с толщиной обода 45 (а) и 27 мм (б):

а – отсутствие мешающих факторов; *б* – наличие мешающих факторов (срезанные клейма)

Стоит заметить, что для контроля внутренней части гребня колеса используется вихретоковый метод. На практике данный метод очень хорошо зарекомендовал себя в части подтверждения поверхностных дефектов, в том числе и подповерхностных в местах локализации «остаточных рисунков» на поверхности катания колеса (рис. 5).



Рис. 5. Обнаружение подповерхностного дефекта в месте «остаточного рисунка» вихретоковым дефектоскопом ВДЗ-71

При проведении вихретокового контроля «остаточных рисунков» целесообразно использовать вихретоковый преобразователь (ВТП) с минимальным диаметром, т. к. выявляемая протяженность скрытой трещины напрямую зависит от этого параметра. На практике принято считать, что минимальная протяженность трещины равна половине диаметра ВТП. К примеру, при диаметре ВТП 9 мм минимальная протяженность выявленной трещины составляет 4,5 мм. При выборе частоты преобразователя из имеющегося интервала в соответствии с паспортом, следует выбирать наименьшую в целях проникновения вихревых токов на большую глубину. Настройку необходимо проводить по минимальному искусственному дефекту (пропилу) стандартного образца с шероховатостью поверхности, соответствующей таковой поверхности катания колеса.

На основании имеющегося опыта работы можно утверждать, что вероятность нахождения подповерхностных дефектов на месте «остаточного рисунка» составляет 10...20 %, но такие случаи после обточки колеса имеют место, и найти эти дефекты можно только благодаря вихретоковому методу.

Перед обточкой колёсной пары токарь, зачастую, делает меловые отметки на внутренней стороне колеса, чтобы отслеживать устраняемый глубокий дефект. И здесь очень важно, чтобы токарь работал сообща с дефектоскопистом по магнитному и ультразвуковому контролю. При этом убедиться в отсутствии таких дефектов можно, не снимая колёсную пару с колёсотокарного станка, что в целом экономит время на подготовительно-заключительные работы.

Пропуск подповерхностного дефекта в виде трещины может обернуться катастрофическими последствиями, особенно в случае допуска в эксплуатацию колеса с минимальной толщиной обода. Хотелось бы отметить, что ввиду малого срока службы колёс при их частой обточке и их дефиците на рынке, имеется тенденция к уменьшению минимально допустимой толщины обода до 16 мм [8].

Заключение

В связи с вышеизложенным полагаем, что использование вихретокового метода в качестве подтверждающего контроля таких участков, как «остаточный рисунок», ранее не встречающихся в нормативных документах, должно быть обязательным и закреплено технологической документацией, утверждённой на ремонтном предприятии вагонного хозяйства. Такой подтверждающий контроль не требует практически никаких временных и финансовых затрат, а самое главное, способствует повышению безопасности перевозки грузов и пассажиров.

Список литературы

1 РД ВНИИЖТ 27.05.01–2017. Руководящий документ по ремонту и техническому обслуживанию колесных пар с буксовыми узлами грузовых вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 (1524) мм (утвержден Советом по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества, протокол от «19–20» октября 2017 г. № 67). – 242 с.

2 Остапук, А. К. Технологическое обеспечение параметров шероховатости

References

1 RD VNIIZHT 27.05.01–2017. Guidance document on the repair and maintenance of wheel sets with axle boxes of freight cars of mainline railways of 1520 (1524) mm gauge (approved by the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States, Protocol No. 67 dated October 19–20, 2017). – 242 p.

2 Ostapuk, A. K. Technological support of the parameters of the roughness of the rolling surface

поверхности катания колесной пары после механической обработки / А. К. Остапук, А. Г. Михалищев, Е. М. Кузнецова // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – № 2. – 2015. – С. 73–86.

3 **Богданов, А. Ф.** Эксплуатация и ремонт колесных пар вагонов / А. Ф. Богданов, В. Г. Чурсин. – Москва : Транспорт, 1985. – 270 с.

4 Технический справочник железнодорожника. Обработка металлов на предприятиях железнодорожного транспорта / В. А. Бравичев, Н. В. Бродович [и др.]. – Т. 12. – Москва : Гос. трансп. ж-д. изд-во, 1954. – 671 с.

5 Руководящий документ по ремонту и техническому обслуживанию колесных пар с буксовыми узлами пассажирских вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 (1524) мм (утверждено Советом по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества, протокол от «4–5» ноября 2015г. – № 63. – 281 с.

6 **Р ВНИИЖТ 76.03.01-2020.** Руководство по организации нового формирования и ремонта колесных пар и буксовых узлов грузовых вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 (1524) мм на ремонтных предприятиях (утвержден Советом по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества, протокол от «08» июня 2021 г. № 74. – 97 с.

7 **ПР НК В.2** Правила неразрушающего контроля деталей и составных частей колесных пар вагонов при ремонте. Специальные требования (утверждены Советом по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества, протокол от «19–20» ноября 2013 г. № 59. – 88 с.

8 Методика определения минимально допустимой толщины обода цельнокатанных колес грузовых вагонов в эксплуатации / А. А. Воробьев, И. В. Федоров, О. А. Конограй [и др.] // Бюллетень результатов научных исследований. – 2023. – № 3. – С. 85–99.

of a wheelset after mechanical processing / A. K. Ostapuk, A. G. Mikhailishchev, E. M. Kuznetsova // Transport. Transport facilities. Ecology. – No. 2. – 2015. – P. 73–86.

3 **Bogdanov, A. F.** Operation and repair of wheel sets of wagons / A. F. Bogdanov, V. G. Chursin. – Moscow : Transport, 1985. – 270 p.

4 Technical reference of a railway worker. Metal processing at railway transport enterprises / V. A. Bravichev, N. V. Brodovich [et al.] – Vol. 12. – Moscow : State transport zheleznod. publishing house, 1954. – 671 p.

5 Guidance document on the repair and maintenance of wheel sets with axle boxes of passenger cars of mainline railways of 1520 (1524) mm gauge (approved by the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States, Protocol No. 63 dated November 4–5, 2015. – 281 p.

6 **R VNIIZHT 76.03.01-2020.** Guidelines for the organization of new formation and repair of wheel sets and axle boxes of freight cars of mainline railways of 1520 (1524) mm gauge at repair enterprises (approved by the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States, Protocol No. 74 dated June 08, 2021. – 97 p.

7 **PR NK V.2** Rules of non-destructive testing of parts and components of wheel sets of wagons during repair. Special requirements (approved by the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States, Protocol No. 59 dated November 19–20, 2013. – 88 p.

8 Methodology for determining the minimum allowable thickness of the rim of solid-rolled wheels of freight cars in operation / A. A. Vorobyov, I. V. Fedorov, O. A. Konograi [et al.] // Bulletin of the results of scientific research. – 2023. – No. 3. – P. 85–99.

A. G. Otoka, O. V. Kholodilov

DETECTION OF SUBSURFACE DEFECTS IN PLACES LOCALIZATION "RESIDUAL PATTERNS" ON THE SURFACE RIDING A SOLID-ROLLED WHEEL AFTER RESTORATION ITS PROFILE ON A WHEEL-TURNING MACHINE

Abstract. The paper described cases related to the formation of "residual patterns" after mechanical turning of the surface of solid-rolled wheels on a wheel-turning machine, the cause is often the wrong mode and conditions for cutting deep gouges and sliders. The problem of leaving "residual patterns" on the rolling surface of the wheel after the turner has set the minimum passage of the cutter in depth in order to increase the turning performance and preserve,

among other things, the minimum allowable rim thickness allowed in operation. In practice, there is an identification of subsurface defects in the locations of such sites that are not described in technical regulatory legal acts for the repair and maintenance of wheel sets of wagons. The problems of ultrasonic control of the rolling surface of solid-rolled wheels by a Rayleigh surface wave when detecting subsurface defects in wheel pairs with a thin rim are shown. In order to prevent the omission of defects in the places of "residual patterns", an eddy current method is proposed, which will be used as a confirmation for the presence of hidden surface and subsurface defects.

Keywords: residual pattern, rolling surface, solid-rolled wheel, wheelset, slider, notch, subsurface defect, crack, wheel-turning machine, eddy current method, ultrasonic method.

For citation: Otoka, A. G. Detection of subsurface defects in places localization "residual patterns" on the surface riding a solid-rolled wheel after restoration its profile on a wheel-turning machine / A. G. Otoka, O. V. Kholodilov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 1. – P. 233–239. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_233.

Сведения об авторах

Отока Александр Генрикович

Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ),
кафедра «Вагоны»,
магистр технических наук, аспирант,
e-mail: otokaa@mail.ru

Холодиллов Олег Викторович

Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ),
кафедра «Вагоны»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: olhol@tut.by

Information about the authors

Otoka Alexander Genrikhovich

Belarusian State University of Transport (BelGUT),
Chair «Wagons»,
Master of Engineering Sciences,
Postgraduate Student
e-mail: otokaa@mail.ru

Kholodilov Oleg Viktorovich

Belarusian State University of Transport (BelGUT),
Chair «Wagons»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: olhol@tut.by

А. Ю. Приймак, М. Ю. Сербиновский

ВЫБОР ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ФОРСУНОК ВПРЫСКИВАЮЩИХ ПАРООХЛАДИТЕЛЕЙ

Аннотация. По результатам анализа информации о разрушениях и дефектах центробежных форсунок впрыскивающих парохладителей (ВПО) была выявлена потребность в выборе перспективного материала для их изготовления с целью повышения ресурса работы. С учетом анализа был разработан и описан принципиальный подход к проведению натурных испытаний образцов, максимально приближенный к режимам работы центробежных форсунок во впрыскивающих парохладителях, включающий циклический нагрев и охлаждение, определены критерии для выбора перспективного материала для изготовления центробежных форсунок, а именно: структура материала и изменение его твердости, а также склонность к трещинообразованию.

Ключевые слова: впрыскивающий парохладитель, центробежная форсунка, материал, паровой котёл, регулирование температуры пара.

Для цитирования: Приймак, А. Ю. Выбор перспективных материалов центробежных форсунок впрыскивающих парохладителей / А. Ю. Приймак, М. Ю. Сербиновский // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1. – С. 240–247. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_240.

Введение

Форсунки впрыскивающего парохладителя (ВПО) обеспечивают распыл воды в паровой тракт энергетического котла и напрямую влияют на качество регулирования параметров пара, уходящего из котла в турбину энергоблока ТЭС, манёвренные характеристики последнего. С другой стороны, форсунки в процессе эксплуатации подвергаются высоким напряжениям вследствие больших температурных градиентов и эрозии, вызванных скоростным турбулентным потоком воды и пара, поэтому их надёжность и ресурс работы определяет надёжность и межремонтный ресурс котла в целом. Об этом свидетельствуют статистические данные аварий на энергоблоках ТЭС [1–4]. Требования по повышению надёжности и ресурса форсунок и ВПО в целом приводят к необходимости постоянного совершенствования их конструкции [4–7].

Основанная часть

Материалы форсунок ВПО должны обеспечивать надёжную работу при температуре 545 °С и выше, быть стойкими к эрозионному износу, не склонными к образованию трещин при больших градиентах температуры (термошоку), быть технологичными и относительно недорогими в условиях котлостроительного производства, поэтому выбор материала для изготовления форсунок остается серьезной и сложной задачей. В настоящее время для изготовления форсунок используется довольно широкий круг материалов, однако, нет достаточно полных и глубоких исследований, связанных с выбором материалов форсунок, которые соответствовали бы противоречивым требованиям, предъявляемым к ним. Требуются дальнейшие исследования по выбору материалов форсунок, при этом необходимо наиболее полно учитывать условия их работы при различных эксплуатационных режимах котлоагрегата, кроме этого, требуется установить, на каких этапах изготовления и эксплуатации появляются и развиваются дефекты, которые приводят к разрушению форсунок.

Форсунка ВПО (рис. 1 [2]) включает в себя корпус, состоящий из цилиндрической и полусферической частей, полусферическое доньшко. Корпус форсунки имеет тангенциальные каналы и сопло, а со стороны потока пара он защищён кожухом. Корпус форсунки, доньшко изготавливают из металла стойкого к эрозии.

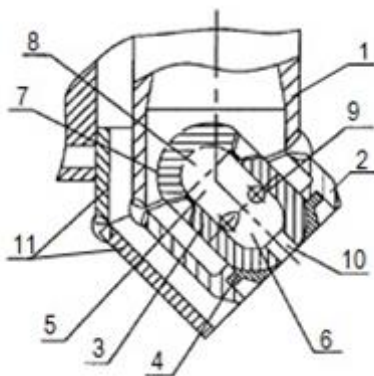


Рис. 1. Конструкция центробежной форсунки:

1 – водоподводящая труба, 2 – втулка форсунки, 3 – корпус форсунки, 4 – венец,
5 – внутренняя полость корпуса, 6 – цилиндрическая часть полости, 7 – доньшко корпуса,
8 – полусферическая часть внутренней полости, 9 – тангенциальные каналы, 10 – сопло,
11 – защитный кожух

В рамках исследования были определены следующие основные мероприятия по определению оптимального материала для изготовления центробежных форсунок и, соответственно, методы исследования: 1) сбор и анализ исходных данных; 2) разработка программы испытаний; 3) определение формы и параметров образца; 4) разработка конструкторской документации на образцы; 5) изготовление и контроль образцов; 6) проведение испытаний; 7) анализ результатов и формулирование выводов.

Остановимся на основных.

Определение формы и параметров образца производили с учетом специфики работы форсунки, а именно резкой смены температуры: от температуры пара (max 570 °С), до температуры впрыскиваемой воды (min 60 °С). Максимальный градиент температур наблюдается в пусковых пароохладителях прямоточных котлов и порой достигает более 400 °С.

