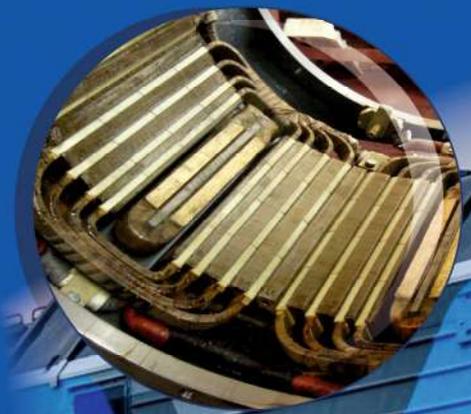
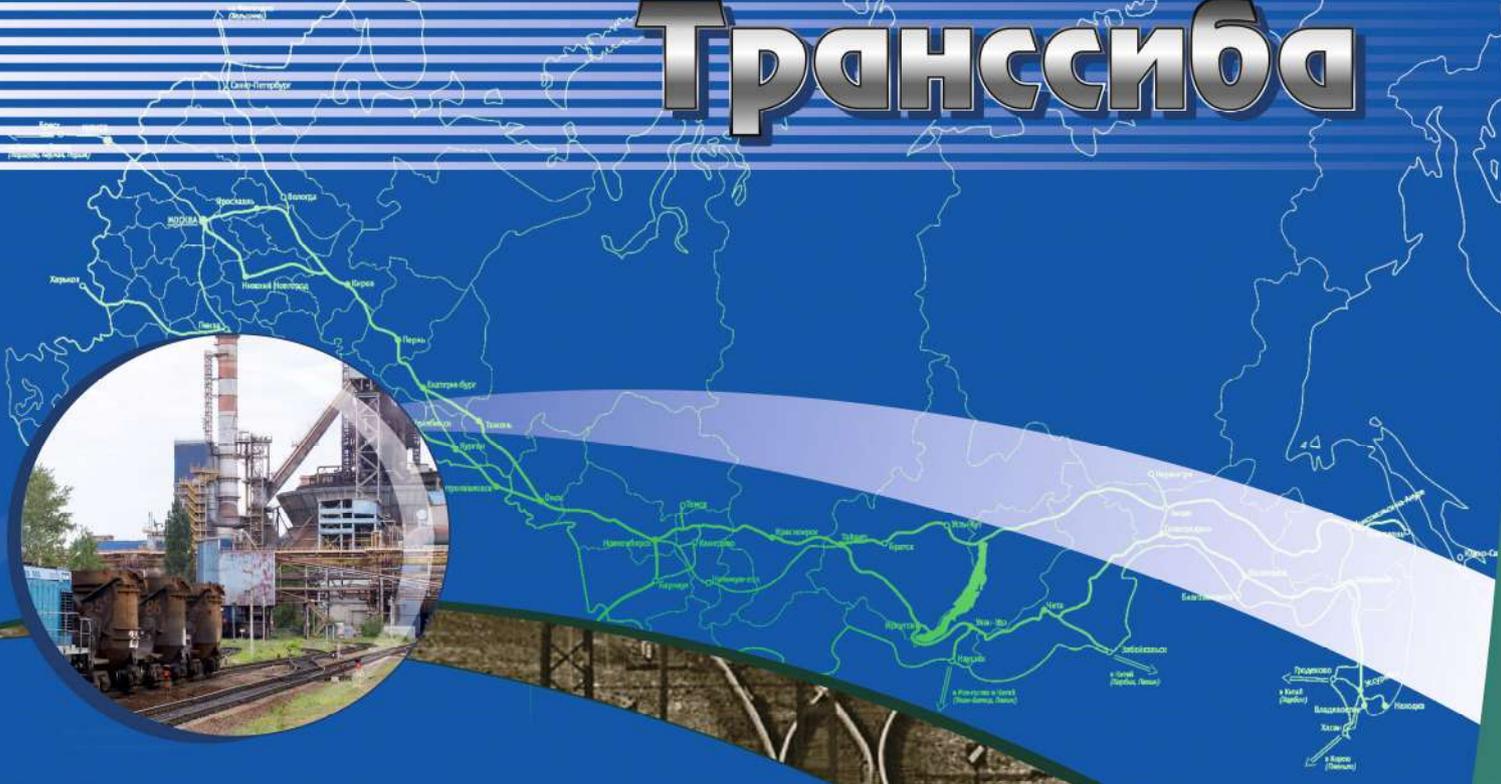


ИЗВЕСТИЯ

№ 4(64)

2025

Транссиб



РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

1. **Овчаренко Сергей Михайлович** – главный редактор, ректор ОмГУПС, д.т.н., доцент (Омск).
2. **Галиев Ильхам Исламович** – зам. главного редактора, советник при ректорате ОмГУПС, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ (Омск).
3. **Шантаренко Сергей Георгиевич** – зам. главного редактора, профессор кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» ОмГУПС, д.т.н., доцент (Омск).
4. **Алексеев Виктор Михайлович** – профессор кафедры «Управление и защита информации» РУТа (МИИТа), д.т.н., профессор (Москва).
5. **Бессоненко Сергей Анатольевич** – профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой» СГУПС, д.т.н., доцент (Новосибирск).
6. **Ведрученко Виктор Родионович** – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС, д.т.н., профессор (Омск).
7. **Глинка Тадеуш** – доктор, профессор Силезского политехнического университета (Гливице, Польша).
8. **Горюнов Владимир Николаевич** – профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГУ, д.т.н., профессор (Омск).
9. **Гуда Александр Николаевич** – проректор по научной работе РГУПС, д.т.н., профессор (Ростов-на-Дону).
10. **Зыкина Анна Владимировна** – заведующая кафедрой «Прикладная математика и фундаментальная информатика» ОмГУ, д.ф.-м.н., профессор (Омск).
11. **Исаков Александр Леонидович** – зав. кафедрой «Изыскания, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог» СГУПС, д.т.н., профессор (Новосибирск).
12. **Ким Константин Константинович** – заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники и энергетики» ПГУПС, д.т.н., профессор (Санкт-Петербург).
13. **Комяков Александр Анатольевич** – проректор по цифровой трансформации и связи с производством ОмГУПС, д.т.н., доцент (Омск).
14. **Косарев Александр Борисович** – научный руководитель института – ученый секретарь АО «ВНИИЖТ», д.т.н., профессор (Москва).
15. **Кузнецов Андрей Альбертович** – заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника» ОмГУПС, д.т.н., профессор (Омск).
16. **Лебедев Виталий Матвеевич** – д.т.н., профессор (Омск).
17. **Никитин Александр Борисович** – профессор кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» ПГУПС, д.т.н., профессор (Санкт-Петербург).
18. **Лившиц Александр Валерьевич** – заведующий кафедрой «Автоматизация производственных процессов» ИРГУПС, д.т.н., профессор (Иркутск).
19. **Лю Цзинькунь** – доктор, профессор, заместитель декана Школы гражданского строительства университета Сунь Ятсена (Чжухай, Китай).
20. **Парамонов Александр Михайлович** – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУ, д.т.н., доцент (Омск).
21. **Сидоров Олег Алексеевич** – профессор кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПС, д.т.н., профессор (Омск).
22. **Смердин Александр Николаевич** – первый проректор, проректор по научной работе ОмГУПС, д.т.н., доцент (Омск).
23. **Солоненко Владимир Гельевич** – профессор кафедры «Подвижной состав» АЛТ Университета имени Мухамеджана Тынышпаева, д.т.н., профессор (Алматы, Республика Казахстан).
24. **Файзибаев Шерзод Сабирович** – профессор кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство» ТТРУ, д.т.н., профессор (Ташкент, Республика Узбекистан).
25. **Харламов Виктор Васильевич** – заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС, д.т.н., профессор (Омск).

EDITORIAL BOARD

1. **Ovcharenko Sergey Mikhailovich** – chief editor, the rector of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
2. **Galiev Ilkham Islamovich** – deputy chief editor, the advisor to the rector's office of OSTU, D. Sc., professor, the honored worker of science and engineering of the Russian Federation (Omsk, Russia).
3. **Shantarenko Sergey Georgievich** – deputy chief editor, professor of the department «Technologies of transport engineering and rolling stock repair» of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
4. **Alekseev Viktor Mikhailovich** – professor of the department of Information Control and Protection of RUT, D. Sc., professor (Moscow, Russia).
5. **Bessonenko Sergey Anatolevich** – professor of the department «Track Maintenance Management» of STU, D. Sc., associate professor (Novosibirsk, Russia).
6. **Vedruchenko Victor Rodionovich** – professor of the department «Heat-power engineering» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
7. **Glinka Tadeusz** – Ph. D., professor of Silesian University of Technology (Gliwice, Poland).
8. **Goryunov Vladimir Nikolaevich** – professor of the department «Power supply of industrial enterprises» of OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
9. **Huda Alexander Nikolaevich** – vice-rector for scientific-work of RSTU, D. Sc., professor (Rostov-on-Don, Russia).
10. **Zykina Anna Vladimirovna** – head of the department «Applied mathematics and fundamental computer science» of OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
11. **Isakov Alexander Leonidovich** – head of the department «Railway and Highway Surveying and Design Engineering» of STU, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
12. **Kim Konstantin Konstantinovich** – head of the department «Theoretical foundations of electrical engineering and power engineering» of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, D. Sc., professor (St. Petersburg, Russia).
13. **Komyakov Aleksandr Anatolevich** – vice-rector for digital transformation and industrial relations of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
14. **Kosarev Alexander Borisovich** – scientific director of the institute – scientific secretary of JSC «VNIIZhT» (Railway Research Institute), D. Sc., professor (Moscow, Russia).
15. **Kuznetsov Andrey Albertovich** – head of the department «Theoretical electrical engineering» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
16. **Lebedev Vitaliy Matveyevich** – D. Sc., professor (Omsk, Russia).
17. **Nikitin Aleksandr Borisovich** – professor of the department «Automation and telemechanics on railways» of PGUPS, D. Sc., professor (St. Petersburg, Russia).
18. **Livshits Alexandr Valerievich** – head of the department «Automation of Production Processes» of ISTU, D. Sc., professor (Irkutsk, Russia).
19. **Liu Jiankun** – Ph. D., professor of Sun Yat-sen University, the associate dean of the School of Civil Engineering (Zhuhai, China).
20. **Paramonov Aleksandr Mikhailovich** – professor of the department «Heat-power engineering» of OmSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
21. **Sidorov Oleg Alexeevich** – professor of the department «Power supply of railway transport» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
22. **Smerdin Aleksandr Nikolaevich** – the first vice-rector, vice-rector by scientific work of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
23. **Solonenko Vladimir Gelyevich** – professor of the department «Rolling stock» of ALT of Muxamedzhan Tyunyshpaev University, D. Sc., professor (Almaty, Kazakhstan).
24. **Fayzibaev Sherzod Sabirovich** – professor of the department «Locomotives and locomotive facilities» of TSTU, D. Sc., professor (Tashkent, Uzbekistan).
25. **Kharlamov Viktor Vasilyevich** – head of the department «Electrical machines and common electrotechnic» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).

Иванченко Владимир Иванович – ответственный секретарь, к.т.н. (Омск).

СОДЕРЖАНИЕ

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

- Савоськин А. Н., Пудовиков О. Е., Чучин А. А. Уточнение модели силовой характеристики поглощающего аппарата автосцепки..... 2
- Осипов В. А., Черных В. Н. Математическое обоснование минимально необходимого количества тензодатчиков для корректного контроля гололедной нагрузки в составе АСКВП..... 10
- Минаков В. А., Носков В. О. Разработка и эксплуатация стенда имитации работы системы охлаждения дизеля..... 19
- Стищенко К. П., Кипервассер М. В., Жирнов М. В., Митрохин В. Е. Повышение качества питающего напряжения постов электрической централизации электрифицированных железных дорог постоянного тока... 27
- Монастырский Д. Я., Ким К. К. Оценка эффективности перевода энерго- и холодоснабжения рефрижераторного вагона на сжиженный природный газ..... 39

Управление процессами перевозок

- Болтаев С. Т., Мухидинов О. О., Жоникулов Э. Ш. Формирование сигналов на линейных пунктах диспетчерской централизации..... 48

Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте

- Адилова З. Г., Юлдашова Г. М., Якумбаев Х. М., Бобоев Д. Ш., Асенова С. И. Методологические основы разработки параметров железнодорожных терминалов для контейнерных перевозок в Узбекистане.... 62
- Романова Д. О., Попов А. Т., Суслова О. А. Совершенствование транспортного обслуживания металлургического производства при применении микропроцессорного управления на промышленных железнодорожных станциях..... 77

Электротехнические комплексы и системы

- Пастухов К. Е., Харламов В. В. Формирование диагностической граф-модели состояния изоляции обмоток электрических машин..... 85

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

- Astanaliev E. T., Baratov D. Kh. Development of micro-commands according to logical schemes of algorithmic technical documentation in railway automation..... 93
- Лакин И. И. Гармонизация автоматизированной системы управления техническим обслуживанием и ремонтом локомотивов со стандартами Евросоюза..... 100
- Сударев И. В., Скоробогатов М. Э. Система контроля и учета аппаратуры автоматики и телемеханики с применением технологии NFC..... 112
- Лакин И. К. Автоматизированная киберфизическая система управления надежностью локомотивов сервисного обслуживания..... 126

Научно-технический журнал «Известия Транссиб» / Journal of Transsib Railway Studies

Учредитель и издатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС (ОмИИТ))»

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35

А. Н. Савоськин, О. Е. Пудовиков, А. А. Чучин

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), г. Москва, Российская Федерация

УТОЧНЕНИЕ МОДЕЛИ СИЛОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОГЛОЩАЮЩЕГО АППАРАТА АВТОСЦЕПКИ

Аннотация. В работе рассмотрены конструкция и принцип действия упруго-фрикционного поглощающего аппарата автосцепки. Представлены результаты исследования силовой характеристики упруго-фрикционного поглощающего аппарата автосцепки, учитывающего режимы работы аппарата и деформацию конструктивных элементов, участвующих в передаче продольной силы от корпуса автосцепки к поглощающему аппарату. Предложено рассматривать силовую характеристику поглощающего аппарата в виде кусочно-линейной петлевой характеристики, состоящей из девяти участков. Получены уравнения для определения силовой статической характеристики для каждого участка деформации соответствующего конструктивного элемента поглощающего аппарата автосцепки. Выполнено описание силовой характеристики единой системой уравнений. Уточнены и определены основные числовые параметры, характеризующие работу поглощающего аппарата, такие как жесткость и деформация конструктивных элементов аппарата, корпуса автосцепки, пружины. Разработанная математическая модель пружинно-фрикционного поглощающего аппарата автосцепки учитывает все режимы его работы и деформацию элементов конструкции, передающих продольную силу от корпуса автосцепки на поглощающий аппарат. Полученные в работе результаты уточняют вид силовой характеристики поглощающего аппарата, приближая его к экспериментально полученным графикам. Представленное математическое описание силовой характеристики может использоваться при разработке многомассовой модели поезда, представляющей систему твердых тел, соединенных между собой нелинейными упруго-фрикционными связями. Приведенные результаты исследования могут быть использованы для определения предельных усилий в поглощающих аппаратах автосцепок при моделировании продольных колебаний в грузовых поездах, которые возникают при изменении режимов работы локомотива, режимов движения поезда при проходах переломов продольного профиля пути.

Ключевые слова: автосцепка, поглощающий аппарат, силовая характеристика, деформация конструктивных элементов.

Anatoliy N. Savos'kin, Oleg E. Pudovikov, Anton A. Chuchin

Russian University of Transport (RUT (MIIT)), Moscow, the Russian Federation

THE AUTOMATIC COUPLING ABSORBING APPARATUS POWER CHARACTERISTICS MODEL CORRECTION

Abstract. The paper discusses the design and principle of operation of the elastic-friction absorbing device of the automatic coupler. The results of a study of the force characteristic of the elastic-friction absorbing device of the automatic coupler, which takes into account the operating modes of the device and the deformation of the structural elements involved in the transmission of longitudinal force from the automatic coupler body to the absorbing device, are presented. It is proposed to consider the force characteristic of the absorbing device as a piecewise linear loop characteristic consisting of nine sections. Equations have been obtained for determining the static force characteristic for each deformation section of the corresponding structural element of the absorber apparatus of the automatic coupler. The force characteristic has been described using a single system of equations. The main numerical parameters characterizing the operation of the absorber apparatus, such as the stiffness and deformation of the structural elements of the apparatus, the automatic coupler body, and the spring, have been refined and determined. The developed mathematical model of the spring-friction absorber of the automatic coupler takes into account all modes of its operation and deformation of the structural elements that transmit the longitudinal force from the automatic coupler body to the absorber. The results obtained in the work specify the form of the power characteristic of the absorbing device, bringing it closer to the experimentally obtained graphs. The presented mathematical description of the power characteristic can be used in the development of a multi-mass train model, which is a system of rigid bodies connected to each other by nonlinear elastic-frictional bonds. The results of this study can be used to determine the maximum forces in the absorbing devices of automatic couplers when modeling longitudinal vibrations in freight trains, which occur when the locomotive operating modes and train movement modes change as the train passes through the longitudinal track profile changes.