Разработанный образец представляет собой плоскую шайбу, диаметр которой был выбран, соответствующим расстоянию между соседними входными отверстиями в форсунке, в середине шайбы расположено одиночное отверстие диаметром 5 мм, который соответствует размеру входных отверстий в форсунке. С одной стороны отверстие имеет фаску размером 1×45°, с другой – фаска отсутствует. Толщина шайбы соответствует толщине стенки форсунки, а ее края, с целью исключения локальной концентрации напряжений, выполнены радиусом 4 мм. Параметр шероховатости поверхности готовой шайбы после механической обработки соответствует шероховатости поверхности форсунки и составляет Ra 20.

Образцы данной конструкции были изготовлены из пяти марок электродов, которые выбраны с учетом специфики режимов работы форсунки, а также технологических возможностей ПАО ТКЗ «Красный котельщик», данные по ним приведены в табл. 1. Каждый образец имел специальную маркировку, отражающую материал и порядковый номер.

Таблица 1

Выбранные материалы для изготовления образцов

№ поз.	№ образца	Марка (тип) электрода	Тип электрода с указанием химического состава
1	11-16	ВПН-1	Э-09Х16Н9С5Г2М2ФТ
2	21-26	ЭА-400/10Т	Э-07Х19Н11М3Г2Ф
3	31-36	ЭА-395/9	Э-11Х15Н25М6АГ2
4	41-46	ЦЛ-25/2	Э-10Х25Н13Г2
5	51-56	ЦЛ-11	Э-08Х20Н9Г2Б

Программа испытаний образцов разработана на основании данных, полученных от эксплуатационного персонала электростанций и включает в себя режимы термических испытаний,

максимально повторяющиеся реальные режимы работы центробежной форсунки в ВПО и включают попеременный нагрев и резкое охлаждение образцов.

Нагрев образцов производился в печи ПТК до температуры 545 °С, с выдержкой в течение 1 часа. По окончании выдержки образцы охлаждали в воде комнатной температуры в течение 5–7 минут. Возникающий градиент температур в 520 °С превышал максимально возможный в форсунке 400 °С, однако позволил интенсифицировать процессы появления и развития дефектов в материале образцов. Общее количество циклов «нагрев-охлаждение» выбрано равным 50, что в среднем соответствует 4-м пускам котла из холодного состояния в год за 11,5 лет, которые соответствуют расчетному ресурсу 100 000 часов.

Контроль образцов включал в себя цветную дефектоскопию, измерения значений твердости, микроанализ проводился на базе ЦЗЛ ПАО ТКЗ «Красный котельщик».

Капиллярный контроль образцов основан на применении проникающих жидкостей, регистрации (индикаторных следов) их на адсорбирующем покрытии. Контроль выполнялся с помощью дефектоскопического комплекта Nord-Test класс точности 2, который включает в себя пенетрант U-88, проявитель U-89, очиститель U-87.

Контроль твердости образцов производили с помощью твердомера Виккерса Металаб 422 (свидетельство о поверке № С-ВР/07-04-2023/241882692, действительно до 06.04.2024) по шкале Роквелла. Исследование микроструктуры проводили после приготовления микрошлифов до и после травления в растворе кислот, состоящем из 10 мл азотной кислоты и 30 мл соляной кислоты на оптическом микроскопе «Olympus» GX53 с анализатором фрагментов микроструктуры твердых тел при увеличении 100–1000 крат.

В рамках исследования металла образцов на этапе изготовления и термообработки методом капиллярного контроля были выявлены множественные дефекты в виде линейных и криволинейных индикаторных следов, пор и их скоплений. Трещин на этапе термообработки обнаружено не было. Отметим, что все выявленные дефекты образовались во время изготовления образцов. Диаграмма распределения количества дефектов по образцам приведена на рис. 2.

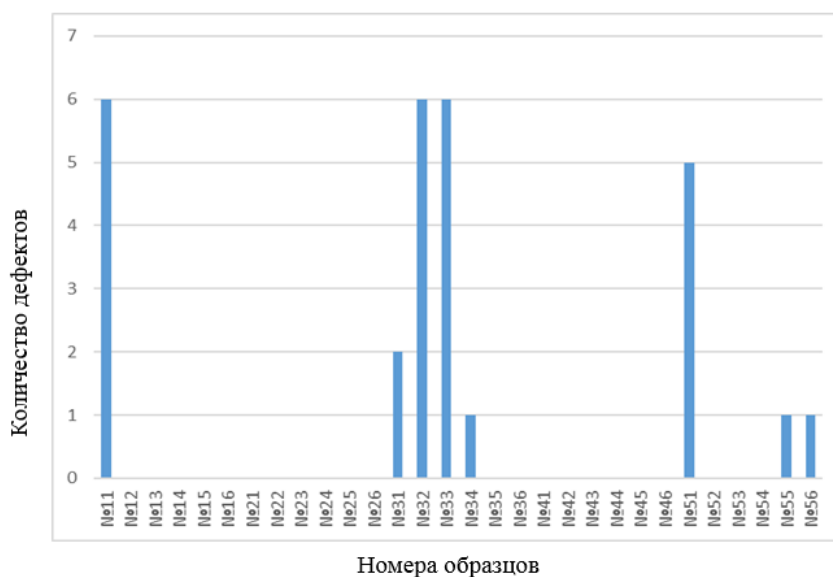


Рис. 2. Диаграмма распределения количества дефектов по образцам:

№ 11–16 (электрод ВПН-1, Э-09Х16Н9С5Г2М2ФТ), № 21–26 (электрод ЭА-400/10Т, Э-07Х19Н11МЗГ2Ф), № 31–36 (электрод ЭА-395/9, Э-11Х15Н25М6АГ2), № 41–46 (электрод ЦЛ-25/2, Э-10Х25Н13Г2), № 51–56 (электрод ЦЛ-11, Э-08Х20Н9Г2Б)

Вероятность появления дефектов по всей партии образцов составляет 27 %, а вероятность появления более одного дефекта на образце – 17 %. При этом вероятность появления дефектов на изделиях с наплавкой материалом Э-09Х16Н9С5Г2М2ФТ, составляет 17 %, материалом Э-11Х15Н25М6АГ2 – 67 % при 50 %-ной вероятности более одного дефекта на изделии, материалом Э-08Х20Н9Г2Б – 50 %. Нужно отметить, что при малой выборке эксперимента это лишь ориентировочные показатели, однако поры и поверхностные дефекты могут стать причиной возникновения и развития

трещин в процессе длительной эксплуатации форсунок в условиях их периодического температурного шока при пусковых режимах котла и работе котла на скользящих режимах (частом изменении его паропроизводительности). Таким образом, при количестве форсунок 8–24 в ВПО котла 2–6 форсунок будут иметь пониженный ресурс и повышенную вероятность быстрой потери работоспособности. Соответственно предпочтительны материалы, обладающие более высокой стойкостью к появлению производственных дефектов, кроме этого нужен тщательный контроль дефектов в процессе изготовления форсунок.

В табл. 2 приведены механические характеристики электродов, используемых для наплавки [8–13].

Таблица 2

Механические характеристики образцов

№ поз.	Марка (тип) электрода	Тип электрода с указанием химического состава	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %, δ_5	Относительное сужение, %, ψ	Ударная вязкость +20°C, Дж/см ² , KCU ⁺²⁰
1	ВПН-1	Э-09X16H9C5Г2M2ФТ	–	–	–	–	–
2	ЭА-400/10Т	Э-07X19H11M3Г2Ф	–	≥ 350	≥ 25	–	≥ 90
3	ЭА-395/9	Э-11X15H25M6АГ2	≥ 608	≥ 392	≥ 30	≥ 45	≥ 120
4	ЦЛ-25/2	Э-10X25H13Г2	539 (560)	(340)	29,4 (45)	–	25 (52) (88 ^{40°C})
5	ЦЛ-11	Э-08X20H9Г2Б	540	310	22	–	80

Примечание: Твердость наплавленного электродами ВПН-1 слоя при нормальной температуре: в исходном состоянии – норма 25–30 HRC₃, после термообработки 30,5–36,0 HRC₃.

Отметим, что производители не раскрывают основные механические характеристики электродов ВПН-1 (Э-09X16H9C5Г2M2ФТ), указывая только твердость наплавленного электродами ВПН-1 слоя при нормальной температуре в исходном состоянии и после термообработки. По остальным исследуемым электродам приводятся достаточно полные сведения о механических характеристиках, однако по электродам ЦЛ-25/2 (Э-10X25H13Г2) разных производителей диапазоны характеристик относительно большие. Однако приведённые данные показывают, что материалы можно отнести к высокопрочным, потенциально обладающие высокой стойкостью к эрозии высоко скоростным потоком воды. Стойкость к трещинообразованию предполагает достаточно высокую пластичность и ударную вязкость, поэтому наиболее предпочтительны в данном случае электроды ЭА-395/9 (Э-11X15H25M6АГ2) и ЦЛ-25/2 (Э-10X25H13Г2), но пластичность материалов электродов ЭА-400/10Т (Э-07X19H11M3Г2Ф) и ЦЛ-11 (Э-08X20H9Г2Б) уступает мало. Для выработки рекомендаций по выбору материалов рассмотрим изменение одной из основных характеристик, влияющих на более стойкость к эрозии – твердость материала и её изменение в процессе эксплуатации форсунок.

Зависимости твердости исследуемых материалов от количества циклов «нагрев – охлаждение» представлены на рис. 3. Циклы «нагрев – охлаждение» моделируют в данном случае пуски котла из холодного состояния, т.е. когда котел охлажден ниже температуры 100 °С.

Отметим, что металлографические исследования эксплуатируемых ВПО показали, что в приповерхностном слое форсунок появляется подкалочная зона с троосто-мартенситной структурой, в которой появляются и развиваются трещины [3].

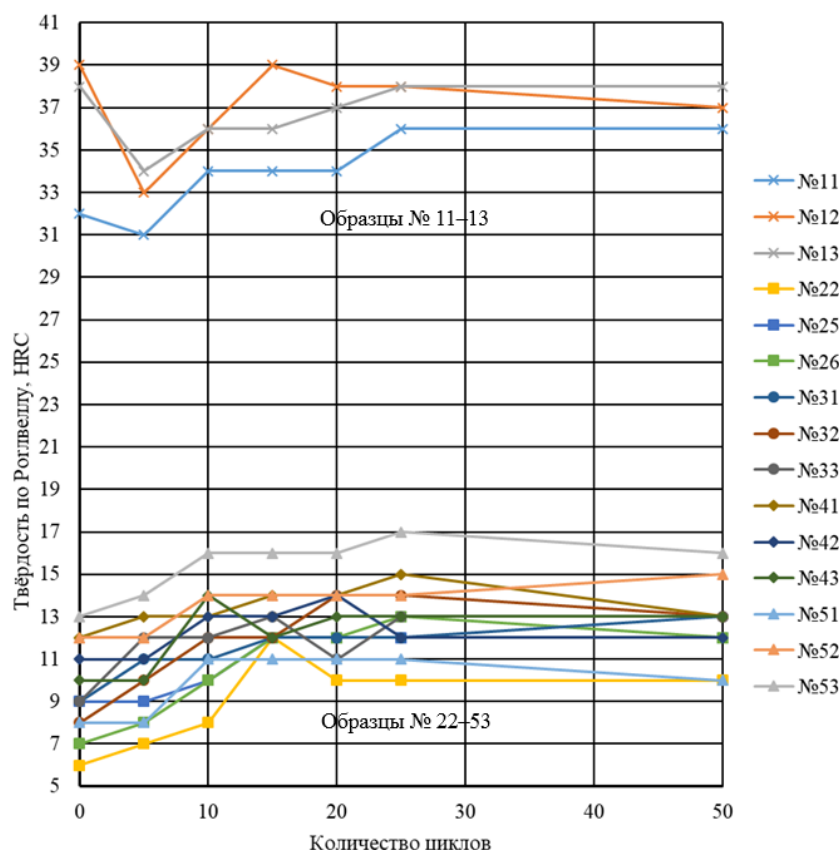


Рис. 3. Зависимости твердости образцов электродных материалов от количества циклов «нагрев – охлаждение»

Значения твердости образцов № 11–53 всех исследованных материалов лежат в пределах от 6 до 39 HRC. При этом твердость образцов № 21–53 (электроды ЭА-400/10Т, ЭА-395/9, ЦЛ-25/2 и ЦЛ-11) находятся в пределах значений от 6 до 17 HRC и существенно ниже части твердости образцов № 11–13 (электрод ВПН-1), значения твердости которых находятся в пределах от 31 до 39 HRC. С ростом количества термообработок (циклов «нагрев – охлаждение») у материалов образцов № 21–53 твердость возрастает. Для образцов № 11, 12, 13 при первых термообработках снижается на 1–6 единиц HRC далее возрастает на 4–5 единиц HRC и после последнего 50-го цикла составляет 36–38 HRC, у остальных образцов № 22–53 рост твердости составляет в среднем 3,5 единицы HRC. Повышение твердости образцов № 22–53 относительно мало, что говорит о сохранении их механических свойств при циклическом нагреве и охлаждении. Для образцов № 11, 12 и 13 (электрод ВПН-1) повышение твердости после первых пяти циклов говорит об охрупчивании образцов при периодическом нагреве и охлаждении, а это создаёт благоприятные условия для появления и развития трещин в форсунке.

Исследовали структуры образцов № 11–53 после 50 циклов нагрева и охлаждения. Микроструктура материалов образцов представлена на рис. 4. Результаты исследования показали, что материалы образцов № 23–53 имеет структуру аустенита + α -фазы Fe. Наиболее гомогенная структура материалов Э-07X19N11M3Г2Ф (электрод ЭА-400/10Т) и Э-11X15H25M6АГ2 (электрод ЭА-395/9), позволяет говорить об их большей потенциальной стойкости к эрозионным процессам и к трещинообразованию. Образцы из материала Э-09X16H9C5Г2M2ФТ (электрод ВПН-1) отличаются троосто-мартенситной структурой (рис. 4, образец № 13), что свидетельствует об их склонности к трещинообразованию в процессе эксплуатации котельных форсунок.