Keywords: automatic coupler, absorbing apparatus, power characteristics, deformation of structural elements.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Известно полученное ранее описание упруго-фрикционной характеристики поглощающего аппарата автосцепки $F_{п.а}(x)$ на основе анализа упругой $F_y(t)$ и фрикционной $F_{тр}(t)$ составляющих зависимости этой реакции на взаимное перемещение $x(t)$ двух смежных экипажей, соединенных автосцепками, отличающееся от ранее предложенного [1, 2] учетом разрывности характеристики силы сухого трения [3]

$$F_{тр}(t) = \mu_{тр}^3 F_y(t) \text{sign} \dot{\Delta}, \quad (1)$$

где $\mu_{тр}^3$ – эквивалентный коэффициент трения;

$F_y(t)$ – реакция пружины;

$\text{sign} \dot{\Delta}(t) = \dot{\Delta}(t) / |\dot{\Delta}(t)|$ – знак скорости деформации пружины.

При мгновенном возникновении силы трения $F_{тр}(t)$ происходит деформация (сжатие и сдвиг) прилегающих конструктивных элементов (клиньев и корпуса поглощающего аппарата) и уравнение (1) следует заменить на выражение, описывающее эквивалентную реакцию этих элементов:

$$F_{тр} = \mathcal{K} \Delta + \beta \dot{\Delta}, \quad (2)$$

где \mathcal{K} – эквивалентная жесткость этих элементов;

Δ – упругая деформация конструктивных элементов;

β – коэффициент затухания;

$\dot{\Delta}$ – скорость упругой деформации конструктивных элементов.

Для примера рассмотрим схему сил в статическом режиме, действующую на локомотивный поглощающий аппарат типа Ш-2-В-90 (Ш – шестигранный, В – взаимозаменяемый), поскольку конструкции вагонных аппаратов мало отличаются от локомотивного (рисунок 1).

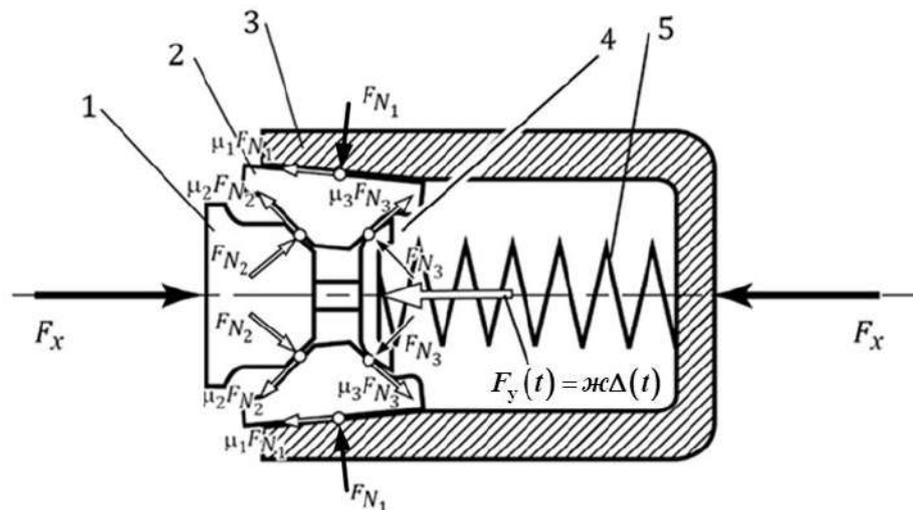


Рисунок 1 – Силы, действующие в пружинно-фрикционном поглощающем аппарате автосцепки:

1 – нажимной конус; 2 – клинья; 3 – корпус; 4 – обойма условная; 5 – пружина

Эта конструкция состоит из корпуса 3, нажимного конуса 1 и фрикционных клиньев 2, размещенных в корпусе вместе с упругим элементом – эквивалентной пружиной 5 жесткостью $\mathcal{K} = 20000$ кН/м. Пружина установлена в поглощающий аппарат с предварительным сжатием $\Delta_{п.с} = 0,012$ м; возможная деформация пружины ограничена величиной $\Delta_6 = 0,09$ м.

На основе полученных ранее выражений [3] составим уравнение силовой статической характеристики $F_{п.а}(x)$ поглощающего аппарата. Для этого будем определять силы $F_{п.а}i(x)$, возникающие при различных значениях взаимного перемещения $x(t)$. Эта характеристика будет состоять из девяти участков.

Первый участок характеристики $F_{п.а1}(x)$ – линия OA на рисунке 2. На этом участке

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

взаимное перемещение $x(t)$ не превышает величину половины зазора в автосцепках $0,5\Delta_0 = 0,0325$ м, и поэтому реакция аппарата будет равна нулю:

$$F_{п.а1}(x) = F_{OA} = F_{AO} = 0 \text{ при } 0 < x(t) \leq 0,5\Delta_0 \text{ и } [\dot{x}(t) > 0 \text{ или } \dot{x}(t) < 0]. \quad (3)$$

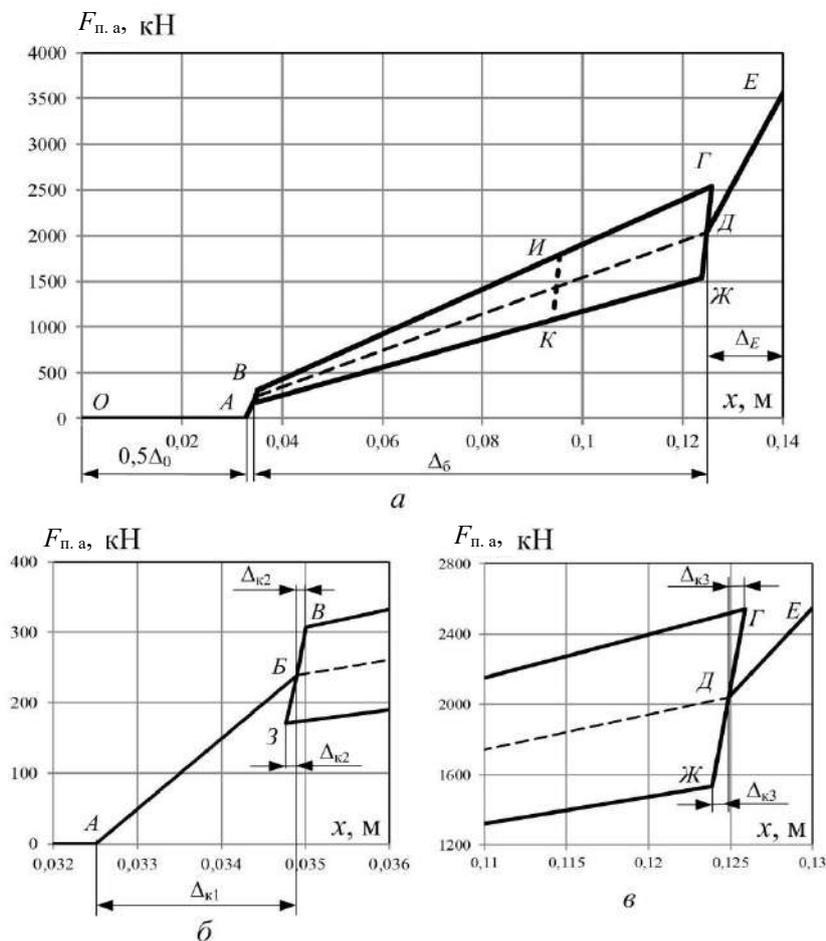


Рисунок 2 – Силовая характеристика поглощающего аппарата (а), участки характеристики при деформациях $\Delta = 0,032 \div 0,036$ м (б) и $\Delta = 0,11 \div 0,13$ м (в)

Второй участок характеристики $F_{п.а2}(x)$ – линия AB на рисунке 2. Переход на этот участок происходит после того, как взаимное перемещение $x(t)$ превысит величину $0,5\Delta_0$ при $\dot{x}(t) > 0$.

При этом продольная сила $F_x(t)$ передается от корпуса автосцепки через клин, тяговый хомут, упоры и упорную плиту автосцепки (на рисунке не показаны) на нажимной конус 1 и далее на пружину 5 через условную обойму 4, являющуюся одновременно и упором пружины [4, 5]. При действии продольной силы $F_x(t)$ возникают деформации этих конструктивных элементов, которые в выражении (2) учитываются с помощью эквивалентной жесткости $\mathcal{J}_{к1}$ и суммарной деформации $\Delta_{к1}$. При этом принимают, что величина жесткости указанных элементов определяется на основе схемы их последовательного включения и составляет

$$\mathcal{J}_{к1} = \prod_i \mathcal{J}_{ки} / \sum_i \mathcal{J}_{ки} \cong 1 \cdot 10^5 \text{ кН/м}. \quad (4)$$

Этот участок ограничен слева величиной $0,5\Delta_0$, а справа – величиной $\Delta_{к1} = 240 \text{ кН} / 100000 \text{ кН/м} = 0,0024$ м (линия AB на рисунке 2, б) и соответствует появлению возрастающей упругой силы при $\dot{x}(t) > 0$. Если же после перехода в точку B знак скорости изменится: $\dot{x}(t) < 0$, то упругая сила начнет уменьшаться по линии BA и аналитическое выражение $F_{п.а2}(x)$ примет вид:

$$F_{п.а2}(x) = F_{AB} = F_{BA} = \begin{cases} \mathcal{J}c_{к1}(x(t) + 0,5\Delta_0) \\ \text{при } 0,5\Delta_0 < x(t) < 0,5\Delta_0 + \Delta_{к1} \text{ и } [\dot{x}(t) > 0 \text{ или } \dot{x}(t) < 0], \end{cases} \quad (5)$$

где $\mathcal{J}c_{к1}$ – жесткость конструктивных элементов, определяемая выражением (4).

Эта сила действует до тех пор, пока ее величина не достигнет значения, равного силе предварительного сжатия пружины $F_{п.с}$:

$$F_B = F_{п.с} = \mathcal{J}c\Delta_{п.с}; \quad (6)$$

$$F_B = 20000 \cdot 0,012 = 240 \text{ кН.}$$

Третий участок характеристики $F_{п.а3}(x)$ – линия $3B$ на рисунке 2, б. Переход на этот участок происходит после того, как перемещение $x(t)$ превысит величину $\Delta_{п.с}$ и начнется деформация пружины поглощающего аппарата. При этом появится положительная скорость деформации $\dot{x}(t) > 0$, что вызовет в соответствии с выражением (2) появление упругой силы $F_{уп} = \mathcal{J}c_{к2} \cdot x(t)$, и уравнение характеристики $F_{п.а3}(x)$ примет вид:

$$F_{п.а3}(x) = F_{3B}(x) = \begin{cases} \mathcal{J}c_{к1}\Delta_{к1} + \mathcal{J}c_{к2}x(t) \\ \text{при } 0,5\Delta_0 + \Delta_{к1} - \Delta_{к2} \leq x(t) < 0,5\Delta_0 + \Delta_{к1} + \Delta_{к2} \text{ и } \dot{x}(t) > 0. \end{cases} \quad (7)$$

В выражении (7) жесткость $\mathcal{J}c_{к2}$ превышает в 3 – 5 раз жесткость $\mathcal{J}c_{к1} = 1 \cdot 10^5$ кН/м и составляет $\mathcal{J}c_{к2} = (3 - 5) \cdot 10^5$ кН/м.

Поэтому силовая характеристика поглощающего аппарата на участке $3B$ (см. рисунок 2, б) в соответствии с уравнением (7) будет линейно возрастать от величины $0,5\Delta_0 + \Delta_{к1} - \Delta_{к2}$ в точке B на $\mathcal{J}c_{к2} \cdot x(t)$ до координаты $x(t) = 0,5\Delta_0 + \Delta_{к1} + \Delta_{к2}$, т. е. на величину $2\Delta_{к2}$. При этом величина деформации $\Delta_{к2}$ определится величиной силы трения:

$$\Delta_{к2} = F_{тр} / \mathcal{J}c_{к2} = \mu_{тр}^3 \mathcal{J}c \Delta_{п.с} / \mathcal{J}c_{к2} = \mu_{тр}^3 \Delta_{п.с} (\mathcal{J}c / \mathcal{J}c_{к2}); \quad (8)$$

$$\Delta_{к2} = 0,28 \cdot 0,012 \cdot (2 \cdot 10^4 / 5 \cdot 10^5) \cong 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

Тогда в точке B реакция поглощающего аппарата

$$F_B = F_B + F_{BB} = \mathcal{J}c_{к1}\Delta_{к1} + \mathcal{J}c_{к2}\Delta_{к2}. \quad (9)$$

С учетом выражения (8)

$$F_B = \mathcal{J}c_{к1}\Delta_{к1} + \mathcal{J}c_{к2}\mu_{тр}^3 \Delta_{п.с} (\mathcal{J}c / \mathcal{J}c_{к2}) = \mathcal{J}c_{к1}\Delta_{к1} + \mu_{тр}^3 \mathcal{J}c \Delta_{п.с}. \quad (10)$$

$$F_B = 240 + 0,28 \cdot 20000 \cdot 0,012 = 307,2 \text{ кН.}$$

В точке 3 сила F_3 с учетом уравнения (10) определится выражением:

$$F_3 = F_B - F_{B3} = \mathcal{J}c_{к1}\Delta_{к1} - \mathcal{J}c_{к2}\Delta_{к2}, \quad (11)$$

откуда $F_3 = 100000 \cdot 0,0024 - 0,28 \cdot 20000 \cdot 0,012 = 172,3$ кН.

Четвертый участок характеристики $F_{п.а4}(x)$ – линии $БД$ $F_{п.а4у}(x)$ и $ВГ$ $F_{п.а4з}$ на рисунке 2. Участок $БД$ определяется появлением деформации пружины $x(t)$, которая ограничена величинами $0,5\Delta_0 + \Delta_{к1} = 0,00349$ м и $0,5\Delta_0 + \Delta_{к1} + \Delta_6 = 0,1249$ м, а также появлением упругой силы пружины $F_{уп} = \mathcal{J}c \cdot x(t)$. Поэтому на участке $БД$ действует сумма сил:

$$F_{п.а4у}(x) = F_{БД} = F_B + F_{уп}(x) = \begin{cases} \mathcal{J}c_{к1}\Delta_{к1} + \mathcal{J}c x(t) \\ \text{при } 0,5\Delta_0 + \Delta_{к1} \leq x(t) < 0,5\Delta_0 + \Delta_{к1} + \Delta_6 \text{ и } \dot{x}(t) > 0. \end{cases} \quad (12)$$

На участке $ВГ$ к упругой силе $F_{БД}(x)$ добавляется сила $\mathcal{J}c_{к2} \cdot x(t)$:

$$F_{п.а4\Sigma}(x) = F_{BG} = F_{BD} + \mathcal{J}c_{k2}x(t). \quad (13)$$

Тогда окончательно получим:

$$F_{п.а4\Sigma}(x) = F_{BG} = \begin{cases} \mathcal{J}c_{k1}\Delta_{k1} + \mathcal{J}c\Delta_6 + \mathcal{J}c_{k2}x(t) \\ \text{при } 0,5\Delta_0 + \Delta_{k1} + \Delta_{k2} < x(t) \leq 0,5\Delta_0 + \Delta_{k1} + \Delta_{k2} + \Delta_6 + \Delta_{k3} \text{ и } \dot{x}(t) > 0. \end{cases} \quad (14)$$

В выражении (14) деформацию Δ_{k3} по аналогии с Δ_{k2} выражения (8) определим по величине силы трения F_T в точке Γ :

$$\Delta_{k3} = F_{ун2} / \mathcal{J}c_{k2} = \mu_{тр}^3 \Delta_6 (\mathcal{J}c / \mathcal{J}c_{k2}); \quad (15)$$

$$\Delta_{k3} = 0,28 \cdot 0,09 \cdot (2 \cdot 10^4 / 5 \cdot 10^5) = 0,001 \text{ м.}$$

Значение упругой силы в точке D

$$F_D = \mathcal{J}c_{k1}\Delta_{k1} + \mathcal{J}c\Delta_6; \quad (16)$$

$$F_D = 100000 \cdot 0,0024 + 20000 \cdot 0,09 = 2040 \text{ кН.}$$

Значение силы в точке Γ определяется по формуле

$$F_T = \mathcal{J}c_{k1}\Delta_{k1} + \mathcal{J}c\Delta_6 + \mathcal{J}c_{k2}\Delta_{k3}, \quad (17)$$

или

$$F_T = \mathcal{J}c_{k1}\Delta_{k1} + \mathcal{J}c\Delta_6 + \mathcal{J}c\mu_{тр}^3\Delta_6; \quad (18)$$

$$F_T = 100000 \cdot 0,0024 + 20000 \cdot 0,09 + 0,09 \cdot 0,28 \cdot 20000 = 2544 \text{ кН.}$$