В целом проведённый анализ позволяет сделать вывод о перспективности применения электродов аустенитной группы, в первую очередь электродов ЭА-400/10Т (Э-07X19N11M3Г2Ф) и ЭА-395/9 (Э-11X15H25M6АГ2). Однако необходимы дальнейшие исследования данных материалов по критерию износостойкости.

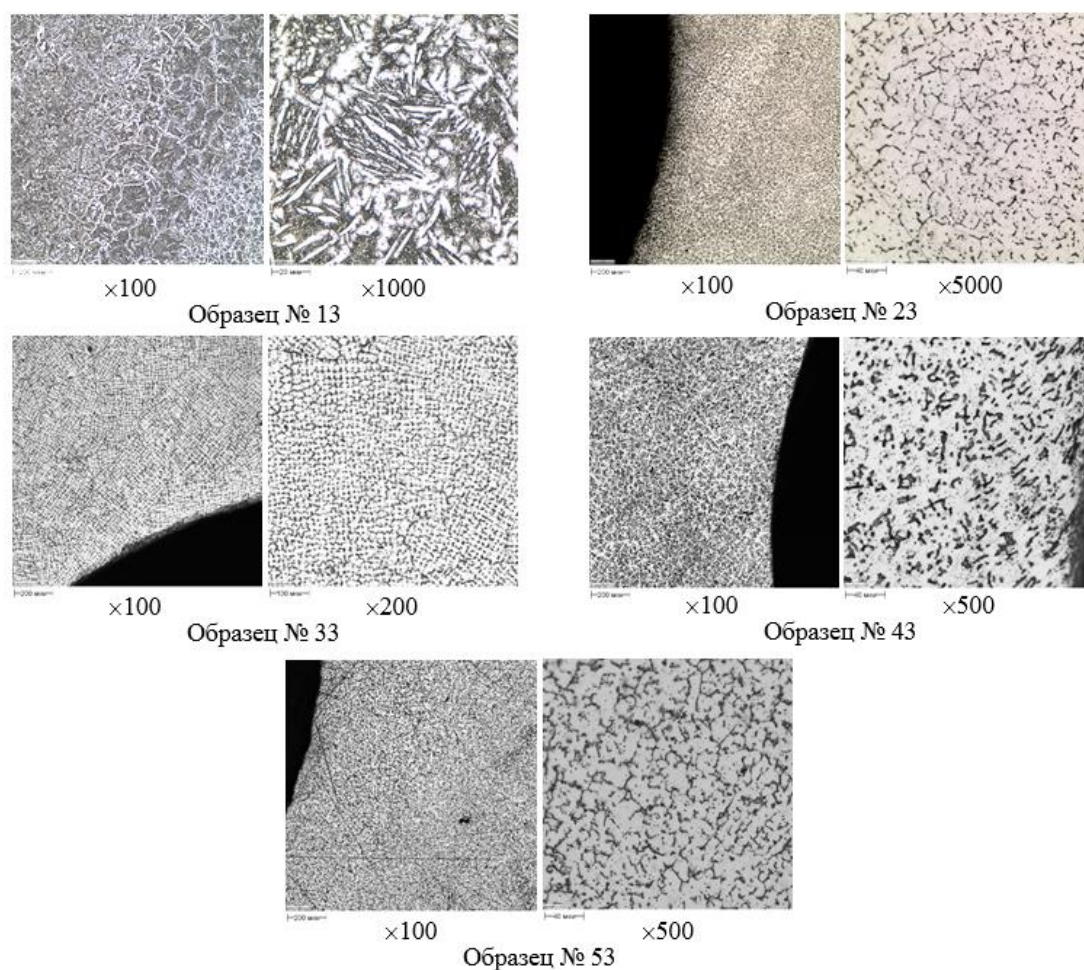


Рис. 4. Микроструктура образцов

Выводы

1 Исследованы пять электродных материалов для наплавки с целью определения приоритетного материала для форсунок впрыскивающих пароохладителей паровых котлов. Изучены склонность к появлению дефектов в процессе изготовления, изменение твердости материалов при их циклическом нагреве и охлаждении, микроструктура образцов материалов после проведения циклического нагрева и охлаждения.

2 Выявлена повышенная склонность электродных материалов Э-09Х16Н9С5Г2М2ФТ, Э-11Х15Н25М6АГ2 и Э-08Х20Н9Г2Б к появлению дефектов в процессе изготовления.

3 Показано, что электродный материал Э-09Х16Н9С5Г2М2ФТ имеет повышенную твердость по отношению к другим исследованным материалам, при этом его твердость повышается в процессе циклического нагрева и охлаждения, что говорит о постепенном формировании закалочной структуры. Остальные исследованные материалы имеют меньшую твердость, мало склонны к повышению твердости при циклическом нагреве и охлаждении, не образуют закалочных структур при циклическом нагреве и охлаждении.

4 В результате циклического нагрева и охлаждения в образцах из электродного материала Э-09Х16Н9С5Г2М2ФТ формируется троосто-мартенситная структура склонная к трещинообразованию, поэтому материал Э-09Х16Н9С5Г2М2ФТ не рекомендуется к использованию в конструкции форсунок впрыскивающих пароохладителей паровых котлов. Материалы Э-07Х19Н11М3Г2Ф, Э-11Х15Н25М6АГ2, Э-10Х25Н13Г2 и Э-08Х20Н9Г2Б сохраняют при циклическом нагреве и охлаждении структуру аустенит + α -фазы Fe.

5 Наиболее предпочтительно использование в конструкции форсунок впрыскивающих пароохладителей паровых котлов электродных материалов Э-07Х19Н11М3Г2Ф и Э-11Х15Н25М6АГ2, но необходимы дальнейшие исследования материалов форсунок по критерию эрозионной стойкости.

Список литературы

- 1 Протокол осмотра пусковых впрысков ОП блз, нитка Б (12 г), лаборатория технической диагностики «Пермской ГРЭС». 2021. – 14 с.
- 2 **Заключение № 12-04/21** по результатам исследования повреждения впрыскивающих устройств пусковых пароохладителей паропровода «острого» пара энергоблока ст. № 2, Лаборатория технической диагностики «Пермской ГРЭС», 2021. – 14 с.
- 3 **Отчет № 4307-380-2021** по исследованию разрушенных элементов форсунок пусковых пароохладителей котла ТПП-804 ст. 2 филиала «Пермская ГРЭС», Центральная заводская лаборатория ПАО ТКЗ «Красный котельщик», 2021. – 28 с.
- 4 **Израилев, Ю. Л.** Живучесть паропроводов стареющих тепловых электростанций / Ю. Л. Израилев, Ф. А. Хромченко. – Москва : Торус пресс, 2002. – 616 с.
- 5 **Черняк, В. Н.** Повышение надежности впрыскивающих пароохладителей низкого давления котла ТГМП-314. / В. Н. Черняк, Н. А. Зройчиков, Т. М. Макарова // Теплоэнергетика. – 1999. – № 2. – С. 44–47. – ISSN 0040-3636.
- 6 **Авторское свидетельство № 2339873.** Впрыскивающий пароохладитель / А. И. Сивцов // МКИ F22G 5/12. Заявл. 20.04.2008. Оpubл. 27.11.2008. Бюл. № 33. – 6 с.
- 7 Отчет о научно-исследовательской работе «Повышение надежности работы впрыскивающих пароохладителей». – Конструкторское бюро ПАО ТКЗ «Красный котельщик», 2023. – 37 с.
- 8 Электроды /Каталог/ Тип Э-07Х19Н11М3Г2Ф ЭА-400/10Т – Судиславский завод сварочных материалов. – URL: https://www.czcm-weld.ru/catalog/katalog_elektrodov/elektrody_dlya_svarki_vysokolegirovannykh_staley_i_splavov/ea_400_10t/?ysclid=lo8myl1fmw0528504405 (дата обращения: 20.10.2023).
- 9 Электроды /Каталог/ Тип Э-11Х15Н25М6АГ2 ЭА-395/9 – Судиславский завод сварочных материалов. – URL: https://www.czcm-weld.ru/catalog/katalog_elektrodov/elektrody_dlya_svarki_vysokolegirovannykh_staley_i_splavov/ea_395_9/ (дата обращения: 20.10.2023).
- 10 Электроды ЦЛ-25/2 / Каталог – НПК Сварэлектрод <https://swarelectrod.ru/catalog/elektrodyi-czl-252?ysclid=lo8myjaaln575007471> (дата обращения: 20.10.2023).
- 11 Сварочные электроды ЦЛ-25 / Каталог /

References

- 1 Protocol of inspection of starting sprays of live steam, Unit 3, run B (12 g), Permskaya GRES Technical Diagnostics Laboratory, 2021. – 14 p.
- 2 **Conclusion No. 12-04/21** based on the results of a study of damage to the spray devices of the starting attemperators of the steam pipeline of live steam, Power unit No. 2, Permskaya GRES technical diagnostics laboratory, 2021 – 14 p.
- 3 **Report No. 4307-380-2021** on the study of the destroyed elements of the atomizers of the starting attemperators of the ТПП-804 boiler of Station 2 of the Permskaya GRES branch, Central Laboratory of PJSC “Krasny Kotelshchik”, 2021. – 28 p.
- 4 **Izrailev, Y. L.** Survivability of steam pipelines of aging thermal power plants / Y. L. Izrailev, F. A. Khromchenko. – Moscow : Torus press, 2002. – 616 p.
- 5 **Chernyak, V. N.** Improving the reliability of low-pressure spray attemperators of the ТГМП-314 / V. N. Chernyak, N. A. Zroychikov, T. M. Makarova // Teploenergetik. – 1999. – No. 2. – P. 44–47. – ISSN 0040-3636.
- 6 **Copyright certificate No. 2339873.** Spray attemperator / A. I. Sivtsov // МКИ F22G 5/12. Application dd 20.04.2008, Published on 27.11.2008. Bulletin No. 33. – 6 p.
- 7 Report on the research work "Improving the reliability of injecting steam coolers", Design Bureau of PJSC TKZ "Krasny Kotelshchik", 2023, 37 p.
- 8 Electrodes /Catalog/ Type E-07H19N11M3G2F EA-400/10T – Sudislavsky Welding Materials Plant. – URL: https://www.czcm-weld.ru/catalog/katalog_elektrodov/elektrody_dlya_svarki_vysokolegirovannykh_staley_i_splavov/ea_400_10t/?ysclid=lo8myl1fmw0528504405 (date of access: 10/20/2023).
- 9 Electrodes /Catalog/ Type E-11H15N25M6AG2 EA-395/9 – Sudislavsky Welding Materials Plant. – URL: https://www.czcm-weld.ru/catalog/katalog_elektrodov/elektrody_dlya_svarki_vysokolegirovannykh_staley_i_splavov/ea_395_9/ (date of access: 10/20/2023).
- 10 Electrodes CL-25/2 / Catalog-NPK Swarelectrod <https://swarelectrod.ru/catalog/elektrodyi-czl-252?ysclid=lo8myjaaln575007471> (date of access: 10/20/2023).
- 11 Welding electrodes CL – 25 / Catalog /

СпецЭлектрод – СпецЭлектрод – URL:
<https://www.spetsselectrode.ru/electrod/cl25.htm?ysclid=locv2cagsd945030152> (дата обращения: 20.10.2023).

12 Сварочные электроды / Электроды от Электродгруп / Производство МР, УОНИ, ОЗС, АНО / Сварочные электроды ЦЛ-11 тип Э-08Х20Н9Г2Б – ЭЛЕКТРОГРУП– URL:
<http://electrogroup.ru/proizv/176-opizl11/> (дата обращения: 20.10.2023).

13 Электроды ВПИ-1 / Каталог – НПК Сварэлектрод – URL: <https://svar-electrod.ru/catalog/e-09x16n9s5g2m2ft/elektrodyi-vpi-1> (дата обращения: 20.10.2023).

SpecElectrod – SpecElectrod-URL:
<https://www.spetsselectrode.ru/electrod/cl25.htm?ysclid=locv2cagsd945030152> (date of access: 10/20/2023).

12 Welding electrodes / Electrodes from Electrogroup / Production of MR, UONI, OZS, ANO / Welding electrodes CL-11 type E-08H20N9G2B – ELECTROGROUP– URL:
<http://electrogroup.ru/proizv/176-opizl11/> (date of access: 10/20/2023).

13 Electrodes VPI – 1 / Catalog – NPK Svarelectrod-URL: <https://svar-electrod.ru/catalog/e-09x16n9s5g2m2ft/elektrodyi-vpi-1> (date of access: 10/20/2023).

A. Y. Priymak, M. Y. Serbinovsky

SELECTION OF PROMISING MATERIALS FOR CENTRIFUGAL NOZZLES OF INJECTING STEAM COOLERS

Abstract. Based on the results of the analysis of information on the destruction and defects of centrifugal nozzles of injection steam coolers (VPO), it was identified the need for selecting a promising material for their manufacture in order to increase their service life. It was described a fundamental approach to carrying out full-scale testing of samples as close as possible to the operating modes of centrifugal nozzles in injection steam coolers including cyclic heating and cooling. Criteria were determined for selecting a promising material for the manufacture of centrifugal nozzles, namely: the structure of the material and the change its hardness, as well as its tendency to crack.

Keywords: injecting steam cooler, centrifugal nozzle, material, steam boiler, steam temperature control.

For citation: Priymak, A. Y. Selection of promising materials for centrifugal nozzles of injecting steam coolers / A. Yu. Priymak, M. Yu. Serbinovsky // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 1. – P. 240–247. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_240.