Пятый участок силовой характеристики $F_{п.а5}(x)$ – линия $\Gamma\mathcal{Ж}$ на рисунке 2. Переход на этот участок происходит после того, как относительное перемещение $x(t)$ достигает предельного значения $\Delta_6 + \Delta_{k3}$ и начинает уменьшаться. При этом скорость $\dot{x}(t)$ будет отрицательной, поэтому функция $\text{sign } \dot{x}(t)$ и сила упругого несущего элемента $F_{ун} = \mathcal{J}c_{k2} \cdot x(t)$ также будут отрицательными. Уравнение линии $\Gamma\mathcal{Ж}$ запишем в виде:

$$F_{п.а5}(x) = F_{\Gamma\mathcal{Ж}} = \begin{cases} \mathcal{J}c_{k1}\Delta_{k1} + \mathcal{J}c\Delta_6 + \mathcal{J}c_{k2}\Delta_{k3} + \mathcal{J}c_{k2}x(t) \\ \text{при } 0,5\Delta_0 + \Delta_{k1} + \Delta_{k2} + \Delta_6 + \Delta_{k3} \geq x(t) > 0,5\Delta_0 + \Delta_{k1} + \Delta_6 - \Delta_{k3} \text{ и } \dot{x}(t) < 0; \\ \mathcal{J}c_{k1}\Delta_{k1} + \mathcal{J}c\Delta_6 - \mathcal{J}c_{k2}\Delta_{k3} + \mathcal{J}c_{k2}x(t) \\ \text{или } 0,5\Delta_0 + \Delta_{k1} + \Delta_6 - \Delta_{k3} < x(t) \leq 0,5\Delta_0 + \Delta_{k1} + \Delta_{k2} + \Delta_6 + \Delta_{k3} \text{ и } \dot{x}(t) > 0. \end{cases} \quad (19)$$

При этом в точке $\mathcal{Ж}$

$$\begin{aligned} F_{\mathcal{Ж}} &= F_D - \mathcal{J}c_{k2}\Delta_{k3} = \mathcal{J}c_{k1}\Delta_{k1} + \mathcal{J}c\Delta_6 - \mathcal{J}c_{k2}\Delta_{k3} = \\ &= \mathcal{J}c_{k1}\Delta_{k1} + \mathcal{J}c\Delta_6 - \mathcal{J}c_{k2}\mu_{тр}^3\Delta_6 (\mathcal{J}c / \mathcal{J}c_{k2}) = \mathcal{J}c_{k1}\Delta_{k1} + \mathcal{J}c\Delta_6 (1 - \mu_{тр}^3), \end{aligned} \quad (20)$$

откуда

$$F_{\mathcal{Ж}} = 100000 \cdot 0,0024 - 20000 \cdot 0,09 \cdot (1 - 0,28) = 240 + 1296 = 1536 \text{ кН.}$$

В точке D деформация составит $\Delta_D = 0,5\Delta_0 + \Delta_{k1} + \Delta_6$ и

$$F_D = \mathcal{J}c_{k1}\Delta_{k1} + \mathcal{J}c\Delta_6 + \mathcal{J}c_{k2}\Delta_{k3} - \mathcal{J}c_{k2}\Delta_{k3} = \mathcal{J}c_{k1}\Delta_{k1} + \mathcal{J}c\Delta_6 \quad (21)$$

или

$$F_D = \mathcal{J}_{к1} \Delta_{к1} + \mathcal{J}_6 \Delta_6, \quad (22)$$

что полностью совпадает с выражением (16).

Шестой участок характеристики $F_{п.а6}(x)$ – линия DE на рисунке 2 – появляется в том случае, если после перехода в точку D перемещение $x(t)$ начнет увеличиваться. На этом участке происходит деформация корпуса автосцепки и других, ранее перечисленных деталей, что вызывает, как и на втором участке, появление упругой силы $F_{ДЕ}$. Если же после перехода в точку E перемещение $x(t)$ начнет уменьшаться, то упругая сила $F_{ЕД}$ также начнет уменьшаться:

$$F_{п.а6}(x) = F_{ДЕ} = F_{ЕД} = \begin{cases} \mathcal{J}_{к1} \Delta_{к1} + \mathcal{J}_6 \Delta_6 + \mathcal{J}_{к1} x(t) \\ \text{при } 0,5\Delta_0 + \Delta_{к1} + \Delta_6 < x(t) \leq 0,5\Delta_0 + \Delta_{к1} + \Delta_6 + \Delta_E \text{ и } \dot{x}(t) > 0; \\ \mathcal{J}_{к1} (\Delta_{к1} + \Delta_E) + \mathcal{J}_6 \Delta_6 - \mathcal{J}_{к1} x(t) \\ \text{или } 0,5\Delta_0 + \Delta_{к1} + \Delta_6 + \Delta_E > x(t) \geq 0,5\Delta_0 + \Delta_{к1} + \Delta_6 \text{ и } \dot{x}(t) > 0. \end{cases} \quad (23)$$

При этом упругая сила F_D в точке D , как и ранее, будет равна 2040 кН.

Седьмой участок характеристики $F_{п.а7}(x)$ – линия $ЖЗ$ на рисунке 2 – появляется при дальнейшем уменьшении $x(t)$. На этом участке происходит снижение деформации пружины в пределах от

$$0,5\Delta_0 + \Delta_{к1} + \Delta_6 - \Delta_{к3} = 0,0325 + 0,0024 + 0,09 - 0,001 = 0,1239 \text{ м}$$

до

$$0,5\Delta_0 + \Delta_{к1} - \Delta_{к2} = 0,0325 + 0,0024 - 0,00013 = 0,03477 \text{ м}$$

и появляется упругая сила $\mathcal{J} \cdot x(t)$:

$$F_{п.а7}(x) = F_{ЖЗ} = \begin{cases} \mathcal{J}_{к1} \Delta_{к1} + \mathcal{J}_6 \Delta_6 - \mathcal{J}_{к2} \Delta_{к3} - \mathcal{J}_{к2} x(t) \\ \text{при } 0,5\Delta_0 + \Delta_{к1} + \Delta_6 - \Delta_{к3} \geq x(t) > 0,5\Delta_0 + \Delta_{к1} - \Delta_{к2} \text{ и } \dot{x}(t) < 0. \end{cases} \quad (24)$$

Сила F_3 в точке 3 с учетом выражения (14) определится уравнением

$$\begin{aligned} F_3 &= F_{Ж} - (\mathcal{J}_6 \Delta_6 - \mathcal{J}_{к2} \Delta_{к3} + \mathcal{J}_{к2} \Delta_{к2}) = \\ &= \mathcal{J}_{к1} \Delta_{к1} + \mathcal{J}_6 \Delta_6 - \mathcal{J}_{к2} \Delta_{к3} - \mathcal{J}_6 \Delta_6 + \mathcal{J}_{к2} \Delta_{к3} - \mathcal{J}_{к2} \Delta_{к2} = \\ &= \mathcal{J}_{к1} \Delta_{к1} - \mathcal{J}_{к2} \Delta_{к2} = \mathcal{J}_{к1} \Delta_{к1} - \mu_{тр}^3 \mathcal{J}_6 \Delta_{п.с}, \end{aligned} \quad (25)$$

откуда

$$F_3 = 100000 \cdot 0,0024 - 0,28 \cdot 20000 \cdot 0,012 = 172,3 \text{ кН.}$$

Отметим, что выражения (11) и (25) для F_3 полностью совпали, что свидетельствует о правильности предложенной математической модели.

Таким образом, совокупность уравнений (2) – (25) полностью описывает замкнутую характеристику $АВВГДЕЖЗ$, в которой имеется несимметричный петлевой участок $БВГДЖЗБ$ (см. рисунок 2). Площадь этой петли определяет величину энергии, рассеянной в процессе одного периода работы поглощающего аппарата. Если же переход к разгрузке происходит после частичного разгружения до выбора полного хода аппарата $\Delta_6 - \Delta_{к1}$, то размер петли уменьшается до $ЗВИКЗ$ и рассеиваемая энергия также снижается.

Используя полученные уравнения (3) – (25), выполним описание силовой характеристики $F_{п.а}(x)$ с помощью единой системы уравнений (26).

Полученный график характеристики поглощающего аппарата (см. рисунок 2), достаточно близок к экспериментальному, приведенному на рисунке 3 [6].

$$F_{п.а}(x) = \begin{cases} F_{OA}(x) = F_{AO}(x) = 0, \text{ при } 0 < x(t) \leq 0,5\Delta_0 \text{ и } [\dot{x}(t) > 0 \text{ или } \dot{x}(t) < 0]; \\ F_{AB}(x) = F_{BA}(x) = \mathcal{J}c_{k1}(x(t) + 0,5\Delta_0) \\ \text{при } 0,5\Delta_0 < x(t) < 0,5\Delta_0 + \Delta_{k1} \text{ и } [\dot{x}(t) > 0 \text{ или } \dot{x}(t) > 0]; \\ F_{3B}(x) = \mathcal{J}c_{k1}\Delta_{k1} + \mathcal{J}c_{k2}x(t) \\ \text{при } 0,5\Delta_0 + \Delta_{k1} - \Delta_{k2} \leq x(t) < 0,5\Delta_0 + \Delta_{k1} + \Delta_{k2} \text{ и } \dot{x}(t) > 0; \\ F_{BG}(x) = \mathcal{J}c_{k1}\Delta_{k1} + \mathcal{J}c\Delta_6 + \mathcal{J}c_{k2}x(t) \\ \text{при } 0,5\Delta_0 + \Delta_{k1} + \Delta_{k2} < x(t) \leq 0,5\Delta_0 + \Delta_{k1} + \Delta_{k2} + \Delta_6 + \Delta_{k3} \text{ и } \dot{x}(t) > 0; \\ F_{ГЖ}(x) = \mathcal{J}c_{k1}\Delta_{k1} + \mathcal{J}c\Delta_6 + \mathcal{J}c_{k2}\Delta_{k3} - \mathcal{J}c_{k2}x(t) \\ \text{при } 0,5\Delta_0 + \Delta_{k1} + \Delta_{k2} + \Delta_6 + \Delta_{k3} \geq x(t) > 0,5\Delta_0 + \Delta_{k1} + \Delta_6 - \Delta_{k3} \text{ и } \dot{x}(t) < 0; \\ F_{ГЖ}(x) = \mathcal{J}c_{k1}\Delta_{k1} + \mathcal{J}c\Delta_6 - \mathcal{J}c_{k2}\Delta_{k3} + \mathcal{J}c_{k2}x(t) \\ \text{или } 0,5\Delta_0 + \Delta_{k1} + \Delta_6 - \Delta_{k3} < x(t) \leq 0,5\Delta_0 + \Delta_{k1} + \Delta_{k2} + \Delta_6 + \Delta_{k3} \text{ и } \dot{x}(t) > 0; \\ F_{ДЕ}(x) = \mathcal{J}c_{k1}\Delta_{k1} + \mathcal{J}c\Delta_6 + \mathcal{J}c_{k1}x(t) \\ \text{при } 0,5\Delta_0 + \Delta_{k1} + \Delta_6 < x(t) \leq 0,5\Delta_0 + \Delta_{k1} + \Delta_6 + \Delta_E \text{ и } \dot{x}(t) > 0; \\ F_{ED}(x) = \mathcal{J}c_{k1}(\Delta_{k1} + \Delta_E) + \mathcal{J}c\Delta_6 - \mathcal{J}c_{k1}x(t) \\ \text{или } 0,5\Delta_0 + \Delta_{k1} + \Delta_6 + \Delta_E > x(t) \geq 0,5\Delta_0 + \Delta_{k1} + \Delta_6 \text{ и } \dot{x}(t) > 0; \\ F_{ЖЗ}(x) = \mathcal{J}c_{k1}\Delta_{k1} + \mathcal{J}c\Delta_6 - \mathcal{J}c_{k2}\Delta_{k3} - \mathcal{J}c_{k2}x(t) \\ \text{при } 0,5\Delta_0 + \Delta_{k1} + \Delta_6 - \Delta_{k3} \geq x(t) > 0,5\Delta_0 + \Delta_{k1} - \Delta_{k2} \text{ и } \dot{x}(t) < 0. \end{cases} \quad (26)$$

Различие между рисунками 2 и 3 состоит только в том, что на рисунке 3 отсутствуют линии *AB* и *DE*, характеризующие нагруженность поглощающего аппарата в таких режимах его работы, когда не происходит деформация пружин.

Отметим также, что при изменении силы $F_{п.а}$ во времени, т. е. при $F_{п.а}(t)$, в дополнении к уравнениям статической характеристики (26) необходимо учитывать диссипативное слагаемое $\beta\dot{\Delta}$, входящее в выражение (2).

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Разработанная математическая модель пружинного поглощающего аппарата автосцепки учитывает все режимы его работы и деформацию конструктивных элементов, передающих продольную силу от корпуса автосцепки на поглощающий аппарат.

2. График силовой статической характеристики поглощающего аппарата, построенный по разработанной модели, уточняет вид характеристики этого аппарата, приведенный ранее в работах Блохина Е. П. и Манашкина Л. А.

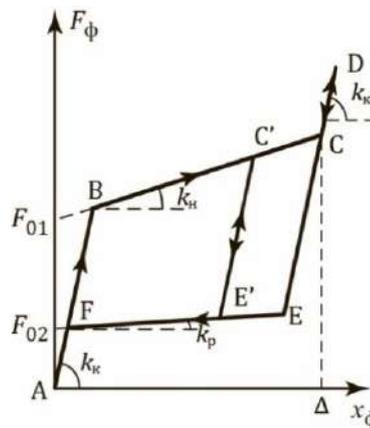


Рисунок 3 – Вид характеристики поглощающего аппарата типа Ш-2-В

Список литературы

1. Савоськин, А. Н. Характеристики упруго-фрикционных комплектов рессорного подвешивания / А. Н. Савоськин, Ю. С. Ромен, А. П. Васильев. – Текст : непосредственный //

Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2019. – Т. 16. – № 2. – С. 275–284. – EDN WZBXMT.

2. Савоськин, А. Н. Силовая характеристика упруго-фрикционного поглощающего аппарата автосцепки / А. Н. Савоськин, О. Е. Пудовиков, А. А. Чучин. – Текст : непосредственный // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов : материалы VIII всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, посвященной 300-летию Российской академии наук и 100-летию со дня рождения профессора Александра Сергеевича Лисовского, Омск, 14–15 ноября 2024 года / Омский государственный университет путей сообщения. – Омск, 2024. – С. 258–265. – EDN QQSIAS.

3. Механическая часть тягового подвижного состава / И. В. Бiryukov, А. Н. Савоськин, Г. П. Бурчак [и др.] ; под ред. И. В. Бiryukova. – Москва : Альянс, 2013. – 440 с. – Текст : непосредственный.

4. Вагоны : Конструкция, теория и расчет / Л. А. Шадур, И. И. Челноков, Л. Н. Никольский [и др.] ; под ред. Л. А. Шадура и И. И. Челнокова. – Москва : Транспорт, 1965. – 440 с. – Текст : непосредственный.

5. ГОСТ 32913–2014. Аппараты поглощающие сцепных и автосцепных устройств железнодорожного подвижного состава. Технические требования и правила приемки. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 12 с. – Текст : непосредственный.

6. Блохин, Е. П. Динамика поезда (нестационарные продольные колебания) / Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин. – Москва : Транспорт, 1982. – 222 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Savoskin A.N., Romen Yu.S., Vasiliev A.P. Characteristics of elastic friction sets of bogie suspension. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia – Proceedings of Petersburg transport university*, 2019, vol. 16, no. 2, pp. 275-284. EDN WZBXMT. (In Russian).

2. Savos'kin A.N., Pudovikov O.E., Chuchin A.A. [The power characteristic of the elastic-friction the absorbing device of the automatic coupling]. *Ékspluatatsionnaia nadezhnost' lokomotivnogo parka i povyshenie éffektivnosti tiagi poezdov : materialy VIII vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posviashchennoi 300-letiiu Rossiiskoi akademii nauk i 100-letiiu so dnia rozhdeniia professora Aleksandra Sergeevicha Lisovskogo, Omsk, 1415 noiabria 2024 goda* [Operational reliability of the locomotive fleet and increasing the efficiency of train traction : proceedings of the VIII All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation dedicated to the 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences and the 100th anniversary of the birth of Professor Alexander Sergeevich Lisovsky, Omsk, November 14-15, 2024]. Omsk, 2024, pp. 258-265. EDN QQSIAS. (In Russian).

3. Biryukov I.V. ed. *Mekhanicheskaiia chast' tiagovogo podvizhnogo sostava* [Mechanical part of traction rolling stock]. Moscow, The Alliance Publ., 2013, 440 p. (In Russian).

4. Shadur L.A., Chelnokov I.I., ed. *Vagony : Konstruktsiia, teoriia i raschet* (Wagons: Design, theory, and calculation). Moscow, Transport Publ., 1965, 440 p. (In Russian).

5. GOST 32913–2014. Shock absorbers for railway rolling stock coupling and automatic coupling devices. Technical requirements and acceptance rules. Moscow, Standardinform Publ., 2015. 12 p. (In Russian).

6. Blokhin E.P., Manashkin L.A. *Dinamika poezda (nestatsionarnye prodol'nye kolebaniia)* [Train dynamics (non-stationary longitudinal oscillations)]. Moscow, Transport Publ., 1982, 222 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Савоськин Анатолий Николаевич

Российский университет транспорта (ПУТ
(МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, 127994, г. Москва,
Российская Федерация.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Savos'kin Anatoly Nikolayevich

Russian University of Transport (MIIT).

9, b. 9 Obraztsova st., Moscow, GSP 4, 127994, the
Russian Federation.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Доктор технических наук, профессор кафедры
«Электропоезда и локомотивы», РУТ(МИИТ).

Тел.: +7 (903) 278-42-50.
E-mail: elmechtrans@mail.ru

Пудовиков Олег Евгеньевич

Российский университет транспорта (РУТ
(МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, 127994, г. Москва,
Российская Федерация.

Доктор технических наук, заведующий кафедрой
«Электропоезда и локомотивы», РУТ(МИИТ).

Тел.: +7 (916) 182-78-24.
E-mail: olegep@mail.ru

Чучин Антон Александрович

Российский университет транспорта (РУТ
(МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, 127994, г. Москва,
Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Электропоезда и локомотивы», РУТ(МИИТ).

Тел.: +7 (926) 122-63-96.
E-mail: chuchin_anton@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Савоськин, А. Н. Уточнение модели силовой
характеристики поглощающего аппарата автосцепки /
А. Н. Савоськин, О. Е. Пудовиков, А. А. Чучин. –
Текст : непосредственный // Известия Транссиба. –
2025. – № 4 (64). – С. 2 – 10.

Doctor of Sciences in Engineering, professor of the
department "Electric trains and locomotives", RUT
(MIIT).

Phone: +7 (903) 278-42-50.
E-mail: elmechtrans@mail.ru

Pudovikov Oleg Evgenievich

Russian University of Transport (MIIT).

9, b. 9 Obraztsova st., Moscow, GSP 4, 127994, the
Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, head of the
department "Electric trains and locomotives", RUT
(MIIT).

Phone: +7 (916) 182-78-24.
E-mail: olegep@mail.ru

Chuchin Anton Aleksandrovich

Russian University of Transport (MIIT).

9, b. 9 Obraztsova st., Moscow, GSP 4, 127994, the
Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the
department "Electric trains and locomotives", RUT
(MIIT).

Phone: +7 (926) 122-63-96.
E-mail: chuchin_anton@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Savos'kin A.N., Pudovikov O.E., Chuchin A.A. The
automatic coupling absorbing apparatus power
characteristics model correction. *Journal of Transsib
Railway Studies*, 2025, no. 4 (64), pp. 2-10. (In Russian).

УДК 621.331:621.311 + 06

В. А. Осипов, В. Н. Черных

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МИНИМАЛЬНО НЕОБХОДИМОГО КОЛИЧЕСТВА ТЕНЗОДАТЧИКОВ ДЛЯ КОРРЕКТНОГО КОНТРОЛЯ ГОЛОЛЕДНОЙ НАГРУЗКИ В СОСТАВЕ АСКВП

Аннотация. В статье приводятся результаты исследования, проводимого в рамках работ по созданию системы раннего обнаружения гололеда на контактной сети. В данной работе приводится анализ механического отклика блочных компенсаторных систем контактной сети на приращения массы контактного провода и несущего троса, возникающие при гололедообразовании, в составе автоматизированной системы контроля веса проводов (АСКВП). Задача данной статьи заключается в математическом обосновании минимально необходимого количества тензометрических датчиков, обеспечивающих корректное определение изменения веса компенсированной контактной подвески при использовании двухблочных и трехблочных компенсирующих устройств.

Для исследования использованы уравнения статики и геометрические соотношения, описывающие силовое равновесие ветвей канатов в компенсаторе с учетом переменных углов отклонения. Получены аналитические выражения, связывающие параметры конструкции компенсирующих устройств с силой реакции в точке крепления компенсатора к анкерной опоре и с усилиями в отдельных ветвях системы. На основе анализа

приведенных уравнений показано, что корректное определение факта наличия гололедной нагрузки предлагаемым способом требует установки расчетного числа тензометрических датчиков.

Установлено, что для двухблочной схемы компенсации минимально необходимое количество тензодатчиков равно двум, а для трехблочной схемы – трем. Показано, что приращение гололедной нагрузки может быть интерпретировано как малое приращение веса контактного провода, вызывающее соответствующие изменения измеряемых усилий.

Ключевые слова: контактная сеть, гололедообразование, автоматизированная система контроля веса проводов, компенсатор натяжения, двухблочная система, трехблочная система, тензометрический контроль, математическая модель.

Vladimir A. Osipov, Vladimir N. Chernykh

Rostov State Transport University (RSTU), Rostov-on-Don, the Russian Federation

MATHEMATICAL JUSTIFICATION OF THE MINIMUM REQUIRED NUMBER OF STRAIN GAUGES FOR ACCURATE ICE LOAD MONITORING IN AN AUTOMATED OVERHEAD CONTACT WIRE MONITORING SYSTEM

Abstract. *Subject, purpose of work:* This article analyzes the mechanical response of block compensator systems in overhead contact wires to mass increments from ice accretion. The work formally describes force interactions in two-block and three-block configurations and determines the sensitivity of reaction forces at attachment points to localized weight increases.

Method or methodology: Using static equilibrium equations and geometric relationships, the study derives expressions for calculating compensator support forces while varying conductor mass and parameters. The analysis provides detailed formulas for reaction forces, deflection angles, and horizontal tension components. Through linearization, we establish sensitivity estimates for system response to small mass increments modeling initial ice formation stages.

Work results: We demonstrate that increasing the number of blocks fundamentally alters force equilibrium structure and produces distinctly different sensitivity values. The study derives mathematical expressions enabling calculation of compensator support forces under varying conditions.

Scope of results: The results enable practical applications in force sensor placement, weight measurement algorithms, engineering calculations for tension sections, and contact suspension behavior modeling under variable loading conditions.

Conclusions: Our findings substantiate the effectiveness of mathematical block compensator models for quantitative diagnostics of overhead contact wire systems during winter operations and establish the methodological foundation for further research investigations.

Keywords: overhead contact wire system, ice accretion, automated wire weight monitoring system, tension compensator, two-block configuration, three-block configuration, strain gauge monitoring, mathematical model.

Гололедообразование на элементах контактной сети остается одной из ключевых проблем эксплуатации электрифицированных железных дорог в зимний период. Накопление льда на контактном проводе и несущем тросе приводит к изменению массы подвески, перераспределению натяжений и видоизменению геометрии провеса, что сказывается на устойчивости токосъема и увеличивает вероятность технических отказов. Проблема гололедообразования на проводах контактной сети рассматривается в исследованиях [1, 2], где подчеркивается, что отсутствие системы оперативного контроля массы льда и недостаточность средств его удаления значительно повышают риск отказов оборудования и экономические потери в процессе эксплуатации. В этих условиях важнейшей задачей для служебного персонала и служб дорожной эксплуатации становится своевременное и достоверное обнаружение начальных стадий накопления гололеда, при которых профилактические мероприятия [3] наиболее эффективны и экономичны.

Существующие практики контроля в основном опираются на визуальный осмотр, периодические рейдовые обследования и косвенные признаки, что не обеспечивает непрерывного и количественно обоснованного мониторинга. Одним из перспективных направлений повышения информативности диагностики является прямое измерение механических параметров подвески в узлах компенсирующих устройств. В таких точках изменения массы и

геометрии проявляются наиболее выражено, и корректно организованные измерения позволяют регистрировать даже малые приращения веса, соответствующие ранним стадиям обледенения.

В настоящей работе поставлена задача системного математического анализа двух ключевых конфигураций блочных компенсаторов – двухблочной и трехблочной схем. Основная цель исследования – получить формальные выражения, связывающие параметры конструкции и режимные нагрузки с силой реакции опоры в точке крепления, проанализировать чувствительность систем к локальным приращениям массы провода и оценить особенности интерпретации измерительного сигнала в зависимости от конфигурации компенсатора. Такое сравнение важно как для метрологического обоснования места установки измерительного органа, так и для разработки алгоритмов обработки сигналов в практических системах мониторинга.

Методологически работа опирается на классические уравнения статики и геометрические соотношения для ветвей канатов, при этом акцент сделан на выделении общих для обеих конфигураций шагов вывода и на подробном разборе тех этапов, где появление дополнительного блока принципиально меняет структуру уравнений. Для инженерной применимости полученных результатов выполнена первичная верификация модели на масштабированной лабораторной установке; экспериментальные замечания используются лишь как подтверждение основных закономерностей и не претендуют на полноценную статистическую оценку в полевых условиях.

Логично начать аналитическую часть с рассмотрения двухблочной конфигурации компенсатора. В предыдущих работах авторов [4 – 7], где подробно анализировалась блочно-полиспастная система с точки зрения распределения сил и геометрии ветвей, были получены ключевые исходные зависимости и сделаны выводы, которые легли в основу практической реализации предложенной автоматизированной системы контроля веса проводов – АСКВП, защищенной патентом [8]. Двухблочная схема представляется здесь как базовая модель: она сохраняет фундаментальные механизмы передачи усилий, обеспечивает наглядную связь между приращением массы провода и приростом силы в точке крепления и служит удобной отправной точкой для последующего перехода к более сложным многоблочным конфигурациям.

Для наглядности ниже представлена силовая схема двухблочной конфигурации компенсатора, на которой показаны ветви, блоки, грузовые силы и углы; эта схема будет использована в дальнейшем при выводе уравнений равновесия и оценке приращения сигналов датчиков (рисунок 1).

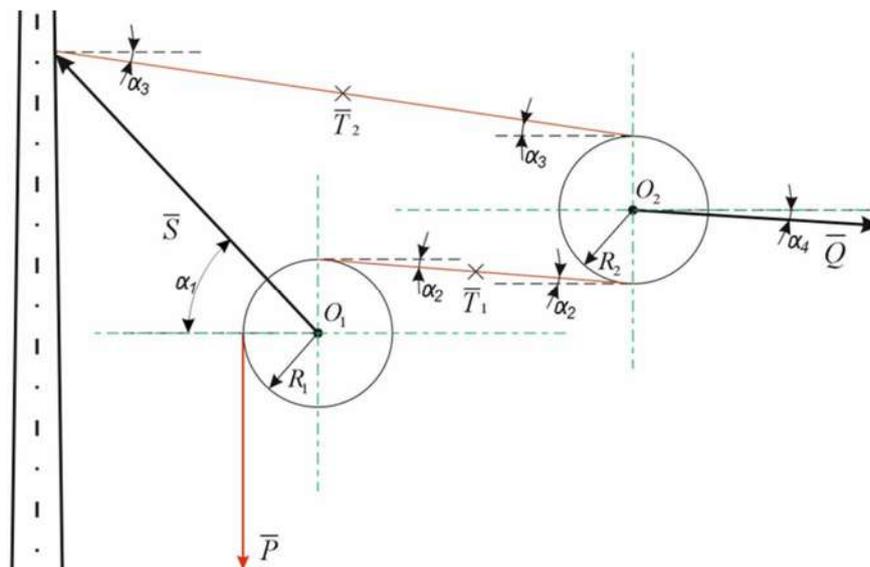


Рисунок 1 – Математическая модель силовой схемы двухблочной системы компенсации натяжения проводов

В ряде общераспространенных конфигураций закрытая аналитическая формула, выражающая силу S непосредственно через заданные параметры системы, не выводится из-за нетривиальной зависимости углов и геометрии от нагрузок. В практической постановке задачу удобнее формулировать через систему уравнений равновесия, связывающих неизвестные углы ветвей с известными параметрами (включая массу провода и веса грузов компенсатора). Дальнейшие инженерные оценки чувствительности проводятся путем решения этой системы и линеаризации зависимости приращения силы по отношению к малым приращениям массы провода.

На рисунке 1 обозначено:

S – сила реакции опоры в точке крепления;

P – сила тяжести груза;

Q – результирующая сила, приложенная на выходе из системы к анкерной опоре;

T_1, T_2 – усилие в ветвях каната до и после подвижного блока;

α_i – углы отклонения канатов.

Система уравнений сил и моментов для точки O_1 :

$$\sum F_{kx} = 0: \quad T_1 \cos \alpha_2 - S \cos \alpha_1 = 0; \quad (1)$$

$$\sum F_{ky} = 0: \quad S \sin \alpha_1 - T_1 \sin \alpha_1 - P = 0; \quad (2)$$

$$\sum M = 0: \quad T_1 R_1 - P R_1 = 0. \quad (3)$$

Из уравнения (3) получим:

$$T_1 = P. \quad (4)$$

Подставим соотношение (4) в формулы (1) и (2), получим:

$$P \cdot \cos \alpha_2 = S \cdot \cos \alpha_1; \quad (5)$$

$$S \cdot \sin \alpha_1 = P \cdot \sin \alpha_2 + P. \quad (6)$$

Из уравнений (5) и (6) выражаем \cos и \sin угла α_2 :

$$\cos \alpha_2 = \frac{S}{P} \cos \alpha_1. \quad (7)$$

$$\sin \alpha_2 = \frac{S \cdot \sin \alpha_1 - P}{P}. \quad (8)$$

Подставив формулы (7) и (8) в основное тригонометрическое тождество, получим:

$$\left(\frac{S}{P} \cdot \cos \alpha_1 \right)^2 + \left(\frac{S \cdot \sin \alpha_1 - P}{P} \right)^2 = 1. \quad (9)$$

Упростим выражение (9) и выразим его через основное тригонометрическое тождество:

$$S^2 - 2P \cdot S \cdot \sin \alpha_1 = 0; \quad (10)$$

$$\sin \alpha_1 = \frac{S}{2P}. \quad (11)$$

Таким образом,

$$\alpha_1 = \arcsin \left(\frac{S}{2P} \right). \quad (12)$$

Аналогично из уравнения (5) с использованием $\cos \alpha = \sqrt{1 - \sin^2 \alpha}$ получим:

$$\alpha_2 = \arccos \left(\frac{S}{P} \sqrt{1 - \left(\frac{S}{2P} \right)^2} \right). \quad (13)$$

Система уравнений сил и моментов для точки O_2 :

$$\sum F_{kx} = 0: \quad Q \cdot \cos \alpha_4 - T_1 \cdot \cos \alpha_2 - T_2 \cdot \cos \alpha_3 = 0; \quad (14)$$

$$\sum F_{ky} = 0: -Q \cdot \sin \alpha_4 + T_1 \cdot \sin \alpha_2 + T_2 \cdot \sin \alpha_3 = 0; \quad (15)$$

$$\sum M = 0: T_1 \cdot R_2 - T_2 \cdot R_2 = 0. \quad (16)$$

Из формулы (16) получим:

$$T_1 = T_2 = P. \quad (17)$$

Подставим соотношение (17) в формулы (14) и (15), получим:

$$Q \cdot \cos \alpha_4 = P \cdot \cos \alpha_2 + P \cdot \cos \alpha_3; \quad (18)$$

$$Q \cdot \sin \alpha_4 = P \cdot \sin \alpha_2 + P \cdot \sin \alpha_3. \quad (19)$$

Выразим α_3 через α_2 , зная, что

$$Q^2 = P^2 \cdot [(\cos \alpha_2 + \cos \alpha_3)^2 + (\sin \alpha_2 + \sin \alpha_3)^2]. \quad (20)$$

После упрощений и применения формулы косинуса разности получим:

$$\cos(\alpha_2 - \alpha_3) = \frac{Q^2}{2P^2} - 1. \quad (21)$$

Из уравнения (21) следует, что

$$\alpha_3 = \alpha_2 - \arccos\left(\frac{Q^2}{2P^2} - 1\right). \quad (22)$$

Угол α_4 определяется из соотношения

$$\alpha_4 = \arccos\left(\frac{P(\cos \alpha_2 + \cos \alpha_3)}{Q}\right). \quad (23)$$

На выходе из модели получены выражения для углов и сил в виде функций от S и Q :

$$\alpha_1 = \arcsin\left(\frac{S}{2P}\right); \quad (24)$$

$$\alpha_2 = \arccos\left(\frac{S}{P} \sqrt{1 - \left(\frac{S}{2P}\right)^2}\right); \quad (25)$$

$$\alpha_3 = \alpha_2 - \arccos\left(\frac{Q^2}{2P^2} - 1\right); \quad (26)$$

$$\alpha_4 = \arccos\left(\frac{P(\cos \alpha_2 + \cos \alpha_3)}{Q}\right). \quad (27)$$

Зависимости (24) – (27) однозначно показывают, что для определения углов и весовой нагрузки необходимо как минимум два измеряемых параметра: S и Q .

Рассмотрим схему трехблочного компенсатора, представленную на рисунке 2, обозначения аналогичны с принятыми к рисунку 1.