Сведения об авторах

Приймак Антон Юрьевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), кафедра «Основы проектирования машин», аспирант,
e-mail: A290488@yandex.ru

Сербиновский Михаил Юрьевич

ПАО ТКЗ «Красный котельщик» конструкторское бюро, главный специалист,
e-mail: serb-m@mail.ru

Information about the authors

Priymak Anton Yurievich

Rostov State Transport University (RSTU), Chair «Machine Design Fundamentals», Postgraduate Student,
e-mail: A290488@yandex.ru

Serbinovsky Mikhail Yurievich

PJSC TKZ «Krasny Kotelshchik», Design Bureau, Chief Specialist,
e-mail: serb-m@mail.ru

И. А. Яицков, П. А. Поляков, Е. С. Федотов, Р. С. Тагиев, Р. Н. Дедусенко

АНАЛИЗ НЕУСТАНОВИВШИХСЯ ПРОЦЕССОВ В ТОРМОЗНОМ УСТРОЙСТВЕ ДИСКОВО-КОЛОДОЧНОГО ТИПА ПРИ ТОРМОЖЕНИИ

Аннотация. Представлена математическая модель неустановившихся процессов торможения на уровне системы «прижимающий элемент – тормозная колодка – тормозной диск». Особенностью данной модели является учет расположения прижимающих элементов, геометрических размеров тормозной колодки и прижимающих элементов на изменения угловых и линейных колебаний тормозной колодки при взаимодействии с рабочей поверхностью тормозного диска. Основными параметрами, оценивающими нестационарный процесс взаимодействия, являются углы тангажа и рыскания разных краев тормозной колодки, что наглядно продемонстрировано на сравнительных диаграммах суммарных колебаний верхнего и правого углов тормозной колодки, их ускорений и инерционной нагрузки при торможении. Анализ диаграммы инерционной нагрузки показывает, что верхний угол больше подвержен отрыву края колодки от рабочей поверхности диска при условии меньшей частоты вынужденных колебаний, тогда как большая частота вынужденных колебаний в нижнем крае колодки не повышает риск отрыва ее от поверхности диска в процессе взаимодействия. В целом математическая модель позволяет анализировать нестационарный процесс взаимодействия с учетом нагружения колодки, расположения и геометрических параметров прижимающего механизма тормозного устройства дисково-колодочного типа.

Ключевые слова: торможение, угловое колебание, угловое ускорение, тангаж, рыскание, инерционная нагрузка, тормозная колодка.

Для цитирования: Анализ неустановившихся процессов в тормозном устройстве дисково-колодочного типа при торможении / И. А. Яицков, П. А. Поляков, Е. С. Федотов [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1. – С. 248–260. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_248.

Введение

В работах [1–3] приводятся исследования, связанные колебаниями кузовов локомотивов, пассажирских вагонов и автомобилей. Результаты моделирования показывают затухающий тип собственных колебаний, но при этом необходимо учитывать и вынужденные колебания, которые возникают от воздействия от поверхности рельсов или дороги. Наиболее интересен с точки зрения анализа колебательного процесса в транспортном средстве неустановившийся процесс движения (при разгоне или торможении). Торможение – сложный технологический процесс, при котором кинетическая энергия транспортного средства переходит в тепловую. В результате на небольшом по габаритам силовом устройстве, в сравнении с транспортным средством, аккумулируется значительная энергия. Как показывают исследования [4, 5], связанные с визгом тормозных устройств, кинетическая энергия трансформируется не только в тепловую, но и в энергию пластического деформирования элементов трения устройства, что в дальнейшем приводит к взаимодействию ограниченных площадок трения между собой.

Но для оценки ограниченности трибомеханического контакта фрикционного узла необходимо разработать наиболее полноценную математическую модель колебательного процесса силового устройства дисково-колодочного типа. Это необходимо для анализа вклада каждого элемента силового устройства в процесс взаимодействия пар трения и выработки шагов по дальнейшему совершенствованию конструкции на основе принципов повышения эффективности и обеспечения стабильности выходных эксплуатационных параметров.

Ввиду этого необходимо задаться целью моделирования – разработкой уравнений линейных и угловых перемещений тормозной колодки как основного элемента, вносящего весомый вклад в неустановившийся процесс торможения.

Основная часть

Рассмотрим процесс торможения на примере системы «прижимающий элемент – тормозная колодка – тормозной диск». В качестве объекта исследований исследуем математическую модель тормозного устройства дисково-колодочного типа с n -м количеством прижимающих элементов (рис. 1).

Взаимодействие между отдельными элементами прижимающего механизма тормозного устройства можно представить в виде упругих связей и демпфирующих элементов. Контакт i -го прижимающего элемента с корпусом суппорта обеспечивается через резинометаллический сальник, который обеспечивает упругую связь с коэффициентом жесткости c_{cnij} и диссипацию возмущающих воздействий с коэффициентом демпфирования для i -го прижимающего элемента b_{cnij} . Концы прижимающих элементов вне процесса торможения взаимодействуют с нерабочей поверхностью тормозной колодки, связь которых также можно разделить на упруговязкие взаимодействия. Следовательно, взаимосвязь между i -м прижимающим элементом и j -й тормозной колодкой можно представить в виде упругой связи с жесткостью c_{nij} и диссипацией возмущающих воздействий с коэффициентом демпфирования b_{nij} .

Для предотвращения неконтролируемого взаимодействия различных рабочих поверхностей колодки и тормозного диска в процессе вращения тормозная колодка фиксируется в пазах суппорта тормоза, что предполагает наличие связей между суппортом и колодкой. Связь между колодкой и суппортом обозначим с помощью жесткости c_{cij} и коэффициента диссипации b_{cij} . Для учета инерционной составляющей вклада в колебательный процесс необходимо задаться массами и моментами инерции элементов прижимающего механизма: m_{nij} , J_{nij} , m_{kj} , J_{kj} – массы момент инерции i -го поршня и j -й колодки.

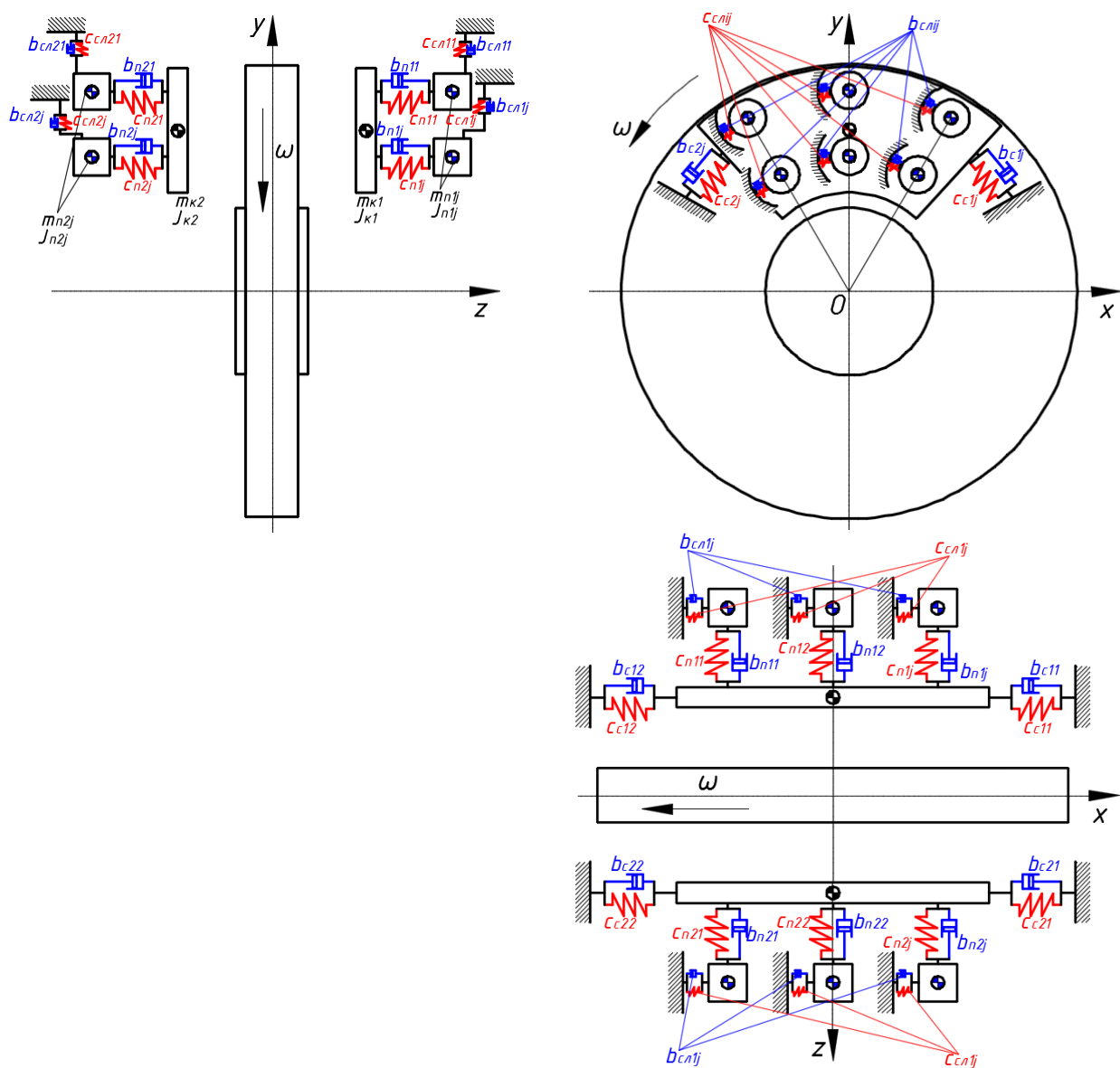


Рис. 1. Динамическая модель тормозного устройства дисково-колодочного типа с n - количеством прижимающих элементов перед торможением

После начала торможения в математической модели тормозного устройства дисково-колодочного типа появляются линейные и угловые перемещения тормозных колодок и линейные перемещения

прижимающих элементов относительно осей тормозного диска (рис. 2). Для оценки динамики взаимодействия необходимо рассмотреть действия сил и моментов для двух тормозных колодок силового устройства, но так как этот процесс симметричный относительно оси вращения тормозного диска, составим систему уравнений для взаимодействующих рабочих поверхностей только для одной стороны. Линейные перемещения для правой тормозной колодки обозначены на расчетной схеме x_{k1} , y_{k1} , z_{k1} , тогда как угловые перемещения обозначают углы тангажа φ_{TK1} , крена φ_{KK1} и рыскания φ_{PK1} . Обозначенные углы могут появляться из-за неравномерности распределения прижимающей нагрузки по площади колодки и неидеальной плоскостности рабочей поверхности тормозного диска. В результате взаимодействия тормозных колодок и поверхностей диска возникают упругие связи с жесткостью c_{kj} и диссипацией возмущающих воздействий с коэффициентом демпфирования b_{kj} .

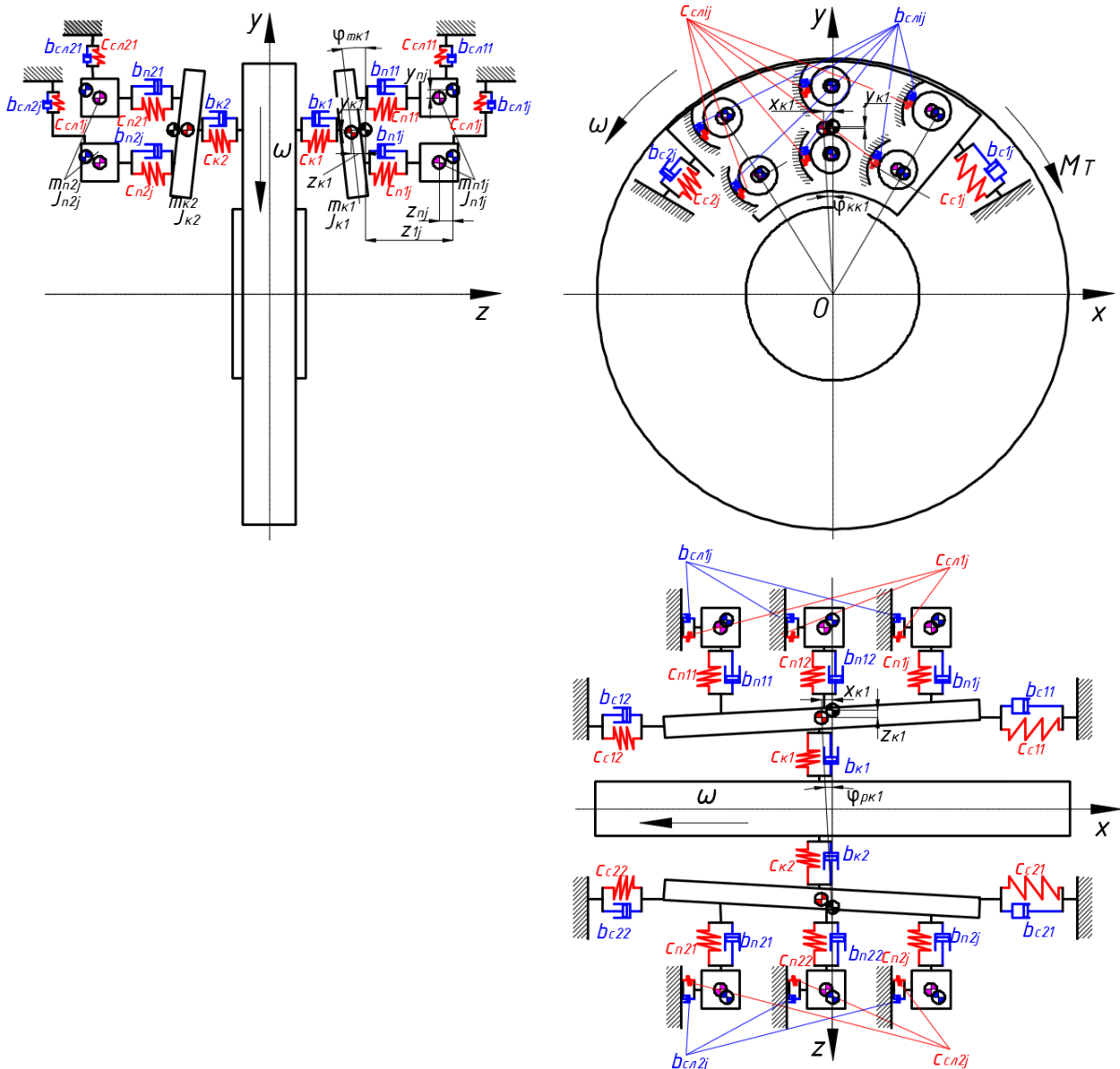


Рис. 2. Динамическая модель тормозного устройства дисково-колодочного типа с n -м количеством прижимающих элементов в процессе торможения

Для составления системы уравнений сил и моментов колебательного процесса необходимо рассмотреть расчетные схемы тормозного устройства дисково-колодочного типа с векторами сил, действующими на правую тормозную колодку (рис. 3).