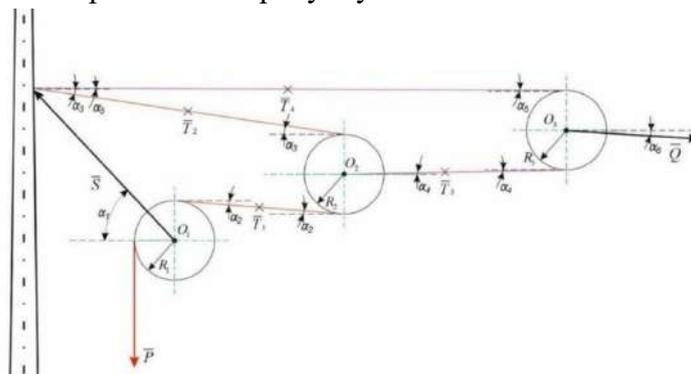


Рисунок 2 – Силевая схема трехблочного компенсатора

Кинематические и статические предпосылки, лежащие в основе анализа двухблочной системы, сохраняют свою применимость и для трехблочного варианта, поскольку принятые допущения о гибкости канатов, отсутствии трения и сосредоточенном характере нагрузок не меняются при усложнении схемы. На ранних этапах аналитического вывода обе конфигурации развиваются по идентичной логике: формулируются уравнения равновесия для блоков, задаются связи между ветвями каната, производится обозначение углов и компонентов сил. Указанные преобразования приводят к соотношениям вида (1) – (13).

В отличие от двухблочного варианта, где решение замыкалось на единственную геометрическую связь между двумя ветвями, трехблочная конфигурация требует учета последовательного перераспределения нагрузок через три промежуточные точки, каждая из которых изменяет ориентацию каната и тем самым влияет на проекции силовых компонентов. Появляется необходимость строгой фиксации взаимного расположения блоков и введения дополнительных углов отклонения, определяющих направление сил в каждой ветви.

Система уравнений сил и моментов для точки O_2 :

$$\sum F_{kx} = 0: T_3 \cdot \cos \alpha_4 - T_1 \cdot \cos \alpha_2 - T_2 \cdot \cos \alpha_3 = 0; \quad (28)$$

$$\sum F_{ky} = 0: -T_3 \cdot \sin \alpha_4 + T_1 \cdot \sin \alpha_2 + T_2 \cdot \sin \alpha_3 = 0; \quad (29)$$

$$\sum M = 0: T_1 \cdot R_2 - T_2 \cdot R_2 = 0. \quad (30)$$

Из уравнения (30) получим:

$$T_1 = T_2 = P. \quad (31)$$

Подставим соотношение (31) в формулы (28) и (29), получим:

$$T_3 \cdot \cos \alpha_4 = P \cdot \cos \alpha_2 + P \cdot \cos \alpha_3; \quad (32)$$

$$T_3 \cdot \sin \alpha_4 = P \cdot \sin \alpha_2 + P \cdot \sin \alpha_3. \quad (33)$$

Угол α_3 определяется путем преобразования уравнений с применением формулы косинуса разности:

$$\cos(\alpha_2 - \alpha_3) = \frac{T_3^2}{2P^2} - 1. \quad (34)$$

Из выражения (34) получаем:

$$\alpha_3 = \alpha_2 - \arccos\left(\frac{T_3^2}{2P^2} - 1\right). \quad (35)$$

Угол α_4 определяется из соотношения

$$\alpha_4 = \arccos\left(\frac{P(\cos \alpha_2 + \cos \alpha_3)}{T_3}\right). \quad (36)$$

Система уравнений сил и моментов для точки O_3 :

$$\sum F_{kx} = 0: Q \cdot \cos \alpha_6 - T_4 \cdot \cos \alpha_5 - T_3 \cdot \cos \alpha_4 = 0; \quad (37)$$

$$\sum F_{ky} = 0: -Q \cdot \sin \alpha_6 + T_4 \cdot \sin \alpha_5 + T_3 \cdot \sin \alpha_4 = 0; \quad (38)$$

$$\sum M = 0: T_3 \cdot R_3 - T_4 \cdot R_3 = 0. \quad (39)$$

Из выражения (39) получим:

$$T_3 = T_4. \quad (40)$$

Подставим равенство (40) в формулы (37) и (38), получим:

$$Q \cdot \cos \alpha_6 = T_3 (\cos \alpha_5 + \cos \alpha_4); \quad (41)$$

$$Q \cdot \sin \alpha_6 = T_3 (\sin \alpha_5 + \sin \alpha_4). \quad (42)$$

Угол α_5 определяется путем преобразования уравнений с применением формулы косинуса разности:

$$\cos(\alpha_4 - \alpha_5) = \frac{Q^2}{2T_3^2} - 1. \quad (43)$$

Из выражения (43) получаем:

$$\alpha_5 = \alpha_4 - \arccos\left(\frac{Q^2}{2T_3^2} - 1\right). \quad (44)$$

Угол α_6 можно выразить как

$$\alpha_6 = \arccos\left(\frac{T_3(\cos \alpha_4 + \cos \alpha_5)}{Q}\right). \quad (45)$$

На выходе из модели получены выражения для углов и сил в виде функций:

$$\alpha_1 = \arcsin\left(\frac{S}{2P}\right); \quad (46)$$

$$\alpha_2 = \arccos\left(\frac{S}{P} \sqrt{1 - \left(\frac{S}{2P}\right)^2}\right); \quad (47)$$

$$\alpha_3 = \alpha_2 - \arccos\left(\frac{Q^2}{2P^2} - 1\right); \quad (48)$$

$$\alpha_4 = \arccos\left(\frac{P(\cos \alpha_2 + \cos \alpha_3)}{Q}\right); \quad (49)$$

$$\alpha_5 = \alpha_4 - \arccos\left(\frac{Q^2}{2T_3^2} - 1\right); \quad (50)$$

$$\alpha_6 = \arccos\left(\frac{T_3(\cos \alpha_4 + \cos \alpha_5)}{Q}\right). \quad (51)$$

Решение данной системы возможно, если известны как минимум три величины: S , Q , T_3 . Через уравнения и тригонометрические зависимости можно получить все углы, а следовательно, рассчитать изменение веса контактного провода, натяжение которого осуществляется трехблочным компенсирующим устройством.

Полученные аналитические зависимости позволяют перейти от формального описания силового равновесия блочных компенсаторных систем к методическому обоснованию структуры измерений, необходимых для корректного контроля гололедной нагрузки. В рамках рассматриваемой задачи под контролируемой величиной понимается приращение веса контактного провода или участка контактной подвески, обусловленное образованием гололедных отложений, которое проявляется в изменении силового состояния компенсирующего устройства.

Для двухблочной схемы компенсации из системы уравнений равновесия и выведенных тригонометрических соотношений следует, что все углы отклонения ветвей каната, а также величина весовой нагрузки однозначно определяются при известности двух независимых параметров – силы реакции опоры в точке крепления компенсатора S и результирующей силы Q , передаваемой на анкерную опору. Таким образом, задача восстановления изменения веса контактного провода в двухблочной конфигурации является определенной только при наличии как минимум двух независимых измерений силовых параметров.

С точки зрения практической реализации автоматизированной системы контроля веса проводов это означает, что минимально необходимое количество тензометрических датчиков для двухблочной схемы равно двум. В качестве таких датчиков могут выступать измерительные элементы, регистрирующие силу реакции в точке крепления компенсатора к анкерной опоре и усилие в анкерной ветви, либо эквивалентные им по информационному

содержанию измерения. Использование меньшего числа датчиков приводит к неопределенности системы и не позволяет однозначно связать измеряемый сигнал с приращением веса провода.

Аналогичный анализ для трехблочной схемы показывает, что усложнение геометрии компенсатора и появление дополнительной промежуточной ветви приводит к увеличению числа независимых параметров, необходимых для восстановления весовой нагрузки. Из полученных выражений следует, что все углы и силовые компоненты в данной конфигурации однозначно определяются только при известности трех величин – силы реакции опоры S , результирующей силы Q и усилия T_3 в одной из внутренних ветвей компенсатора. Следовательно, минимально необходимое количество тензометрических датчиков для трехблочной схемы равно трем.

Таким образом, минимальное количество тензодатчиков в системе контроля определяется не произвольно, а структурой силового равновесия конкретной конфигурации компенсатора. Для двухблочной схемы оно равно двум, для трехблочной – трем, что полностью согласуется с результатами аналитического вывода и обеспечивает возможность однозначного определения изменения веса контактного провода при гололедообразовании.

Список литературы

1. Совершенствование методики оценки риска ущерба от гололедообразования на проводах контактной сети ввиду отсутствия устройств удаления гололеда / А. Н. Смердин, А. В. Тарасенко, И. Е. Чертков, А. С. Голубков. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1 (97). – С. 182–189. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_182. – EDN JQAQIN.

2. Меньшиков, С. А. Анализ систем мониторинга и методов борьбы с гололедом на проводах линий электропередачи и контактной подвеске / С. А. Меньшиков, А. А. Ковалев, Н. А. Аксенов. – Текст : непосредственный // Повышение надежности работы и энергетической эффективности устройств электроснабжения : сборник научных трудов региональной научно-практической конференции / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург, 2025. – С. 127–135. – EDN CIGCGQ.

3. Методические указания по борьбе с гололедом и автоколебаниями на контактной сети, линиях ДПП, автоблокировки и продольного электроснабжения. Кн. 1. Основы профилактического подогрева, плавки гололедно-изморозевых образований и меры борьбы с автоколебаниями проводов контактной сети и высоковольтных линий. – Москва : ОАО «РЖД», 2004. – 132 с. – Текст : непосредственный.

4. Черных, В. Н. Совершенствование системы обнаружения раннего гололедообразования для контактных сетей электрифицированных железных дорог / В. Н. Черных, В. А. Осипов. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2 (94). – С. 110–118. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_110. – EDN LUOTVO.

5. Черных, В. Н. Метод раннего обнаружения гололеда на контактной сети / В. Н. Черных. – Текст : непосредственный // Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи : сборник научных трудов международной научно-практической конференции / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. – Ростов-на-Дону, 2024. – С. 12–15. – EDN PNDASB.

6. Осипов, В. А. Альтернативный способ обнаружения гололедообразования на контактной сети / В. А. Осипов, В. Н. Черных. – Текст : непосредственный // Транспорт: наука, образование, производство : материалы международной научно-практической конференции / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. – Ростов-на-Дону, 2024. – С. 117–120. – EDN SDJHGO.

7. Черных, В. Н. Алгоритмы и техническая реализация автоматизированной системы контроля веса проводов контактной сети / В. Н. Черных, В. А. Осипов. – Текст : непосредственный // Транспорт: наука, образование, производство : сборник научных трудов

международной научно-практической конференции / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. – Ростов-на-Дону, 2025. – С. 103–107. – EDN JYHGRF.

8. Патент № 2823373 С1 Российская Федерация, МПК В60М 1/12, В60М 1/26. Автоматизированная система контроля веса проводов контактной сети железной дороги : № 2024103146 : заявлено 08.02.2024 : опубликовано 22.07.2024 / Осипов В. А., Черных В. Н., Черных Н. В. – EDN АНWHIS.

References

1. Smerdin A.N., Tarasenko A.V., Chertkov I.E., Golubkov A.S. Improvement of the methodology for assessing the risk of damage from ice formation on contact network wires due to the absence of ice removal devices. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya – Bulletin of the Rostov State Transport University*, 2025, no. 1(97), pp. 182-189. https://doi.org/10.46973/0201-727X_2025_1_182. EDN JQAQIN. (In Russian).

2. Men'shikov S.A., Kovalev A.A., Aksenov N.A. [Analysis of monitoring systems and methods of combating ice on power transmission line wires and contact suspension]. *Povyshenie nadezhnosti raboty i energeticheskoi effektivnosti ustroystv elektrosnabzheniia: sbornik nauchnykh trudov regional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Improving the reliability and energy efficiency of power supply devices: proceedings of the regional scientific-practical conference]. Yekaterinburg, 2025, pp. 127-135. EDN CIGCGQ. (In Russian).

3. Guidelines for combating ice and galloping on the contact network, DPR lines, automatic block signaling and longitudinal power supply lines. Book 1. Fundamentals of preventive heating, melting of ice and frost formations and measures to combat galloping of contact network and high-voltage line wires. Moscow: JSCo «RZD» Publ., 2004. 132 p. (In Russian).

4. Chernykh V.N., Osipov V.A. Improving the early ice formation detection system for contact networks of the electrified railways. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya – Bulletin of the Rostov State Transport University*, 2024, no. 2(94), pp. 110-118. https://doi.org/10.46973/0201-727X_2024_2_110. EDN LUOTVO. (In Russian).

5. Chernykh V.N. [Method of early detection of ice on the contact network]. *Energetika transporta. Aktual'nye problemy i zadachi: Sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Transport power engineering. Current problems and tasks: proceedings of the international scientific and practical conference]. Rostov-on-Don, 2024, pp. 12-15. EDN PNDASB. (In Russian).

6. Osipov V.A., Chernykh V.N. [An alternative way to detect ice formation on the contact network]. *Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Transport: science, education, production: proceedings of the international scientific and practical conference]. Rostov-on-Don, 2024, pp. 117-120. EDN SDJHGO. (In Russian).

7. Chernykh V.N., Osipov V.A. [Technical implementation of an automated weight control system for the wires of the contact network]. *Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo: sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Transport: science, education, production: proceedings of the international scientific and practical conference]. Rostov-on-Don, 2025, pp. 103-107. EDN JYHGRF. (In Russian).

8. Osipov V.A., Chernykh V.N., Chernykh N.V. *Patent RU 2823373 C1*, 22.07.2024. EDN АНWHIS. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Осипов Владимир Александрович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС).

Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения пл., зд. 2, г. Ростов-на-Дону, 344038, Российская Федерация.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Osipov Vladimir Alexandrovich

Rostov State Transport University (RSTU).

Rostov Infantry Regiment of the People's Militia Square, building 2, Rostov-on-Don, 344038, the Russian Federation.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники», РГУПС.

Тел.: +7 (863) 272-64-22.

E-mail: ova_toe@rgups.ru

Черных Владимир Николаевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС).

Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения пл., зд. 2, г. Ростов-на-Дону, 344038, Российская Федерация.

Ассистент кафедры «Теоретические основы электротехники», РГУПС.

Тел.: +7 (989) 517-02-36.

E-mail: chernykhvn@rgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Осипов, В. А. Математическое обоснование минимально необходимого количества тензодатчиков для корректного контроля гололедной нагрузки в составе АСКВП / В. А. Осипов, В. Н. Черных. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 4 (64). – С. 10 – 19.

Ph. D. in Engineering, associate professor, head of the department "Theoretical Foundations of Electrical Engineering", RSTU.

Phone: +7 (863) 272-64-22.

E-mail: ova_toe@rgups.ru

Chernykh Vladimir Nikolaevich

Rostov State Transport University (RSTU).

Rostov Infantry Regiment of the People's Militia Square, building 2, Rostov-on-Don, 344038, the Russian Federation.

Assistant of the department "Theoretical Foundations of Electrical Engineering", RSTU.

Phone: +7 (989) 517-02-36.

E-mail: chernykhvn@rgups.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Osipov V.A., Chernykh V.N. Mathematical justification of the minimum required number of strain gauges for accurate ice load monitoring in an automated overhead contact wire monitoring system. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 4 (64), pp. 10-19. (In Russian).

УДК 629.424.3

В. А. Минаков, В. О. Носков

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

РАЗРАБОТКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ СТЕНДА ИМИТАЦИИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ДИЗЕЛЯ

Аннотация. Надежная работа дизельного двигателя локомотива зависит от эффективности и качества работы системы охлаждения, следовательно, важно сохранять оптимальные характеристики ее работы на всем периоде эксплуатации. Система охлаждения разрабатывается индивидуально к каждому типу дизеля, поэтому при проектировании новых дизель-генераторных установок локомотивов необходимо совершенствование систем охлаждения, что является одной из самых главных задач обеспечения надежной и эффективной эксплуатации, при этом важно применение испытательных комплексов для моделирования реальных рабочих процессов, оценки возможностей и оптимизации тепловых режимов. В данной научной работе представлены результаты разработки и эксплуатации стенда имитации работы системы охлаждения с возможностью моделирования различных режимов работы. В основу исследования положен метод физического моделирования тепловых процессов с использованием регулируемых источников тепловой нагрузки и системы контрольно-измерительных приборов. Экспериментальная установка оснащена системой контуров охлаждения с регулируемыми параметрами работы. Разработанный стенд позволяет проводить ресурсные испытания элементов систем охлаждения, оптимизировать алгоритмы управления тепловыми режимами и определения количества генерируемого и отведенного тепла из системы, а также с возможностью отрабатывать методы диагностики неисправностей без использования штатного дизельного оборудования. Практической значимостью стенда является возможность создания методик комплексной оценки динамических характеристик системы охлаждения с возможностью моделирования аварийных ситуаций и исследования переходных процессов перераспределения тепловых потоков, имитирующих реальные процессы. В процессе эксплуатации стенда возможна установка комплексной оценки показателей работы системы охлаждения с учетом показателей теплорассеивания, количества отведенного тепла, показателей интенсивности нагрева-охлаждения при моделировании работы с различным количеством водяных контуров. Применение результатов исследования может быть полезным при разработке новых и модернизации существующих систем охлаждения дизеля, а также при исследовании показателей теплорассеивания при эксплуатации локомотивов в зимний период времени, когда важно сохранения тепла в системе.