Помимо сил инерции $\left(\sum_{i=1}^n m_{ni1} + m_{k1}\right)\ddot{x}$, $\left(\sum_{i=1}^n m_{ni1} + m_{k1}\right)(\ddot{y} \pm g)$, $\left(\sum_{i=1}^n m_{ni1} + m_{k1}\right)\ddot{z}$, $\left(\sum_{i=1}^n m_{ni1} + m_{k1}\right)\ddot{\varphi}_{TK1}$, $\left(\sum_{i=1}^n m_{ni1} + m_{k1}\right)\ddot{\varphi}_{KK1}$, $\left(\sum_{i=1}^n m_{ni1} + m_{k1}\right)\ddot{\varphi}_{PK1}$, действующих в различных направлениях,

необходимо указать реакции между взаимодействующими элементами S_{cni1} , S_{ci1} , N_1 . Помимо реакций в местах контакта возникают силы сопротивления перемещению тормозной колодки fS_{ci1} , прижимающих элементов fS_{cni1} и сила трения в паре «тормозная колодка – тормозной диск» fN_1 .

Для обозначения перемещений прижимающих элементов относительно смещенного положения центра давления системы «прижимающий элемент – тормозная колодка – тормозной диск» [6] воспользуемся полярной системой координат $[r; \Theta]$ относительно точки O (оси вращения тормозного диска). Для указания расстояния в направлении оси Oz необходимо ввести следующие обозначения: расстояние от центра масс j -й колодки до i -го прижимающего элемента (z_{ij}), смещение положения центра масс i -го прижимающего элемента в направлении рабочей поверхности диска (z_i), смещение упора колодки относительно её центра масс (z_c).

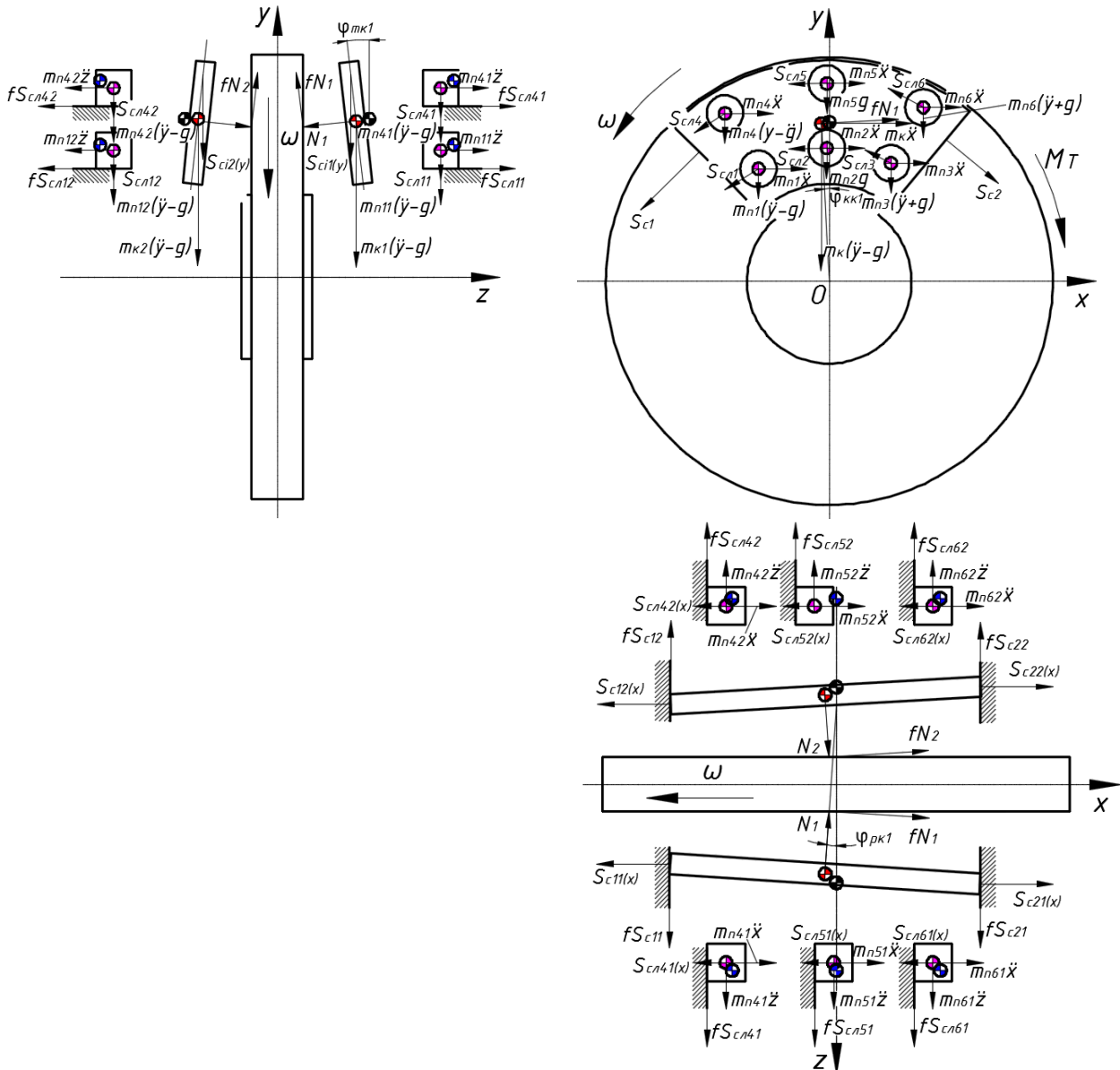


Рис. 3. Схемы действия сил и моментов, действующих на прижимающий механизм тормозного устройства дисково-колодочного типа

При наклоне колодки к рабочей поверхности диска на углы $\varphi_{\text{тк1}}$ и $\varphi_{\text{рк1}}$ возникает смещения приложения силы трения относительно центра масс тормозной колодки на следующие координаты $[x_y; y_y]$. Для обозначения вынужденного колебательного процесса введем понятия векторов скоростей (\dot{Z}_d, \dot{Z}_c) и возмущений (Z_d, Z_c) от рабочей поверхности тормозного диска и проушин суппорта тормозного устройства.

Для математической модели необходимо сформулировать следующие допущения:

– диаметры прижимающих элементов (d_n) будут равны между собой, несмотря на различие в деформации уплотняющих элементов;

– центр масс тормозной колодки совмещены с положение центром давления системы «прижимающий элемент – тормозная колодка – тормозной диск»;

– расстояние от центра масс колодки до точки приложения силы трения системы «прижимающий элемент – тормозная колодка – тормозной диск» будет равно половине толщине тормозной колодки без учета неидеальной плоскости тормозного диска ($\delta_k/2$).

Система уравнений сил и моментов, действующих на правую колодку тормоза, включает три линейные и три угловые координаты [3]. Для аналитического решения системы уравнений сил и моментов необходимо записать систему в виде уравнения в векторно-матричной форме [7]. Для определения инерционных, диссипативных и жесткостных характеристик правой колодки и скоростей и возмущений для тормозных дисков запишем коэффициенты матриц уравнения в следующем виде:

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 & 0 & A_{15} & A_{16} \\ 0 & A_{22} & 0 & A_{24} & 0 & A_{26} \\ 0 & 0 & A_{33} & A_{34} & A_{35} & 0 \\ 0 & A_{42} & A_{43} & A_{44} & 0 & 0 \\ A_{51} & 0 & A_{53} & 0 & A_{55} & 0 \\ A_{61} & A_{62} & 0 & 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix}, \quad (1) \quad B = \begin{bmatrix} B_{11} & 0 & 0 & 0 & B_{15} & B_{16} \\ 0 & B_{22} & 0 & B_{24} & 0 & B_{26} \\ 0 & 0 & B_{33} & B_{34} & B_{35} & 0 \\ 0 & B_{42} & B_{43} & B_{44} & 0 & 0 \\ B_{51} & 0 & B_{53} & 0 & B_{55} & 0 \\ B_{61} & B_{62} & 0 & 0 & 0 & B_{66} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & 0 & 0 & 0 & C_{15} & C_{16} \\ 0 & C_{22} & 0 & C_{24} & 0 & C_{26} \\ 0 & 0 & C_{33} & C_{34} & C_{35} & 0 \\ 0 & C_{42} & C_{43} & C_{44} & 0 & 0 \\ C_{51} & 0 & C_{53} & 0 & C_{55} & 0 \\ C_{61} & C_{62} & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$D = \begin{bmatrix} D_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & D_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix}, \quad (4) \quad E = \begin{bmatrix} E_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & E_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & E_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & E_{66} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Запишем систему уравнений колебательной системы, совершающей вертикальные, продольные, поперечные и угловые колебания по аналогии с системой уравнений [8], но с учетом возмущающих моментов от рабочих поверхностей тормозного диска:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{np1} \frac{d^2 x}{d\tau^2} + c_{np1} x + b_{np1} \frac{dx}{d\tau} = M_{bj}, \quad j = 1, 2 \dots n; \\ m_{np2} \frac{d^2 y}{d\tau^2} + c_{np2} y + b_{np2} \frac{dy}{d\tau} = M_{bj}, \quad j = 1, 2 \dots n; \\ m_{np3} \frac{d^2 z}{d\tau^2} + c_{np3} z + b_{np3} \frac{dz}{d\tau} = M_{bj}, \quad j = 1, 2 \dots n; \\ J_{np1} \frac{d^2 \varphi_r}{d\tau^2} + c_{np4} \varphi_r + b_{np4} \frac{d\varphi_r}{d\tau} = M_{bj}, \quad j = 1, 2 \dots n; \\ J_{np2} \frac{d^2 \varphi_k}{d\tau^2} + c_{np5} \varphi_k + b_{np5} \frac{d\varphi_k}{d\tau} = M_{bj}, \quad j = 1, 2 \dots n; \\ J_{np3} \frac{d^2 \varphi_p}{d\tau^2} + c_{np6} \varphi_p + b_{np6} \frac{d\varphi_p}{d\tau} = M_{bj}, \quad j = 1, 2 \dots n; \end{array} \right. \quad (6)$$

где m_{pri} , J_{pri} – приведенные инерционные коэффициенты действующих силовых факторов в i -м направлении, соответственно кг и кг м²; b_{pri} – приведенные диссипативные коэффициенты действующих силовых факторов в i -м направлении, Нс/м; c_{pri} – приведенные жесткостные коэффициенты действующих силовых факторов в i -м направлении, Н/м; τ – время торможения, с; M_{bj} – возмущающие моменты j -й тормозной колодки.