Ключевые слова: тепловоз, система охлаждения, автоматическое регулирование, моделирование процессов, прогнозирование.

Vitalii A. Minakov, Vitalii O. Noskov

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

DIESEL ENGINE COOLING SYSTEM OPERATION IMITATION STAND DEVELOPMENT AND OPERATION

Abstract. *The reliable operation of a locomotive's diesel engine depends on the efficiency and quality of the cooling system, therefore, it is important to maintain optimal performance throughout the entire period of operation. The cooling system is developed individually for each type of diesel engine, therefore, when designing new diesel generator sets for locomotives, it is necessary to improve cooling systems, which is one of the most important tasks of ensuring reliable and efficient operation, while it is important to use test complexes to simulate real-world work processes, to obtain estimated capabilities and optimize thermal conditions. This scientific paper presents the results of the development and operation of a stand for simulating the operation of a cooling system, with the possibility of simulating various operating modes. The research is based on the method of physical modeling of thermal processes using controlled heat load sources and a system of control and measuring devices. The experimental installation is equipped with a cooling circuit system with adjustable operating parameters. The developed stand makes it possible to carry out resource tests of cooling system elements, optimize algorithms for controlling thermal conditions and determining the amount of heat generated and discharged from the system, as well as with the ability to work out troubleshooting methods without using standard diesel equipment. The practical significance of the stand is the possibility of creating methods for a comprehensive assessment of the dynamic characteristics of the cooling system with the possibility of modeling emergency situations and investigating transient processes of heat flow redistribution simulating real processes. During the operation of the stand, it is possible to install a comprehensive assessment of the performance of the cooling system, taking into account heat dissipation, the amount of heat removed, and heating-cooling intensity indicators when simulating work with different amounts of water circuits. The application of the research results may be useful in the development of new and modernization of existing diesel cooling systems, as well as in the study of heat dissipation during operation of locomotives in winter, when it is important to preserve heat in the system.*

Keywords: *locomotive, cooling system, automatic regulation, process modeling, forecasting.*

Надежная работа дизельного двигателя является ключевым фактором бесперебойной эксплуатации тепловозов. Одной из наиболее уязвимых и критически важных систем, определяющих ресурс и эффективность дизеля, является система охлаждения. Стабильный тепловой режим двигателя обеспечивает оптимальные условия сгорания топлива, минимизирует износ трущихся деталей, предотвращает термические перегрузки и, как следствие, снижает риск аварийных ситуаций в процессе эксплуатации.

Колебания температуры охлаждающей жидкости выходят за пределы оптимального диапазона по множеству причин, включая изменение нагрузочного режима и работы дизель-генераторной установки (ДГУ), переменные климатические условия и изменение технического состояния элементов самой системы, например, загрязнение секций охлаждения. Существующие системы автоматического регулирования температуры, например с применением термореле или термостатов, реагируют на уже произошедшие изменения, что не всегда позволяет предотвратить критические отклонения от установленных параметров. Это обуславливает необходимость перехода от реактивного контроля к проактивному управлению, основанному на прогнозировании [1].

Система охлаждения тепловоза представляет собой замкнутый контур (холодный и горячий), в котором циркулирует охлаждающая жидкость. Основными элементами системы являются водяная рубашка дизеля, водяной насос, водомасляный теплообменник, секции охлаждения, охладитель наддувочного воздуха и топливоподогреватель.

На изменение температуры охлаждающей жидкости в процессе эксплуатации локомотивов оказывают влияние нагрузка дизеля, позиция контроллера машиниста (КМ), техническое состояние самого дизеля и др. Выполнена оценка изменения температуры охлаждающей жидкости в холодном и горячем контурах, по результатам работы локомотивов серии ТЭМ18ДМ по данным программно-аппаратного комплекса АПК «Борт». На рисунке 1

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

представлены результаты анализа температуры охлаждающей жидкости горячего и холодного контуров охлаждения.

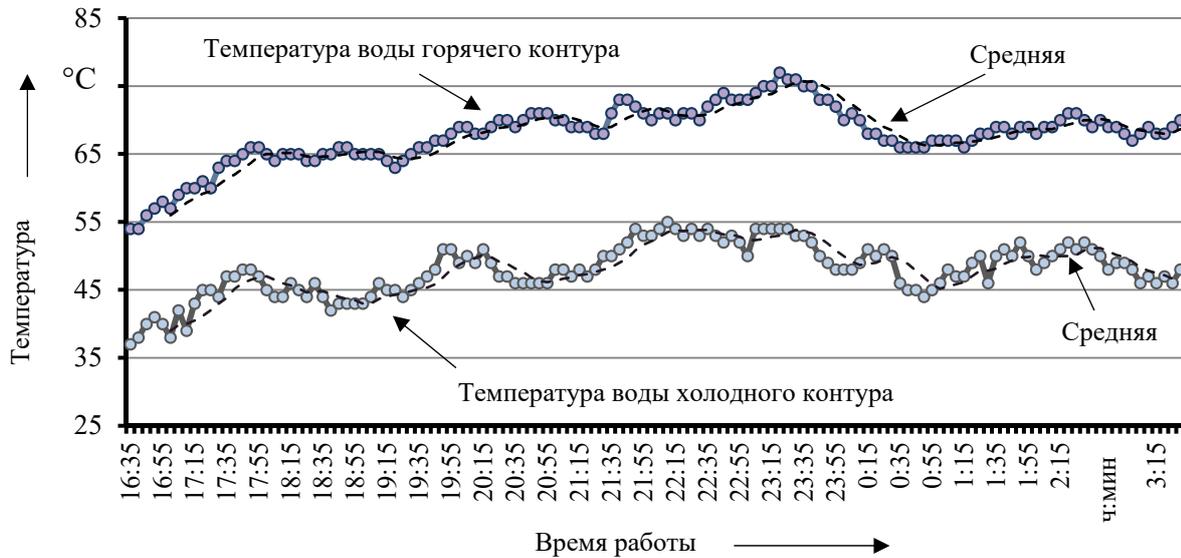


Рисунок 1 – Результаты анализа температуры охлаждающей жидкости горячего и холодного контуров

Результаты анализа температуры охлаждающей жидкости горячего и холодного контуров, позволяют установить, что в процессе эксплуатации тепловозов отклонение температуры составляет 10 – 15 °С, или 20 – 25 % от среднестатистического значения.

Выполнен анализ наличия/отсутствия взаимосвязи между температурой воды холодного и горячего контуров, на основе анализа статистической зависимости полученных отклонений $\Delta T = T_{гор} - T_{хол}$. По результатам полученных данных построены гистограммы для приведенных выше отношений температур ΔT (рисунок 2). Форма гистограммы позволила выдвинуть гипотезы о теоретических законах распределения и отклонений от среднестатистической величины M , что составляет $M = 13,1$ °С.

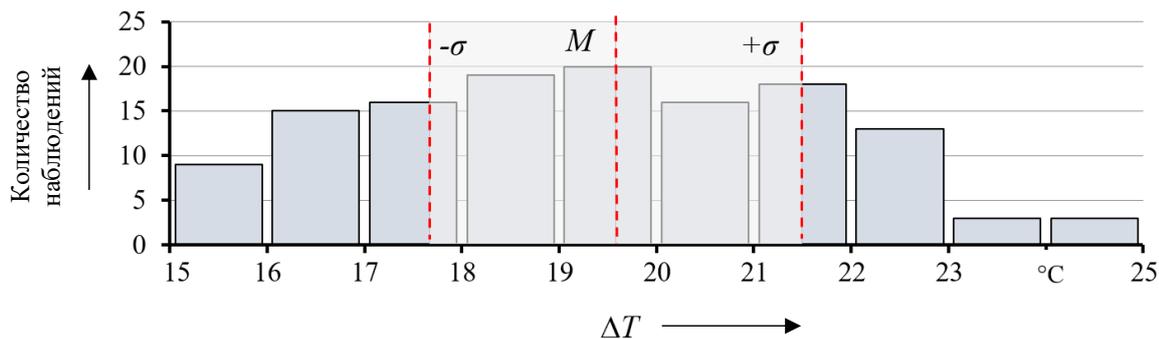


Рисунок 2 – Распределение отношений температур воды холодного и горячего контуров системы охлаждения дизеля

По результатам анализа распределения отношений температур воды холодного и горячего контуров системы охлаждения установлено, что представленные результаты имеют логнормальное распределение со среднестатистическим значением $M = 13,1$; дисперсией $D = 4,8$; среднеквадратическим отклонением $\sigma = 5,82$. Определен критерий Пирсона $r = 0,715$ и коэффициент детерминации $R^2 = 0,511$, что указывает на заметную положительную взаимосвязь средней силы между двумя временными рядами, но их необходимо учитывать в будущих моделях индивидуально.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

По результатам анализа показателей отношений температур охлаждающей жидкости холодного и горячего контуров, а также научных работ [2] можно установить, что в процессе работы дизеля наблюдаются значительные колебания температуры. Подобные колебания [3] напрямую влияют на долговечность, мощность, экономичность и экологичность дизеля, например, термические напряжения и деформации, за счет разного коэффициента теплового расширения деталей и узлов дизеля, изготовленных из разных материалов, или конденсации влаги и образование кислот, когда при недостаточной температуре в картере и системе вентиляции конденсируется влага, смешиваясь с продуктами сгорания и образуя кислоты, что вызывают коррозию внутренних поверхностей и старение моторного масла.

Оптимальный температурный диапазон охлаждающей жидкости дизеля локомотива (воды) составляет 70 – 75 °С. Поддержание температуры в этом диапазоне важно, потому как достигаются максимальная эффективность и экономичность работы двигателя и других вспомогательных систем [4]. Необходимо отметить, что от величины температуры охлаждающей жидкости зависит и температура моторного масла, потому как одними из функций масла являются отвод тепла от трущихся деталей дизеля и передача тепла в воду в водомасляном теплообменнике.

Настоящая работа посвящена разработке стенда имитации работы системы охлаждения дизеля на основе оценки количественной возможности регулирования температур теплоносителей в системе охлаждения.

Для решения задач моделирования и экспериментальных исследований на кафедре «Локомотивы» ОмГУПС разработан стенд имитации работы системы охлаждения дизеля (рисунок 3), включающий в себя трубопроводы, радиатор охлаждения, термореле, перепускной клапан. В качестве источника тепла (имитации работы дизеля) применен трубчатый электрический нагреватель (ТЭН).

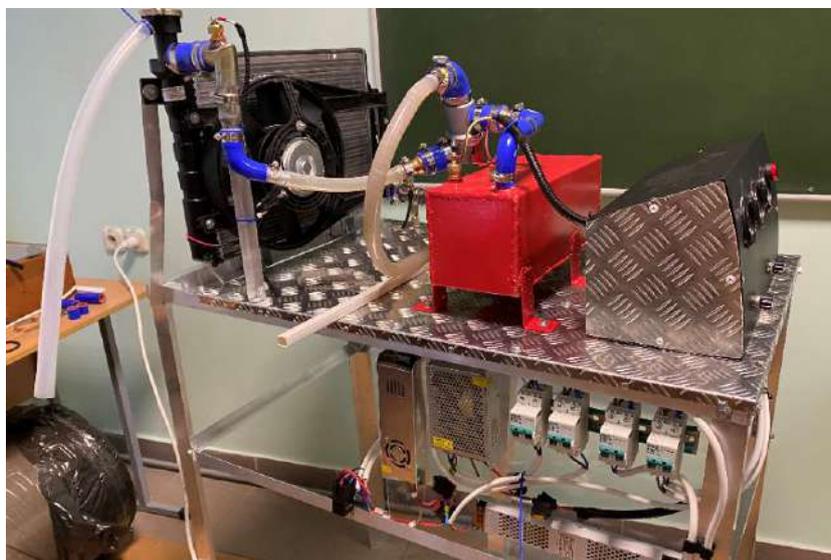


Рисунок 3 – Стенд имитации работы системы охлаждения дизеля

Эксплуатация представленного стенда позволяет установить время и скорость нагрева охлаждающей жидкости, а также устанавливать параметры системы охлаждения (время и продолжительность включения вентилятора). Система оснащена датчиками температуры, водяным насосом, перепускным клапаном, регулируемым микропроцессорной системой в соответствии со схемой, представленной на рисунке 4.

Главной целью при использовании стенда имитации работы системы охлаждения дизеля является оценка температуры нагрева теплоносителя (воды) и управление ею. Для контроля температуры нагрева охлаждающей жидкости применены термопары *DS18B20*. Циркуляцию охлаждающей жидкости по системе обеспечивает водяной насос производительностью 12 м³/ч

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

с диаметром трубопровода $d = 5$ см и скоростью потока воды $v = 1,7$ м/с. Мощность электрического нагревателя, имитирующего дизель $P = 9$ кВт.

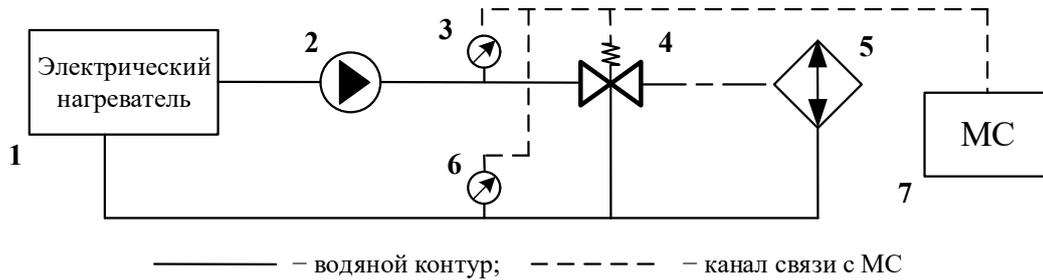


Рисунок 4 – Схема стенда имитации работы системы охлаждения дизеля: 1 – трубчатый электрический нагреватель с водяной емкостью; 2 – водяной насос; 3, 6 – датчик температуры; 4 – переключатель; 5 – радиатор охлаждения

Для комплексной оценки показателей стенда необходимо учитывать показатели теплорассеивания, что является основой инженерных решений при разработке эффективных, надежных и экономичных систем охлаждения. Теплорассеивающая способность рассматриваемого работающего узла системы охлаждения в процессе эксплуатации определяется так [5, 6]:

$$Q^{\text{отвод}} = a F (t^{\text{корп}} - t^{\text{возд}}), \quad (1)$$

где a – коэффициент теплоотдачи, кВт/(м²·°С);

F – поверхность теплообмена узла, м²;

$t^{\text{корп}}$ – температура внешнего корпуса, °С;

$t^{\text{возд}}$ – температура окружающей среды, °С.

Коэффициент теплоотдачи рассчитывается по формуле:

$$a = 0,5 \left(\frac{\overline{Nu} \lambda}{h} + a_1 \right), \quad (2)$$

где \overline{Nu} – критерий Нуссельта;

λ – коэффициент теплопроводности, кВт/(м·°С);

h – высота узла, м;

a_1 – коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции, кВт/(м²·°С).

Критерий Нуссельта [7] определяется в ламинарном режиме как $10^3 < G_{r_{г3}} P_{r_{г3}} < 10^9$.

Показатели критерия Грасгофа $G_{r_{г3}}$ и критерия Прандтля – $P_{r_{г3}}$ определяются по температуре окружающей среды. Определение теплорассеивающей способности водяной системы выполняется путем вычисления показателей теплопередачи на основании теплового баланса по формуле:

$$Q = KF \Delta t, \quad (3)$$

где K – коэффициент теплопередачи, Вт/(м² · К);

F – поверхность теплообмена, м²;

Δt – температурный напор при противотоке охлаждающей жидкости, °С.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Результаты расчета отношения количества отведенного тепла при расчете стенда имитации работы системы охлаждения дизеля представлены на рисунке 5.

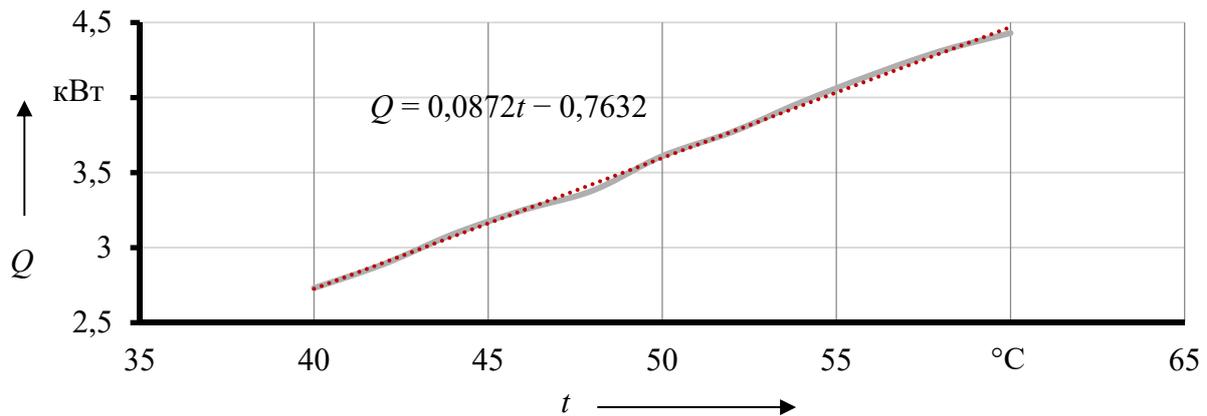


Рисунок 5 – Расчетное отношение количества отведенного тепла стенда имитации работы системы охлаждения дизеля

Проведенные экспериментальные исследования и полученные в результате них количественные расчетные отношения количества отведенного тепла на специализированном стенде имитации работы системы охлаждения дизеля представляют собой существенный практический результат. Установленные зависимости позволяют с высокой степенью достоверности проводить оценку как общего количества, так и интенсивности тепловыделения основными агрегатами, входящими в контур водяной системы силовой установки.

Выполнены эксплуатационные испытания стенда по имитации работы системы охлаждения дизеля, в процессе чего получены характеристики скорости нагрева и охлаждения (рисунок 6). В качестве охлаждающей жидкости использовалась вода с начальной температурой 22 °C.

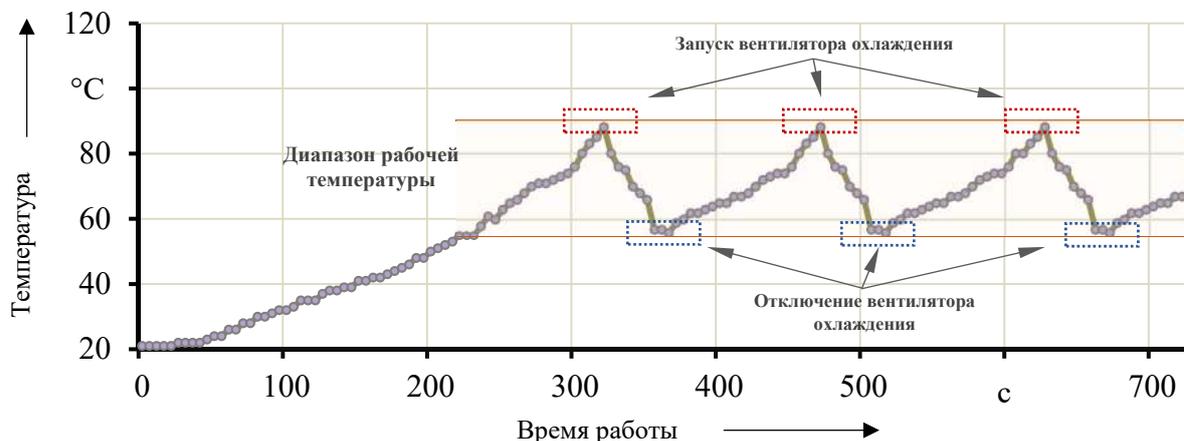


Рисунок 6 – Имитация работы системы охлаждения дизеля

В процессе работы системы охлаждения на разработанном имитационном стенде получены следующие результаты: рабочая температура – 56 – 88 °C с диапазоном 32 °C, время снижения температуры от максимальной к нижней границе составляет 40 с.

Представленный методический подход открывает возможность для выполнения корректных инженерных оценок теплорассеивающей способности ключевых рассматриваемых узлов, таких как водомасляные теплообменники, охладители наддувочного воздуха и элементы самого контура. Подобные испытания являются критически важными для верификации и калибровки существующих математических моделей теплового баланса дизеля, а также для оптимизации конструкции системы охлаждения в целях обеспечения ее

максимальной эффективности и надежности в различных режимах эксплуатации. Эксплуатация стенда может быть полезна при исследовании показателей теплорассеивания элементов системы охлаждения дизеля при эксплуатации локомотивов в зимний период времени, когда важно сохранение тепла в системе.

Таким образом, реализованная методика стендовых испытаний и полученные расчетные соотношения формируют научно-технический задел для дальнейших работ, направленных на повышение тепловой нагруженности и совершенствование систем терморегулирования перспективных дизельных двигателей [8, 9].

Следующими этапами направления работ со стендом имитации работы системы охлаждения дизеля являются исследование процессов сохранения тепла в системе при использовании перепускных дополнительных контуров в системе и разработка интеллектуальной системы управления перераспределения потоков охлаждающей жидкости в системе.

Список литературы

1. Тепловоз ТЭМ18ДМ. Руководство по эксплуатации. – Брянск : ЗАО «УК БМЗ», 2009. – Т. 1. – 138 с. – Текст : непосредственный.
2. Оперативный контроль эффективности работы системы охлаждения тепловоза / С. М. Овчаренко, А. А. Метелев, В. А. Минаков, В. Р. Ведрученко. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2019. – № 4 (40). – С. 9–17. – EDN JQQKBT.
3. Овчаренко, С. М. Предпосылки совершенствования методики нормирования расхода топлива на маневровое и хозяйственное движение с использованием моделей машинного обучения / С. М. Овчаренко, В. А. Минаков. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 2 (46). – С. 24–30. – EDN SJUYWV.
4. Белоглазов, А. К. Влияние температуры окружающей среды на работу системы охлаждения тепловоза и его агрегатов / А. К. Белоглазов, В. О. Носков, А. В. Чулков. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2015. – № 4 (24). – С. 11–17. – EDN VKURKV.
5. Кручек, В. А. Повышение надежности водяной системы тепловозов / В. А. Кручек, В. В. Кручек, П. В. Дворкин. – Текст : непосредственный // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2014. – № 2 (39). – С. 49–53. – EDN SGRTPJ.
6. Кручек, В. В. Улучшение эксплуатационных показателей маневровых тепловозов : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кручек Вячеслав Викторович ; Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – Санкт-Петербург, 2012. – 144 с. – Текст : непосредственный.
7. Методы оценки технического состояния, эксплуатационной экономичности и экологической безопасности дизельных локомотивов / А. И. Володин, Е. И. Сковородников, А. К. Белоглазов [и др.]. – Москва : Желдориздат, 2007. – 264 с. – Текст : непосредственный. – EDN QBFQKB.
8. Сковородников, Е. И. Моделирование системы охлаждения тепловозов с целью оптимизации количества параметров контроля / Е. И. Сковородников, В. А. Михеев. – Текст : непосредственный // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии (Вестник СибАДИ). – 2009. – № 1 (11). – С. 61–66. – EDN PBOINX.
9. Склифус, Я. К. Фазовые переходы теплоносителя в системе охлаждения дизеля тепловоза / Я. К. Склифус. – Текст : непосредственный // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2014. – № 4. – С. 92–95. – EDN TUICRD.

References

1. *Тепловоз ТЭМ18ДМ. Руководство по эксплуатации. Том 1* [Diesel locomotive TEM18DM: User Manual. Volume 1]. CJSC «UK BMZ» Publ., 2009, 138 p. (In Russian).
2. Ovcharenko S.M., Metelev A.A., Minakov V.A., Vedruchenko V.R. Operational control of system performance cooling of the locomotive. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2019, no. 4(40), pp. 9-17. EDN JQQKBT. (In Russian).

3. Ovcharenko S.M., Minakov V.A. Prerequisites for improving the methodology for rationing fuel consumption for maneuvering and economic traffic using machine learning models. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2021, no. 2(46), pp. 24-30. EDN SJUYWV. (In Russian).

4. Beloglazov A.K., Noskov V.O., Chulkov A.V. Ambient temperature of the cooling system on diesel and units. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2015, no. 4(24), pp. 11-17. EDN VKURKV. (In Russian).

5. Kruchek V.A., Kruchek V.V., Dvorkin P.V. Reliability improvement of hydraulic system of diesel electric locomotive. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia – Proceedings of Petersburg transport university*, 2014, no. 2(39), pp. 49-53. EDN SGRTPJ. (In Russian).

6. Kruchek V.V. *Uluchshenie éksploatatsionnykh pokazatelei manevrovyykh teplovozov* (Improving the performance indicators of shunting diesel locomotives). Doctor's thesis, St. Petersburg, PGUPS, 2012, 144 p. (In Russian).

7. Volodin A.I., Skovorodnikov E.I., Beloglazov A.K., Chulkov A.V., Ovcharenko S.M., Balagin O.V., Anisimov A.S., Yakushin R.Yu., Blinov P.N., Chetvergov V.A., Dankovtsev V.T., Pimshin A.S. *Metody otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya, éksploatatsionnoy ekonomichnosti i ekologicheskoy bezopasnosti dizelnykh lokomotivov* [Methods for assessing the technical condition, operational efficiency and environmental safety of diesel locomotives]. Moscow, Zheldorizdat Publ., 2007, 264 p. EDN QBFQKB. (In Russian).

8. Skovorodnikov E.I., Miheev V.A. Modelling of locomotives cooling systems with the purpose of control parameters number optimization. *Vestnik Sibirskoy gosudarstvennoy avtomobil'no-dorozhnoy akademii (Vestnik SibADI) – Bulletin of the Siberian State Automobile and Highway Academy*, 2009, no. 1(11), pp. 61-66. EDN PBOINX. (In Russian).

9. Sklifus Ja.K. Phase transitions of heat conducting medium in the cooling system of diesel locomotives. *Trudy rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia – Proceedings of the Rostov state transport university*, 2014, no. 4, pp. 92-95. EDN TUICRD. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Минаков Виталий Анатольевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: vitalya_13@mail.ru

Носков Виталий Олегович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Старший преподаватель кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: vitalik_noskov@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Минаков, В. А. Разработка и эксплуатация стенда имитации работы системы охлаждения дизеля / В. А. Минаков, В. О. Носков. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 4 (64). – С. 19 – 26.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Minakov Vitalii Anatolievich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Locomotives», OSTU.

Phone: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: vitalya_13@mail.ru

Noskov Vitalii Olegovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Senior lecturer of the department «Locomotives», OSTU.

Phone: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: vitalik_noskov@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Minakov V.A., Noskov V.O. Diesel engine cooling system operation imitation stand development and operation. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 4(64), pp. 19-26. (In Russian).

К. П. Стищенко¹, М. В. Кипервассер¹, М. В. Жирнов², В. Е. Митрохин²

¹Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ), г. Новокузнецк, Российская Федерация;

²Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ ПОСТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕНТРАЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Аннотация. В статье рассматривается проблема искажения питающего напряжения 0,4 кВ на постах электрической централизации (ЭЦ). Существенное искажение питающего напряжения способно вызвать аварийный переход питания на резервный фидер, что может повлечь за собой сбой в работе устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. Для анализа рассматриваемой проблемы был проведен ряд экспериментальных замеров качества и состава питающего напряжения поста ЭЦ. По результатам экспериментов выявлена зависимость степени искажения питающего напряжения 0,4 кВ от тока нагрузки на тяговой подстанции. С помощью средств компьютерного моделирования осуществлен синтез модели тяговой подстанции с линиями электроснабжения поста электрической централизации. На основе предложенной модели были рассчитаны оптимальные параметры пассивного LC-фильтра, настроенного на подавление 11-й и 13-й гармоник, преобладающих при рассматриваемой 12-пульсовой схеме выпрямления. С учетом полученных данных произведена сборка опытного образца фильтра гармоник и его внедрение в линию электроснабжения поста электрической централизации с проведением экспериментальных замеров качества напряжения после внедрения фильтра. По результатам проведенных исследований подтверждена эффективность выбранного типа фильтра гармоник по снижению как суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, так и отдельных коэффициентов гармонических составляющих 11-го и 13-го порядков. За все время опытной эксплуатации (четыре месяца) случаев аварийных переходов питания на постах ЭЦ выявлено не было. Полученные в ходе исследования результаты можно применять для решения аналогичных проблем в границах электрифицированных железных дорог постоянного тока с учетом разницы в применяемых схемах выпрямления и схем электроснабжения нетяговых потребителей.

Ключевые слова: гармонические составляющие, пассивный LC-фильтр, микропроцессорная электрическая централизация, тяговая подстанция, качество электрической энергии, полупроводниковый выпрямитель.

Konstantin P. Stishenko¹, Mikhail V. Kiperwasser¹, Maxim V. Zhirnov²,
Valery E. Mitrokhin²

¹Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, the Russian Federation;

²Omsk State University of Railway Transport, Omsk, the Russian Federation

ENHANCEMENT OF POWER SUPPLY VOLTAGE QUALITY AT ELECTRIC CENTRALIZATION STATIONS ON DC-ELECTRIFIED RAILWAYS

Abstract. This paper investigates the issue of voltage distortion in the 0.4 kV power supply at electric centralization (EC) posts. Significant voltage distortion may trigger an emergency switch to the backup feeder, potentially leading to failures in railway automation and telemechanic systems. To analyze this problem, a series of field measurements were conducted to assess the quality and harmonic composition of the supply voltage at an EC post. The experimental results revealed a direct correlation between the degree of voltage distortion and the load current on the adjacent traction substation.

Using computer simulation tools, a detailed model of the traction substation, including the power supply lines to the EC post, was developed. Based on this model, optimal parameters for a passive LC filter tuned to suppress the 11th and 13th harmonic components – dominant under the 12-pulse rectification scheme – were calculated. A prototype harmonic filter was then constructed and integrated into the power supply line of the EC post. Post-installation field measurements were carried out to evaluate the voltage quality improvement.

The results confirm the effectiveness of the selected filter in reducing both the total harmonic distortion (THD) of the voltage and the individual harmonic components of the 11th and 13th orders. During the entire four-month trial operation period, no emergency power transfers were recorded at the EC posts. The findings of this study can be applied to similar systems within DC-electrified railway networks, taking into account variations in rectification schemes and non-traction load power supply configurations.

Keywords: harmonic components, passive LC filter, microprocessor-based electrical centralization, traction substation, electrical energy quality, semiconductor rectifier.

Развитие инфраструктуры железных дорог, внедрение современных систем железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ), электрической централизации (ДЦ) значительно повышают надежность и безопасность перевозочного процесса. В то же время усложнение элементной базы, переход на полупроводниковые элементы и микропроцессорные централизации систем ЖАТ ведут к повышению требований, предъявляемых к качеству потребляемой электрической энергии.

Электрифицированные железные дороги постоянного и переменного тока характеризуются наличием нелинейных потребителей электрической энергии. Нелинейность обуславливается применением полупроводниковых преобразователей на тяговых подстанциях и электроподвижном составе, что, в свою очередь, ведет к генерации высших гармоник тока и напряжения в питающую сеть и сети электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог. Порядок и амплитуда указанных гармоник зависят от схемы и типа используемых полупроводниковых преобразователей. Проблемы негативного воздействия высших гармоник на работу систем ЖАТ и ЭЦ описаны в работах [1, 2].

Устройства ЖАТ относятся к особой группе электроприемников первой категории. В течение последних нескольких лет был зафиксирован ряд случаев аварийного перехода питания с основного на резервный фидер электроснабжения постов ЭЦ вследствие срабатывания реле контроля чередования фаз, применяемых на питающих панелях. Необходимость применения реле контроля чередования фаз обусловлена использованием трехфазных электродвигателей для управления переводом стрелок и требованиями к защите от аварийных режимов источника бесперебойного питания (ИБП). Аварийный переход питания системы электрической централизации может привести к сбоям в работе устройств автоматики и телемеханики, «перекрытию» сигналов и, как следствие, к нарушениям в графике движения поездов. По результатам анализа случаев перехода питания постов ЭЦ было выявлено, что причиной событий является увеличение тока нагрузки полупроводникового преобразователя (ПП) [3]. В свою очередь рост тока нагрузки ведет к существенному увеличению амплитуд высших гармоник в составе сетевого напряжения 10 кВ тяговой подстанции, от которой получают питание различные нетяговые потребители, в том числе и посты ЭЦ [4, 5].

Проблема влияния тяговых нагрузок на качество электрической энергии на участках железных дорог переменного тока и способы ее решения изучены достаточно хорошо [6]. В то же время решение подобной проблемы на участках постоянного тока в части разработки и внедрения технических решений, направленных на повышения качества электрической энергии, питающей нетяговые потребители, требует исследования. Возможным способом повышения качества напряжения является применение различных типов фильтров гармоник [7].

Целью проводимого исследования является изучение влияния тяговых нагрузок на качество питающего напряжения нетяговых потребителей и поиск научно обоснованных методов решения проблемы аварийных переходов питания на постах электрической централизации. **Задачами** и используемыми **методами исследования** являлись такие:

анализ качества электрической энергии на вводной панели поста ЭЦ с использованием специализированных приборов и программных комплексов;

разработка имитационной модели в программном пакете Matlab в целях оценки эффективности предлагаемого пассивного LC-фильтра для снижения доли гармонических составляющих в кривой питающего напряжения;

опытная эксплуатация разработанного фильтра и анализ полученных экспериментальных результатов.

Научная новизна исследования заключается в создании имитационной модели тяговой подстанции постоянного тока и линий электроснабжения нетяговых потребителей в программном комплексе Matlab/Simulink с целью предварительного анализа эффективности предложенных технических решений по улучшению качества напряжения, питающего нетяговые потребители. На основе предложенной модели с необходимым для этого

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

расширением ее структуры возможно решение различных задач по изучению причин возникновения аварийных режимов и их последствий на тяговых подстанциях постоянного тока.