В связи с увеличением исследуемых координат числа возмущений и их скоростей колебаний общее уравнение координат колебательной системы [3] будет выглядеть в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} x = e^{-\frac{b_{np1}\tau}{m_{np1}}} \left(\frac{\left(\frac{b_{np1}}{m_{np1}}\right) x_0}{\sqrt{\left(\frac{c_{np1}}{m_{np1}}\right)^2 - \left(\frac{b_{np1}}{m_{np1}}\right)^2}} \sin \left[\sqrt{\left(\frac{c_{np1}}{m_{np1}}\right)^2 - \left(\frac{b_{np1}}{m_{np1}}\right)^2} \right] \tau + \right. \\ \left. + x_0 \cos \left[\sqrt{\left(\frac{c_{np1}}{m_{np1}}\right)^2 - \left(\frac{b_{np1}}{m_{np1}}\right)^2} \right] \tau \right) + k_{c11} \sin(\omega_r \tau - \psi_{z11}), \\ y = e^{-\frac{b_{np2}\tau}{m_{np2}}} \left(\frac{\left(\frac{b_{np2}}{m_{np2}}\right) y_0}{\sqrt{\left(\frac{c_{np2}}{m_{np2}}\right)^2 - \left(\frac{b_{np2}}{m_{np2}}\right)^2}} \sin \left[\sqrt{\left(\frac{c_{np2}}{m_{np2}}\right)^2 - \left(\frac{b_{np2}}{m_{np2}}\right)^2} \right] \tau + \right. \\ \left. + y_0 \cos \left[\sqrt{\left(\frac{c_{np2}}{m_{np2}}\right)^2 - \left(\frac{b_{np2}}{m_{np2}}\right)^2} \right] \tau \right) + k_{c21} \sin(\omega_r \tau - \psi_{z21}), \\ z = e^{-\frac{b_{np3}\tau}{m_{np3}}} \left(\frac{\left(\frac{b_{np3}}{m_{np3}}\right) z_0}{\sqrt{\left(\frac{c_{np3}}{m_{np3}}\right)^2 - \left(\frac{b_{np3}}{m_{np3}}\right)^2}} \sin \left[\sqrt{\left(\frac{c_{np3}}{m_{np3}}\right)^2 - \left(\frac{b_{np3}}{m_{np3}}\right)^2} \right] \tau + \right. \\ \left. + z_0 \cos \left[\sqrt{\left(\frac{c_{np3}}{m_{np3}}\right)^2 - \left(\frac{b_{np3}}{m_{np3}}\right)^2} \right] \tau \right) + k_{c31} \sin(\omega_r \tau - \psi_{z31}), \\ \varphi_{rk1} = e^{-\frac{b_{np4}\tau}{J_{np1}}} \left(\frac{\left(\frac{b_{np4}}{J_{np1}}\right) \varphi_{r0}}{\sqrt{\left(\frac{c_{np4}}{J_{np1}}\right)^2 - \left(\frac{b_{np4}}{J_{np1}}\right)^2}} \sin \left[\sqrt{\left(\frac{c_{np4}}{J_{np1}}\right)^2 - \left(\frac{b_{np4}}{J_{np1}}\right)^2} \right] \tau + \right. \\ \left. + \varphi_{r0} \cos \left[\sqrt{\left(\frac{c_{np4}}{J_{np1}}\right)^2 - \left(\frac{b_{np4}}{J_{np1}}\right)^2} \right] \tau \right) + k_{c41} \sin(\omega_r \tau - \psi_{z41}), \\ \varphi_{rk2} = e^{-\frac{b_{np5}\tau}{J_{np2}}} \left(\frac{\left(\frac{b_{np5}}{J_{np2}}\right) \varphi_{k0}}{\sqrt{\left(\frac{c_{np5}}{J_{np2}}\right)^2 - \left(\frac{b_{np5}}{J_{np2}}\right)^2}} \sin \left[\sqrt{\left(\frac{c_{np5}}{J_{np2}}\right)^2 - \left(\frac{b_{np5}}{J_{np2}}\right)^2} \right] \tau + \right. \\ \left. + \varphi_{k0} \cos \left[\sqrt{\left(\frac{c_{np5}}{J_{np2}}\right)^2 - \left(\frac{b_{np5}}{J_{np2}}\right)^2} \right] \tau \right) + k_{c51} \sin(\omega_r \tau - \psi_{z51}), \\ \dots \end{array} \right.$$

$$\left\{ \dots \right. \left. \Phi_{\text{вк}} = e^{-\frac{b_{\text{np6}} \tau}{J_{\text{np3}}}} \left(\frac{\left(\frac{b_{\text{np6}}}{J_{\text{np3}}} \right) \Phi_{\text{p0}}}{\sqrt{\left(\frac{c_{\text{np6}}}{J_{\text{np3}}} \right)^2 - \left(\frac{b_{\text{np6}}}{J_{\text{np3}}} \right)^2}} \sin \left[\sqrt{\left(\frac{c_{\text{np6}}}{J_{\text{np3}}} \right)^2 - \left(\frac{b_{\text{np6}}}{J_{\text{np3}}} \right)^2} \right] \tau + \right. \right. \\ \left. \left. + \Phi_{\text{p0}} \cos \left[\sqrt{\left(\frac{c_{\text{np6}}}{J_{\text{np3}}} \right)^2 - \left(\frac{b_{\text{np6}}}{J_{\text{np3}}} \right)^2} \right] \tau \right) + k_{\text{с1}} \sin(\omega_{\text{д}} \tau - \psi_{\text{с1}}) \right. \quad (7)$$

где k_{ij} – амплитуда вынужденных колебаний в зависимости от i -го направления действия колебаний и j -й тормозной колодки; $\omega_{\text{д}}$ – частоты вынужденных колебаний тормозного диска, Гц; ψ_{ij} – сдвиг фаз между амплитудой возбуждающего момента и амплитудой вызываемой этим моментом колебаний в зависимости от i -го направления действия колебаний и j -й тормозной колодки, град.

Величина амплитуды k_{ij} и сдвига фаз ψ_{bij} определяется из формул:

$$k_{ij} = \frac{x_0(y_0, z_0, \Phi_{\text{тк0}}, \Phi_{\text{рк0}}, \Phi_{\text{кк0}})}{m_{\text{нpi}}(J_{\text{нpi}})}, \quad (8)$$

$$tg \psi_{bij} = \frac{2\omega_{bi} \frac{b_{ij}}{m_{\text{нpi}}(J_{\text{нpi}})}}{\sqrt{\left(\frac{c_{ij}}{m_{\text{нpi}}(J_{\text{нpi}})} \right)^2 - \left(\frac{b_{ij}}{m_{\text{нpi}}(J_{\text{нpi}})} \right)^2}}, \quad (9)$$

$$k_{ij} = \frac{x_0(y_0, z_0, \Phi_{\text{тк0}}, \Phi_{\text{рк0}}, \Phi_{\text{кк0}})}{\sqrt{\left[\left(\frac{c_{ij}}{m_{\text{нpi}}(J_{\text{нpi}})} \right)^2 - \left(\frac{b_{ij}}{m_{\text{нpi}}(J_{\text{нpi}})} \right)^2 \right]^2 + 4\omega_{bi}^2 \left(\frac{b_{ij}}{m_{\text{нpi}}(J_{\text{нpi}})} \right)^2}}$$

Определим величины приведенных коэффициентов с помощью уравнивания матриц инерционных, диссипативных и жесткостных коэффициентов, векторов скоростей возмущений и векторов возмущений:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 & 0 & A_{15} & A_{16} \\ 0 & A_{22} & 0 & A_{24} & 0 & A_{26} \\ 0 & 0 & A_{33} & A_{34} & A_{35} & 0 \\ 0 & A_{42} & A_{43} & A_{44} & 0 & 0 \\ A_{51} & 0 & A_{53} & 0 & A_{55} & 0 \\ A_{61} & A_{62} & 0 & 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{\text{нp1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{\text{нp2}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{\text{нp3}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_{\text{нp1}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_{\text{нp2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{\text{нp3}} \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} B_{11} & 0 & 0 & 0 & B_{15} & B_{16} \\ 0 & B_{22} & 0 & B_{24} & 0 & B_{26} \\ 0 & 0 & B_{33} & B_{34} & B_{35} & 0 \\ 0 & B_{42} & B_{43} & B_{44} & 0 & 0 \\ B_{51} & 0 & B_{53} & 0 & B_{55} & 0 \\ B_{61} & B_{62} & 0 & 0 & 0 & B_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{\text{нp1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_{\text{нp2}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_{\text{нp3}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_{\text{нp4}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_{\text{нp5}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{\text{нp6}} \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} C_{11} & 0 & 0 & 0 & C_{15} & C_{16} \\ 0 & C_{22} & 0 & C_{24} & 0 & C_{26} \\ 0 & 0 & C_{33} & C_{34} & C_{35} & 0 \\ 0 & C_{42} & C_{43} & C_{44} & 0 & 0 \\ C_{51} & 0 & C_{53} & 0 & C_{55} & 0 \\ C_{61} & C_{62} & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{\text{нp1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{\text{нp2}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{\text{нp3}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{\text{нp4}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{\text{нp5}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{\text{нp6}} \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} D_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & D_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{66} \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} E_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & E_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & E_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & E_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix}.$$

Для анализа колебательного процесса по габаритным размерам тормозной колодки необходимы четверть массы тормозной колодки, приходящейся на каждый угол колодки в стационарном состоянии и плечо от края до центра масс, и уравнение ускорений координат изменений углов тангажа и рыскания:

$$N_i = m_{киj} a_{пij} \sqrt{\ddot{\varphi}_{ткi}^2(\tau_r) + \ddot{\varphi}_{рki}^2(\tau_r)}, \quad (11)$$

где M_i – масса четверти массы i -й тормозной колодки, приходящееся на один (j -й) из четырех углов колодки в стационарном состоянии, кг; $a_{пij}$ – плечо от центра масс до одного (j -го) из четырех углов i -й тормозной колодки, м.

Масса распределяется согласно схеме, представленной на рис. 4.

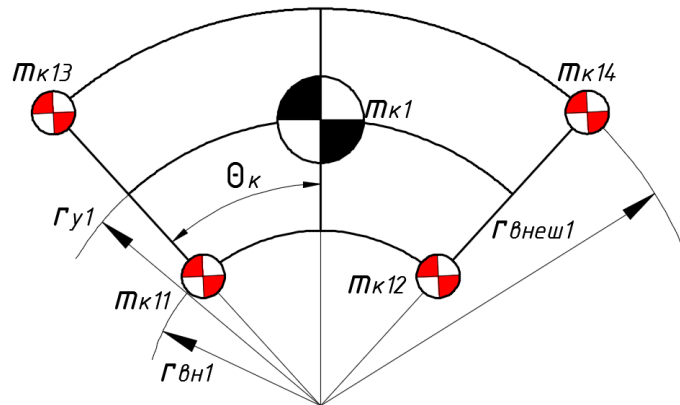


Рис. 4. Схемы распределения массы рассматриваемой тормозной колодки для оценки неустойчившихся процессов взаимодействия

Для определения ускорений угловых координат ($\ddot{\varphi}_{ткi}$) и ($\ddot{\varphi}_{рki}$) необходимо продифференцировать дважды:

$$\begin{aligned}
& \left. \begin{aligned}
& \left. \begin{aligned}
& \varphi_{\text{тк}0} \left(\frac{b_{\text{нп}4}}{J_{\text{нп}1}} \right) \left[\frac{\left(\frac{b_{\text{нп}4}}{J_{\text{нп}1}} \right)^2}{\sqrt{\left(\frac{c_{\text{нп}4}}{J_{\text{нп}1}} \right)^2 - \left(\frac{b_{\text{нп}4}}{J_{\text{нп}1}} \right)^2}} - 3 \sqrt{\left(\frac{c_{\text{нп}4}}{J_{\text{нп}1}} \right)^2 - \left(\frac{b_{\text{нп}4}}{J_{\text{нп}1}} \right)^2} \right] \times \\
& \times \sin \left[\sqrt{\left(\frac{c_{\text{нп}4}}{J_{\text{нп}1}} \right)^2 - \left(\frac{b_{\text{нп}4}}{J_{\text{нп}1}} \right)^2} \right] \tau_{\text{т}} - \\
& - \varphi_{\text{тк}0} \left[\left(\frac{b_{\text{нп}4}}{J_{\text{нп}1}} \right)^2 + \sqrt{\left(\frac{c_{\text{нп}4}}{J_{\text{нп}1}} \right)^2 - \left(\frac{b_{\text{нп}4}}{J_{\text{нп}1}} \right)^2} \right] \cos \left[\sqrt{\left(\frac{c_{\text{нп}4}}{J_{\text{нп}1}} \right)^2 - \left(\frac{b_{\text{нп}4}}{J_{\text{нп}1}} \right)^2} \right] \tau_{\text{т}}
\end{aligned} \right. + \\
& + k_{41} \omega_{\text{д}}^2 \sin(\omega_{\text{д}} \tau - \psi_{\text{в}41}), \\
& \left. \begin{aligned}
& \left. \begin{aligned}
& \varphi_{\text{рк}0} \left(\frac{b_{\text{нп}5}}{J_{\text{нп}2}} \right) \left[\frac{\left(\frac{b_{\text{нп}5}}{J_{\text{нп}2}} \right)^2}{\sqrt{\left(\frac{c_{\text{нп}5}}{J_{\text{нп}2}} \right)^2 - \left(\frac{b_{\text{нп}5}}{J_{\text{нп}2}} \right)^2}} - 3 \sqrt{\left(\frac{c_{\text{нп}5}}{J_{\text{нп}2}} \right)^2 - \left(\frac{b_{\text{нп}5}}{J_{\text{нп}2}} \right)^2} \right] \times \\
& \times \sin \left[\sqrt{\left(\frac{c_{\text{нп}5}}{J_{\text{нп}2}} \right)^2 - \left(\frac{b_{\text{нп}5}}{J_{\text{нп}2}} \right)^2} \right] \tau_{\text{т}} - \\
& - \varphi_{\text{рк}0} \left[\left(\frac{b_{\text{нп}5}}{J_{\text{нп}2}} \right)^2 + \sqrt{\left(\frac{c_{\text{нп}5}}{J_{\text{нп}2}} \right)^2 - \left(\frac{b_{\text{нп}5}}{J_{\text{нп}2}} \right)^2} \right] \cos \left[\sqrt{\left(\frac{c_{\text{нп}5}}{J_{\text{нп}2}} \right)^2 - \left(\frac{b_{\text{нп}5}}{J_{\text{нп}2}} \right)^2} \right] \tau_{\text{т}}
\end{aligned} \right. + \\
& + k_{51} \omega_{\text{д}}^2 \sin(\omega_{\text{д}} \tau - \psi_{\text{в}51}).
\end{aligned} \right\} \quad (12)
\end{aligned}$$

Для оценки распределенной инерционной массы тормозной колодки произведем расчет изменения угловых колебаний тангажа и рыскания и угловых ускорений колодки и инерционной массы в зависимости от времени взаимодействия ($\tau_{\text{т}} = 22,5$ с). Снижение частот диска в направлении действия колебаний тангажа происходит с 1,2 Гц до полной остановки, тогда как для колебаний угла рыскания верхнего правого угла тормозной колодки частота колебаний снижается с 3,9 Гц до полной остановки, а для колебаний угла рыскания нижнего правого угла колодки снижение достигает с 4,8 Гц до полной остановки. Исходные данные приняты на основе данных, опубликованных в статье [5]. В результате расчетов приведенных коэффициентов получены следующие значения: $J_{\text{нп}4} = 53,1 \text{ кг м}^2$; $b_{\text{нп}4} = 17,9 \text{ Нс/м}$; $c_{\text{нп}4} = 23,2 \text{ Н/м}$; $J_{\text{нп}5} = 84,8 \text{ кг м}^2$; $b_{\text{нп}5} = 25,1 \text{ Нс/м}$; $c_{\text{нп}5} = 84,5 \text{ Н/м}$; $b_{41} = 2,8 \text{ Нс/м}$; $c_{41} = 17,2 \text{ Н/м}$; для верхнего правого угла тормозной колодки $b_{51} = 2,4 \text{ Нс/м}$; $c_{51} = 18,1 \text{ Н/м}$; для верхнего правого угла тормозной колодки $b_{51} = 5,8 \text{ Нс/м}$; $c_{51} = 42,7 \text{ Н/м}$. На рис. 5 и 6 представлены изменения угловых колебаний тангажа и рыскания правых верхнего и нижнего углов правой тормозной колодки, а также угловых ускорений при торможении.

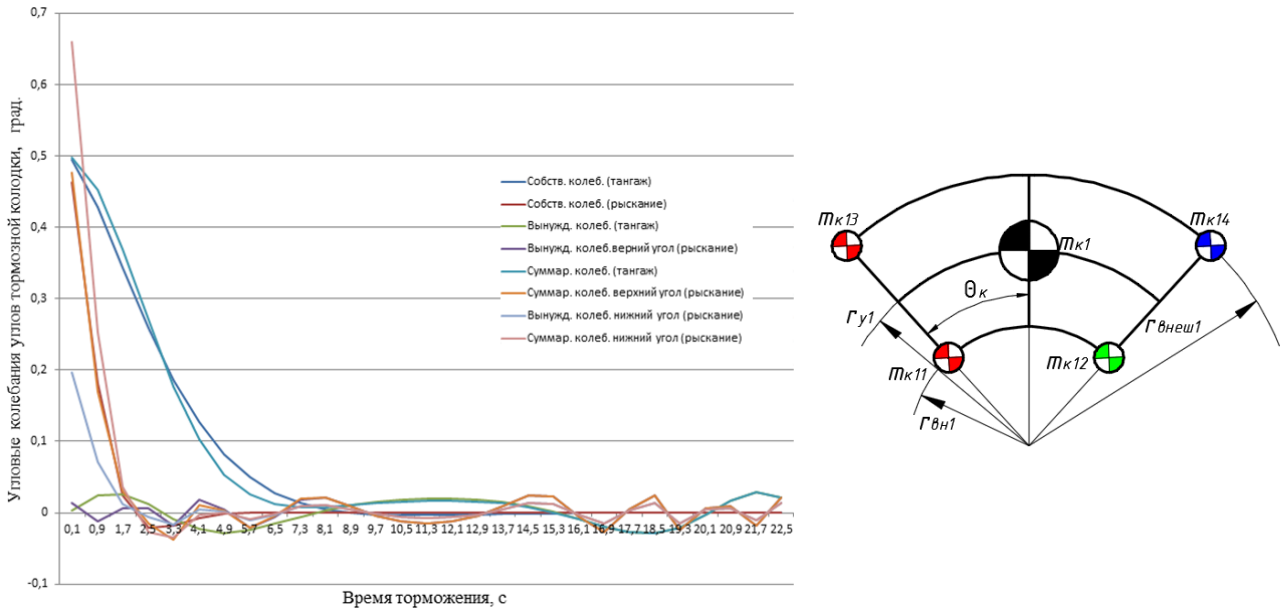


Рис. 5. Изменения угловых колебаний тангажа и рыскания правых верхнего (синяя заливка) и нижнего (зеленая заливка) углов правой тормозной колодки при торможении

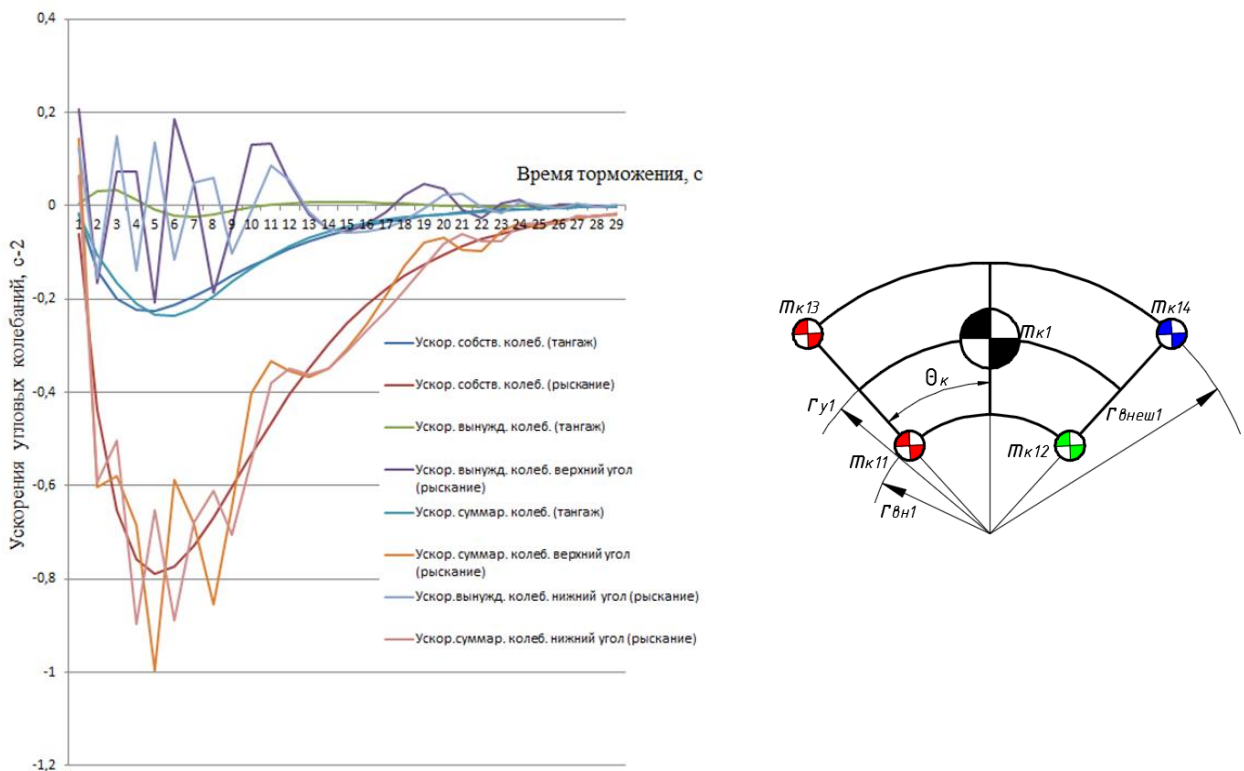


Рис. 6. Изменения угловых ускорений колебаний тангажа и рыскания правых верхнего (синяя заливка) и нижнего (зеленая заливка) углов правой тормозной колодки при торможении

Используя зависимость (11) и изменения кривых $\ddot{\phi}_{tk1} = f(\tau_T)$ и $\ddot{\phi}_{pk1} = f(\tau_T)$, была получена зависимость инерционной нагрузки на правый верхний угол правой тормозной колодки, представленная на рис. 7.

Согласно разработанной математической модели можно определить инерционную нагрузку различных углов тормозной колодки при взаимодействии с рабочей поверхностью тормозного диска, что

позволяет в дальнейшем разработать теоретическую базу управления процессом торможения путем подбора материалов тормозной колодки и фрикционной накладки и геометрии расположения прижимающих элементов с минимизацией отскока колодки от поверхности взаимодействия диска.

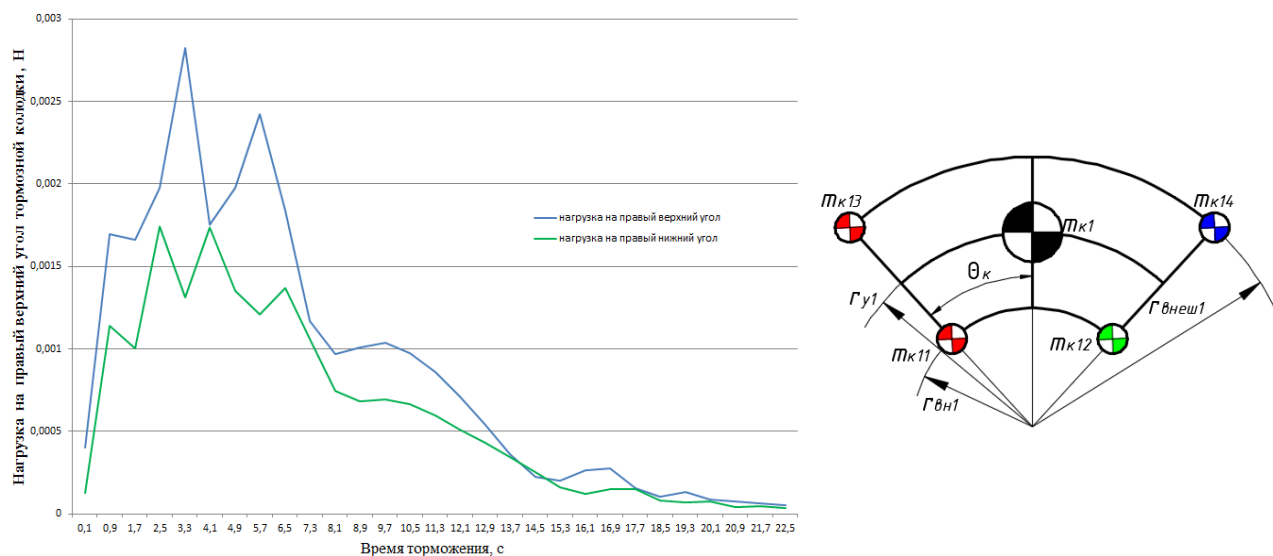


Рис. 7. Изменение инерционной нагрузки на правые верхний (синяя заливка) и нижний (зеленая заливка) углы правой тормозной колодки при торможении

Заключение

Разработана математическая модель неустановившихся процессов торможения на уровне системы «прижимающий элемент – тормозная колодка – тормозной диск. Особенностью данной модели является учет расположения прижимающих элементов, геометрических размеров тормозной колодки и прижимающих элементов на изменения угловых и линейных колебаний тормозной колодки при взаимодействии с рабочей поверхностью тормозного диска. Основными параметрами, оценивающими нестационарный процесс взаимодействия, являются углы тангажа и рыскания разных краев тормозной колодки, что наглядно продемонстрировано на сравнительных диаграммах суммарных колебаний верхнего и правого углов тормозной колодки, их ускорений и инерционной нагрузки при торможении. Анализ диаграммы инерционной нагрузки показывает, что верхний угол больше подвержен отрыву края колодки от рабочей поверхности диска, при условии меньшей частоты вынужденных колебаний. Тогда как большая частота вынужденных колебаний в нижнем крае колодки не повышает риск отрыва ее от поверхности диска в процессе взаимодействия. В целом математическая модель позволяет анализировать нестационарный процесс взаимодействия с учетом нагружения колодки, расположения и геометрических параметров прижимающего механизма тормозного устройства дисково-колодочного типа.

Список литературы

- 1 Скачков, А. Н. Обоснование направлений расчетно-экспериментальных работ по внедрению метода управления параметрами изгибных колебаний кузовов пассажирских вагонов / А. Н. Скачков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 4 (88). – С. 217–226. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_4_217.
- 2 Волков, И. В. К расчету изгибных колебаний кузова трехтележного рельсового экипажа / И. В. Волков, Ю. П. Булавин, П. Ю. Коновалов // Тенденции развития науки и образования. – 2020. – № 64–2. – С. 67–70. – DOI 10.18411/lj-08-2020-50.

References

- 1 Skachkov, A. N. Substantiation of the directions of computational and experimental work on the introduction of a method for controlling the parameters of bending vibrations of passenger car bodies / A. N. Skachkov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2022. – No. 4 (88). – P. 217–226. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_4_217.
- 2 Volkov, I. V. To the calculation of bending vibrations of the body of a three-wheeled rail carriage / I. V. Volkov, Yu. P. Bulavin, P. Yu. Konovalov // Trends in the development of science and education. – 2020. – No. 64–2. – P. 67–70. – DOI 10.18411/lj-08-2020-50.

3 **Яицков, И. А.** Продольная динамика транспортного средства при торможении / И. А. Яицков, П. А. Поляков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 10. – С. 410–419. – DOI 10.24412/2071-6168-2022-10-410-420.

4 **Kulkarni, A.** Impact of Design Factors of Disc Brake Rotor on Braking Performance / A. Kulkarni, R. Mahale // International Journal of Engineering and Technical Research. 2020. – Vol. 9 (6). – P. 1160–1167. – DOI 10.17577/IJERTV9IS060817.

5 **Fritz, G. J.-J.** Effects of damping on brake squeal coalescence patterns—application on a finite element model / G. J.-J. Fritz, J.-M. Sinou, L. J. Duffal // Mechanics Research Communications. – 2007. – Vol. 34. – No. 2. – P. 181–190.

6 **Поляков, П. А.** Определение положения центра давления в системе «прижимающий элемент – тормозная колодка – тормозной диск» / П. А. Поляков // Транспортное, горное и строительное машиностроение : наука и производство. – 2022. – № 16. – С. 62–69. – DOI 10.26160/2658-3305-2022-16-62-69.

7 **Поляков, П. А.** Влияние конструкции прижимающих механизмов тормоза дисково-колодочного типа на колебания, возникающее в контакте фрикционного узла / П. А. Поляков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 5. – С. 408–420. – DOI 10.24412/2071-6168-2022-5-408-420.

8 **Поляков, П. А.** Продольная динамика автопоездов при торможении / П. А. Поляков // Транспортное, горное и строительное машиностроение : наука и производство. – 2022. – № 17–1. – С. 65–74. – DOI 10.26160/2658-3305-2022-17-65-74.

3 **Yaitskov, I. A.** Longitudinal dynamics of a vehicle under braking / I. A. Yaitskov, P. A. Polyakov // Izvestiya Tula State University. Technical sciences. – 2022. – No. 10. – P. 410–419. – DOI 10.24412/2071-6168-2022-10-410-420.

4 **Kulkarni, A.** Impact of Design Factors of Disc Brake Rotor on Braking Performance / A. Kulkarni, R. Mahale // International Journal of Engineering and Technical Research. 2020. – Vol. 9 (6). – P. 1160–1167. – DOI 10.17577/IJERTV9IS060817.

5 **Fritz, G. J.-J.** Effects of damping on brake squeal coalescence patterns—application on a finite element model / G. J.-J. Fritz, J.-M. Sinou, L. J. Duffal // Mechanics Research Communications. – 2007. – Vol. 34. – No. 2. – P. 181–190.

6 **Polyakov, P. A.** Determination of the position of the pressure center in the system "clamping element – brake pad – brake disc" / P. A. Polyakov // Transport, mining and construction engineering : science and production. – 2022. – No. 16. – P. 62–69. – DOI 10.26160/2658-3305-2022-16-62-69.

7 **Polyakov, P. A.** The influence of the design of the clamping mechanisms of the disc-block type brake on vibrations arising in contact with the friction unit / P. A. Polyakov // Izvestiya Tula State University. Technical sciences. – 2022. – No. 5. – P. 408–420. – DOI 10.24412/2071-6168-2022-5-408-420.

8 **Polyakov, P. A.** Longitudinal dynamics of road trains under braking / P. A. Polyakov // Transport, mining and construction engineering : science and production. – 2022. – No. 17–1. – P. 65–74. – DOI 10.26160/2658-3305-2022-17-65-74.

I. A. Yaitskov, P. A. Polyakov, E. S. Fedotov, R. S. Tagiev, R. N. Dedusenko

ANALYSIS OF UNSTEADY PROCESSES IN THE BRAKING DEVICE DISC-PAD TYPE WHEN BRAKING

Abstract. The paper presents a mathematical model of unsteady braking processes at the level of the “pressing element – brake pad – brake disc” system. A feature of this model is that it provides the location of the pressing elements, the geometric dimensions of the brake pad and the pressing elements for changes in the angular and linear vibrations of the brake pad when they interact with the working surface of the brake disc. The main parameters that evaluate the non-stationary interaction process are the pitch and lateral movement angles of different edges of the brake pad, which is clearly demonstrated in comparative diagrams of the total vibrations of the upper and right corners of the brake pad, their accelerations and inertial load during braking. Analysis of the inertial load diagram shows that the upper corner is more susceptible to separation of the pad edge from the working surface of the disc, provided that the frequency of forced vibrations is lower, while the higher frequency of forced vibrations in the lower edge of the pad does not increase the risk of its separation from the surface of the disc during interaction. In general, the mathematical model makes it possible to analyze the non-

stationary interaction process with the pad loading, the location and geometric parameters of the pressing mechanism of a disc-pad type brake device.

Keywords: braking, angular oscillation, angular acceleration, pitch, lateral movement, inertial load, brake pad.

For citation: Analysis of unsteady processes in the braking device disc-pad type when braking / I. A. Yaitskov, P. A. Polyakov, E. S. Fedotov [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 1. – P. 248–260. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_248.

Сведения об авторе

Яицков Иван Анатольевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство», доктор технических наук, профессор, декан электромеханического факультета, e-mail: yia@rgups.ru

Поляков Павел Александрович

Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ), кафедра «Транспортные процессы и технологические комплексы», кандидат технических наук, доцент, e-mail: polyakov.pavel88@mail.ru

Федотов Евгений Сергеевич

Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ), кафедра «Транспортные процессы и технологические комплексы», старший преподаватель, e-mail: avtoru2009@mail.ru

Тагиев Руслан Суфудинович

Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ), кафедра «Транспортные процессы и технологические комплексы», аспирант, e-mail: usytagiev@mail.ru

Дедусенко Роман Николаевич

Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ), кафедра «Транспортные процессы и технологические комплексы», магистрант, e-mail: roma.dedusenko@mail.ru

Information about the author

Yaitskov Ivan Anatolievich

Rostov State Transport University (RSTU), Chair «Car and Car Facilities», Doctor of Engineering Sciences, Professor, Dean of the Electromechanical Faculty, e-mail: yia@rgups.ru

Polyakov Pavel Alexandrovich

Kuban State Technological University (KubSTU), Chair «Transport Processes and Technological Complexes», Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, e-mail: polyakov.pavel88@mail.ru

Fedotov Evgeny Sergeevich

Kuban State Technological University (KubSTU), Chair «Transport Processes and Technological Complexes», Senior Lecturer, e-mail: avtoru2009@mail.ru

Tagiev Ruslan Sufadinovich

Kuban State Technological University (KubSTU), Chair «Transport Processes and Technological Complexes», Postgraduate Student, e-mail: usytagiev@mail.ru

Dedusenko Roman Nikolayevich

Kuban State Technological University (KubSTU), Chair «Transport Processes and Technological Complexes», Master`s Degree Student, e-mail: roma.dedusenko@mail.ru

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК РГУПС»

1 **Материалы статей** представляют в виде текстов, отформатированных и распечатанных на лазерном или струйном принтере (пригодных для сканирования) на белой бумаге формата А4 (210×297 мм) в одном экземпляре. Рекомендуемый объем статьи – 5–15 страниц.

Одновременно представляют электронную версию статьи, выполненной в текстовом редакторе Word for Windows, шрифт Times New Roman, 11 pt, межстрочный интервал – одинарный, выравнивание по ширине, абзацный отступ – 1,25 см, все поля – 2 см.

2 На первой странице должны быть указаны:

- **УДК** – в левом верхнем углу;
- интервал;
- **инициалы и фамилии авторов** – по центру, курсивом;
- интервал;
- **название статьи** – заглавными буквами, полужирным шрифтом, по центру, без переносов;
- интервал;
- **аннотация** (80–150 слов);
- **ключевые слова** (5–10 слов);
- интервал;
- **текст статьи** – печатается с переносами.
- интервал;
- **список литературы** на русском и английском языках (не менее 10 источников).

3 **Статья** должна содержать вводную часть, цель научной разработки, основную часть и выводы. Текст статьи должен быть тщательно отредактирован и готов для макетирования и верстки журнала на компьютере.

4 **Буквы** латинского алфавита набирают курсивом, буквы греческого и русского алфавитов – прямым шрифтом. Математические символы \lim , \ln , \arg , const , \sin , \cos , \min , \max и т.д. набирают прямым шрифтом. Аббревиатуры следует расшифровывать при их первом упоминании в тексте.

5 **Формулы.** Большие формулы необходимо разбить на отдельные фрагменты. Фрагменты формул по возможности должны быть независимы (при работе в формульном редакторе каждая строка – отдельный объект). Располагать формулы следует по центру строки.

Буквы J и I, e и l, h и n, q и g, V и U, O (буква) и 0 (ноль) должны различаться по начертанию.

Тире, дефис, знак «минус» обозначают соответствующими знаками. Нумеровать следует только те формулы, на которые есть ссылки в тексте. Номер формулы следует печатать в Word отдельно от формул, в круглых скобках по правому краю.

Обозначения, термины и иллюстративный материал должны соответствовать действующим ГОСТам.

6 **Рисунки и фотографии**, выполненные четко и контрастно в формате *.tif, *.jpg, *.png, с разрешением не менее 300 точек на дюйм, следует размещать в порядке их упоминания в тексте. Ссылки на рисунки в тексте и подрисовочная подпись обязательны.

7 **Таблицы** следует размещать по мере упоминания в статье. Ссылки на таблицы в тексте и названия таблиц обязательны.

8 **Список литературы** приводят общим списком в конце статьи и составляют в соответствии с последовательностью ссылок в тексте, которые обозначают арабскими цифрами в квадратных скобках. Литературу оформляют только согласно ГОСТ Р 7.0.100-2018. При наличии у статьи цифрового идентификатора объекта (DOI) его указание обязательно.

Статья должна быть обязательно подписана всеми авторами.

9 **Материалы, прилагаемые к статье**, должны содержать следующие сведения (на русском и английском языках):

- Название статьи (заглавными буквами, полужирным шрифтом).
- Фамилия, имя, отчество автора (полностью, без сокращений).
- Место работы каждого автора в именительном падеже.
- Ученая степень, ученое звание, должность.
- E-mail.
- Аннотация (краткое содержание статьи, включающее 3–4 предложения).
- Ключевые слова.

Условия и порядок публикации статей в журнале

- 1** Статья должна быть оформлена по прилагаемым требованиям.
- 2** Автор имеет право опубликовать в номере одну статью.
- 3** Автор может прислать статью в адрес редакции:
 - по почте;
 - по электронной почте;
 - принести в редакцию и передать ответственному секретарю (гл. корпус, ком. Д 107).
- 4** Статья, представляемая в редакцию, должна соответствовать тематике издания.

Тематика журнала охватывает основные проблемы транспорта, а также энергетики, машиностроения и управления. Публикуются статьи по следующим секциям:

- машиностроение;
- подвижной состав, безопасность движения и экология;
- информационные технологии, автоматика и телекоммуникации;
- управление и логистика на транспорте;
- железнодорожный путь и транспортное строительство;
- транспортная энергетика;
- моделирование систем и процессов.

5 Редакционная коллегия принимает для публикации статьи после тщательной научной экспертизы.

Для публикации отбирают статьи, которые представляют научный интерес и являются новой ступенью в разработке данной проблемы. Статьи публицистического плана не принимаются.

6 На заседании редколлегии принимают решение о возможности публикации статьи только при наличии положительной рецензии.

7 Все расходы по подготовке к публикации и изданию журнала оплачивает университет, в том числе и почтовые расходы при пересылке журнала авторам.

Краткая информация о журнале

Научно-технический журнал «Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения» («Вестник РГУПС») зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (РОСКОМНАДЗОР), свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-77245 от 20 ноября 2019 г. Журнал имеет международный стандартный сериальный номер (ISSN 0201-727X), присвоенный Книжной палатой Российской Федерации.

Учредителем и издателем является Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС).

Главный редактор журнала – академик РАН, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор В.И. Колесников.

В состав редакционной коллегии входят ведущие ученые РГУПС, а также других транспортных и академических университетов Северо-Кавказского региона, Москвы, Санкт-Петербурга, Республики Беларусь, Чешской Республики, Польши, Франции.

Журнал выходит с периодичностью 4 номера в год, т.е. каждый квартал.

С апреля 2004 года «Вестник РГУПС» включен в «Перечень периодических научных и научно-технических изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук» (решение Президиума ВАК № 6/4 от 06.02.2004 г.). Журнал вошел во все последующие редакции Перечня.

«Вестник РГУПС» – подписное издание. С 2004 года журнал был включен в каталог подписных изданий агентства «Роспечать». Также включен в каталог подписных изданий Объединённого каталога «Пресса России» (www.pressa-rg.ru под индексом 53720).

Подписаться на журнал можно через агентство подписки «Урал-Пресс» и агентство «АРЗИ», распространяется журнал на территории Российской Федерации. Подписку можно оформить на квартал, на полгода или на год.

Журнал «Вестник РГУПС» бесплатно рассылается всем отраслевым вузам, в ряд вузов Министерства образования и науки России, центральным и зональным научно-техническим библиотекам, НИИ информации.

Почтовый адрес редакции:

344038, г. Ростов н/Д, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2.

Ростовский государственный университет путей сообщения.

Редакция журнала «Вестник РГУПС».

Телефон: +7 (863) 272-62-74. Факс: +7 (863) 255-37-85.

E-mail: pmv_nis@rgups.ru ; nis@rgups.ru (дополнительный).

Архив журнала и требования по оформлению статей размещены на сайте <http://vestnik.rgups.ru>.

Научное издание

**ВЕСТНИК
Ростовского государственного университета
путей сообщения**

Научно-технический журнал

**№ 1 (93)
2024**

Уважаемые читатели!
Вы можете подписаться на наш журнал на сайте www.pressa-rgf.ru.
Индекс журнала по каталогу 53720

**Полнотекстовая версия статей находится в открытом доступе на сайте
Российской научной электронной библиотеки: www.elibrary.ru
Журнал обрабатывается в системах индексов научного цитирования
РИНЦ и Science Index**

**Требования к оформлению статей размещены на сайте
<http://vestnik.rgups.ru>**

Редакторы: А.В. Артамонов, Т.В. Бродская,
Т.И. Исаева, Т.М. Чеснокова, К.И. Паханова,
А.П. Кононенко (английский текст)

Корректоры: А.В. Артамонов, Т.В. Бродская,
Т.И. Исаева, Т.М. Чеснокова, К.И. Паханова,
А.П. Кононенко (английский текст)

Оригинал-макет журнала подготовлен А.О. Полуниной

Подписано в печать 28.03.2024.
Дата выхода в свет 29.03.2024.
Печать офсетная.
Знак информационной продукции 16+.

Формат 60×84/8.
Усл. печ. л. 30,57.
Тираж 510 экз.
Цена свободная.

Бумага офсетная.
Изд. № 11.
Заказ .

Учредитель:

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО РГУПС)**

**Адрес университета, издателя, редакции:
344038, г. Ростов н/Д, пл. Ростовского Стрелкового Полка
Народного Ополчения, д. 2.
Телефон редакции +7 (863) 272-62-74; факс +7 (863) 255-37-85.
E-mail: pmv_nis@sci.rgups.ru; nis@rgups.ru**

**Адрес типографии :
«Издательство «D&V». Св-во № 003679887.
344037, г. Ростов-на-Дону, ул. 20 линия, 54.
E-mail: divprint@mail.ru. Телефон +7 (918) 543-75-63.**