Схема электроснабжения поста ЭЦ на участке двух смежных тяговых подстанций (ТПС) приведена на рисунке 1. От шин 110 кВ тяговой подстанции через понижающий трансформатор 110/10 кВ получают питание преобразовательный трансформатор и полупроводниковый выпрямитель. К общим шинам 10 кВ подключена также линия продольного электроснабжения 10 кВ (ЛПЭ), являющаяся резервным источником электрической энергии для постов ЭЦ.

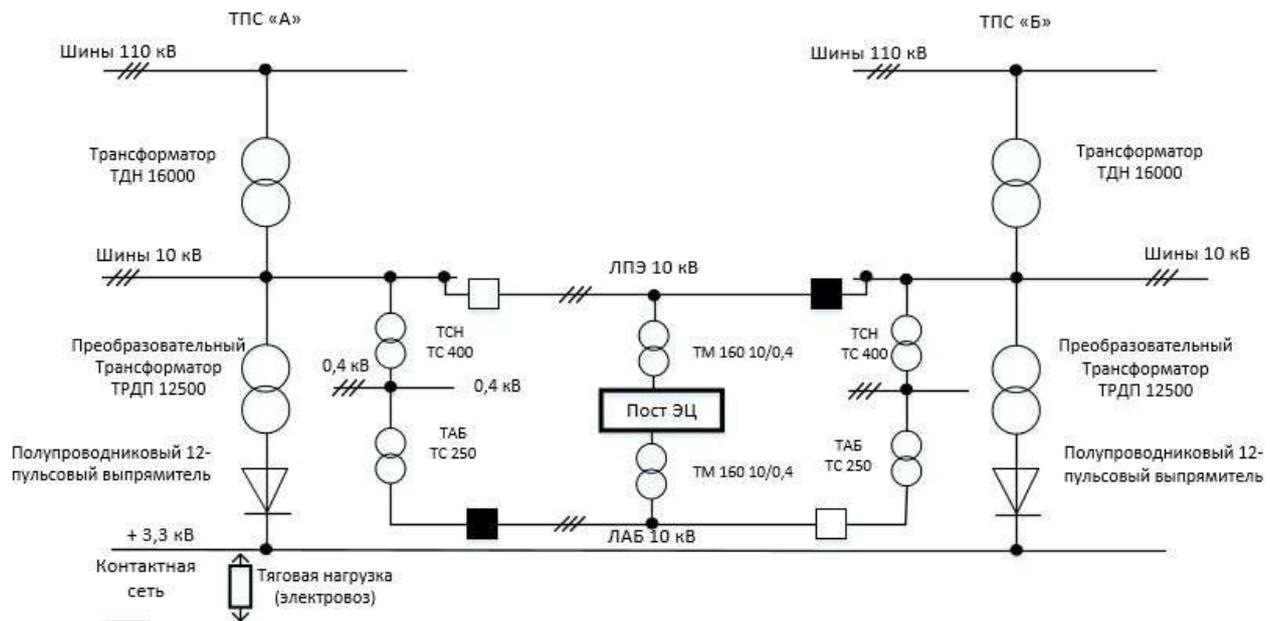


Рисунок 1 – Принципиальная схема электроснабжения поста ЭЦ на электрифицированных железных дорогах постоянного тока от двух смежных тяговых подстанций

От шин собственных нужд 0,4 кВ тяговой подстанции получает питание через повышающий трансформатор 0,4/6 (10) кВ линия автоблокировки (ЛАБ), служащая основным источником электрической энергии для постов ЭЦ и устройств ЖАТ в границах фидерной зоны.

Проведенные авторами серии замеров и экспериментов на полигоне Западно-Сибирской дороги в течение I - III кварталов 2024 г. (рисунки 2 – 5) с помощью измерительных приборов и программных комплексов на постах ЭЦ позволили установить следующее.

1. Увеличение тяговой нагрузки ведет к увеличению доли высших гармоник в питающем напряжении 0,4 кВ в случае питания от основного фидера (ЛАБ 10 кВ). Вызванное этим искажение напряжения 0,4 кВ на частоте 50 Гц ведет к срабатыванию реле контроля чередования фаз и переходу питания на резервный фидер (см. рисунки 2, 3).

2. В кривой напряжения 0,4 кВ при питании от резервного фидера по линии продольного электроснабжения 10 кВ доля гармонических составляющих существенно ниже, чем при питании от основного фидера (ЛАБ 10 кВ) (см. рисунки 4, 5). Суммарные коэффициенты гармонических составляющих составили 3,73 и 13,14 % соответственно. Это может быть вызвано появлением резонансных режимов, обусловленных наличием реактивных параметров устройств (индуктивностей трансформаторов, емкостью воздушных и кабельных линий), входящих в систему электроснабжения по линии автоблокировки [8].

3. Кривые питающего напряжения 0,4 кВ как основного, так и резервного фидеров поста ЭЦ содержат гармонические составляющие с частотами, являющимися каноническими для применяемой на тяговой подстанции схемы выпрямления полупроводникового преобразова-

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

теля. В рассматриваемой 12-пульсовой мостовой схеме выпрямления преобладают гармоники с частотами 550 и 650 Гц (11-я и 13-я гармоники).

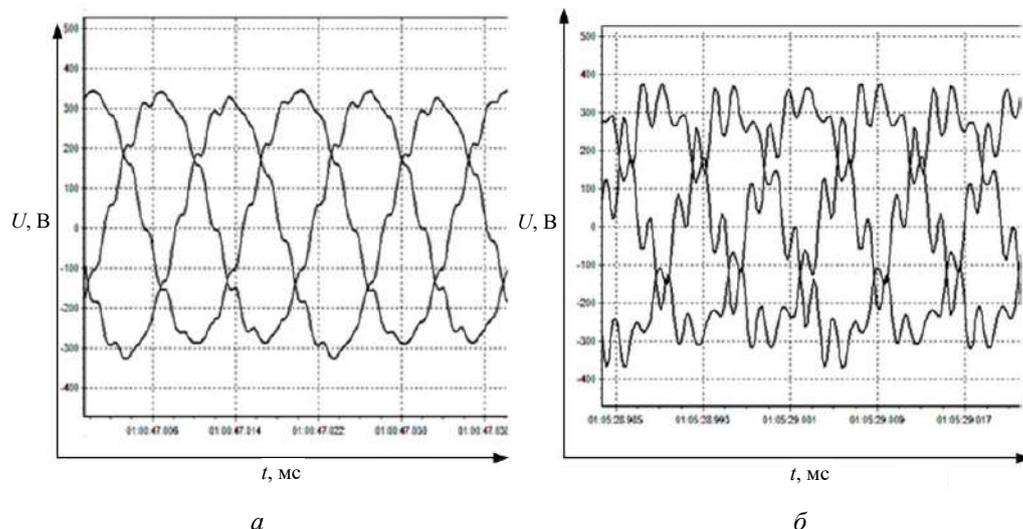


Рисунок 2 – Осциллограммы питающего напряжения 0,4 кВ промышленной частоты 50 Гц поста ЭЦ от основного фидера при тяговой нагрузке на выпрямителе 100 – 150 А (а) и при увеличении тяговой нагрузки на выпрямителе до 850 – 1000 А (б)

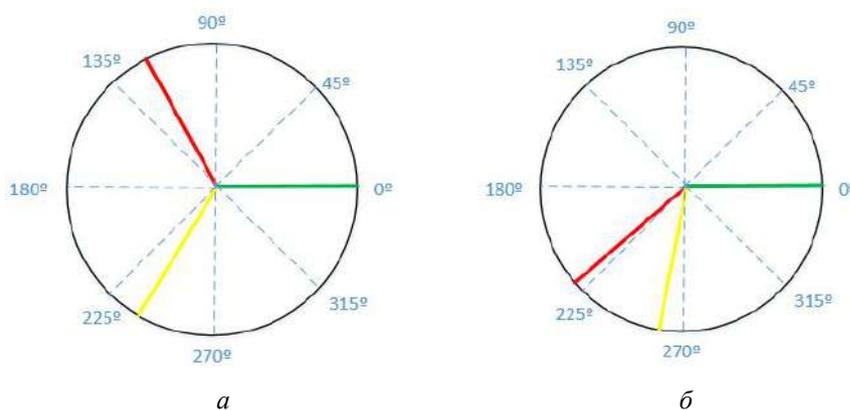


Рисунок 3 – Векторные диаграммы питающего напряжения 0,4 кВ промышленной частоты 50 Гц поста ЭЦ от основного фидера (ЛАБ 10 кВ) при тяговой нагрузке на выпрямителе 100 – 150 А (а) и при увеличении тяговой нагрузки на выпрямителе до 850 – 1000 А (б)

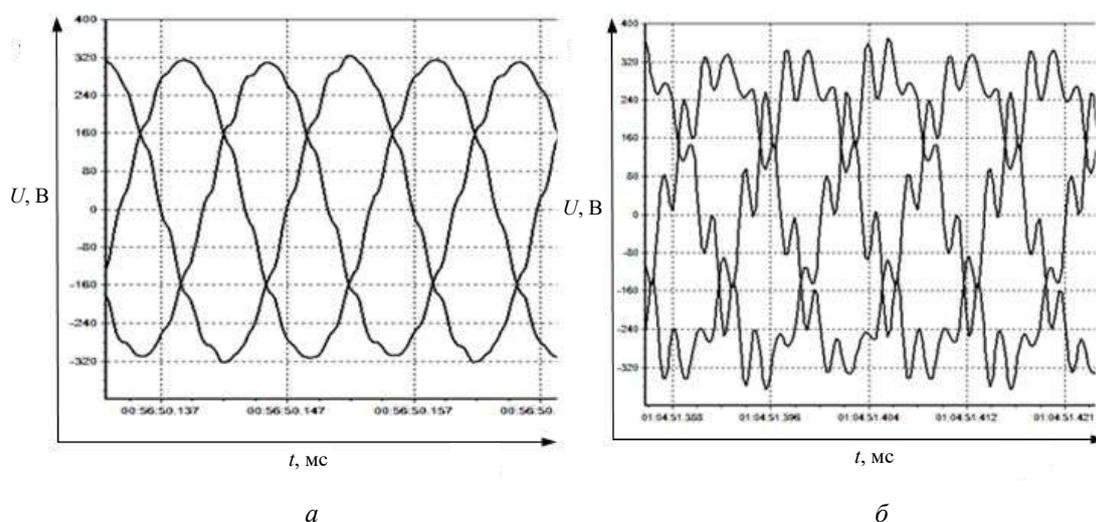


Рисунок 4 – Осциллограммы питающего напряжения 0,4 кВ промышленной частоты 50 Гц поста ЭЦ при тяговой нагрузке на выпрямителе 700 – 800 А при питании от резервного (а) и от основного (б) фидеров

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

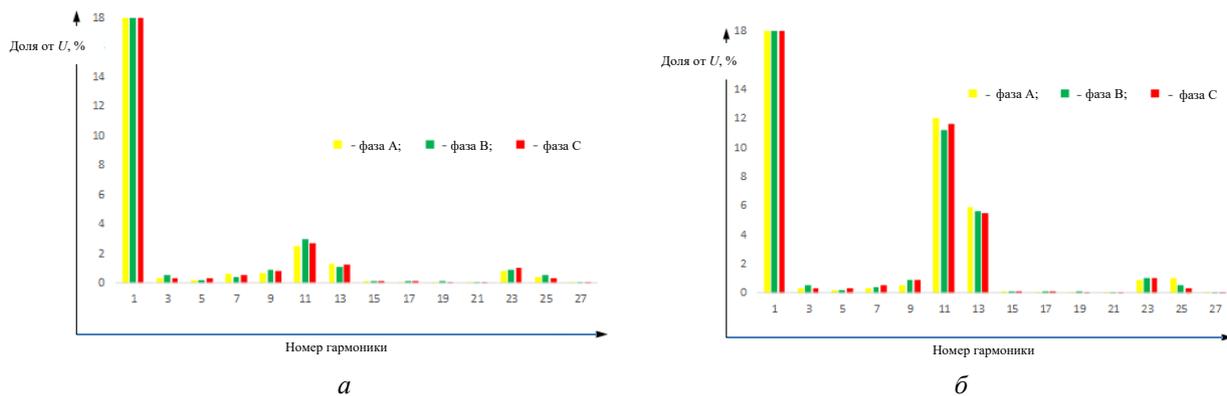


Рисунок 5 – Спектр напряжения 0,4 кВ промышленной частоты 50 Гц поста ЭЦ при тяговой нагрузке на выпрямителе 700 – 800 А при питании от резервного (а) и от основного (б) фидеров

Полученные результаты оценки качества электрической энергии коррелируют с данными, полученными в ходе экспериментов по исследованию влияния 12-пульсовых выпрямителей на качество сетевого напряжения [5].

Установлено, что кривая напряжения 0,4 кВ вследствие наличия провалов, вызванных гармоническими искажениями, пресекает ось абсцисс четыре раза за период. По этой причине срабатывает реле контроля чередования фаз, что и ведет к аварийному переходу питания поста ЭЦ на резервный фидер. Устранение данной проблемы аварийных переходов питания возможно с использованием пассивного фильтра.

Компьютерное моделирование. С целью предварительной оценки эффективности разрабатываемого фильтра было выполнено его моделирование в составе компьютерной модели тяговой подстанции и системы электроснабжения нетяговых потребителей. Синтез модели тяговой подстанции постоянного тока и электромагнитное влияние на смежные устройства в программном комплексе Matlab/Simulink рассмотрены в статье [9]. Модель ТПС учитывает реактивные параметры отдельных элементов системы электроснабжения тяговых подстанций и нетяговых потребителей. Расчет значений указанных параметров был выполнен на основе данных, приведенных в работах [10, 11]. Исследуемая модель включает в себя источник синусоидального и симметричного напряжения 110 кВ, понижающий трансформатор ТДН-16000/110/10; подсистему «выпрямительный агрегат», включающую в себя преобразовательный трансформатор ТРДП-12500 и 12-пульсовую мостовую схему диодного выпрямителя, приведенную на рисунке 6; тяговую нагрузку, представленную резистором и индуктивностью, имитирующими соответственно активное и индуктивное сопротивления контактной сети, реактора, электродвигателей подвижного состава. Подсистема «Питание поста ЭЦ», приведенная на рисунке 7, имитирует линии основного (ЛАБ) и резервного (ЛПЭ) питания поста электрической централизации от смежной тяговой подстанции согласно принятой схеме, представленной на рисунке 1. В качестве допущения модель не учитывает оборудование, присутствующее в составе реальных тяговых подстанций, наличие которого не оказывает существенного влияния на показатели качества электрической энергии и влияния на результаты планируемого имитационного моделирования. В число такого оборудования входят коммутационные аппараты, трансформаторы тока и напряжения, сглаживающее устройства на стороне постоянного тока и др. Блок-схема общей имитационной модели приведена на рисунке 8.

Блок-схема подсистемы «Питание поста ЭЦ» включает в себя элементы из библиотеки SimScape Power Systems по линии основного фидера электроснабжения (ЛАБ): трансформатор собственных нужд ТС-400/10/0,4, трансформатор автоблокировки ТС-250/10/0,4, воздушную линию электропередачи, выполненную проводом АС 3×35, трансформатор основного фидера питания поста ЭЦ ТМ-160/10/0,4. Линия продольного электроснабжения, являющаяся резервным фидером питания для поста ЭЦ, состоит из воздушной линии электропередачи,

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

выполненной проводом АС 3×35 и трансформатора ТМ-160/10/0,4 резервного фидера питания поста ЭЦ. Для возможности перехода питания с основного фидера на резервный в начале и в конце линий предусмотрены типовые блоки, имитирующие коммутационные аппараты.

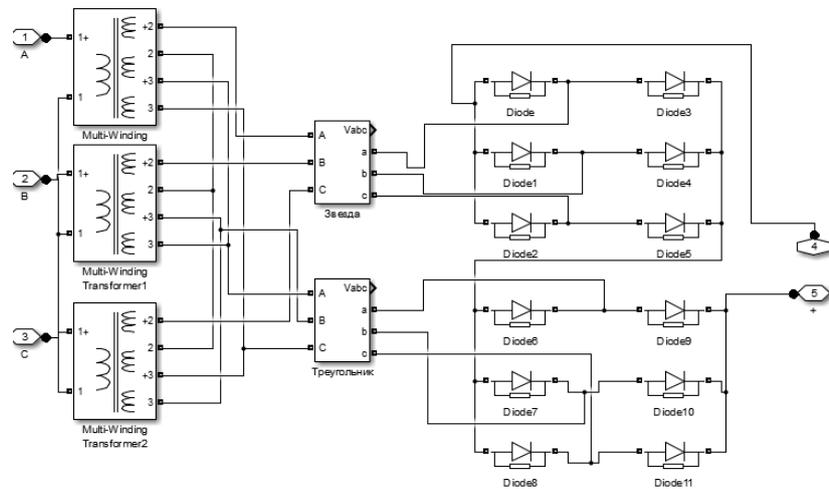


Рисунок 6 – Блок-схема подсистемы выпрямительного агрегата с тяговым трансформатором

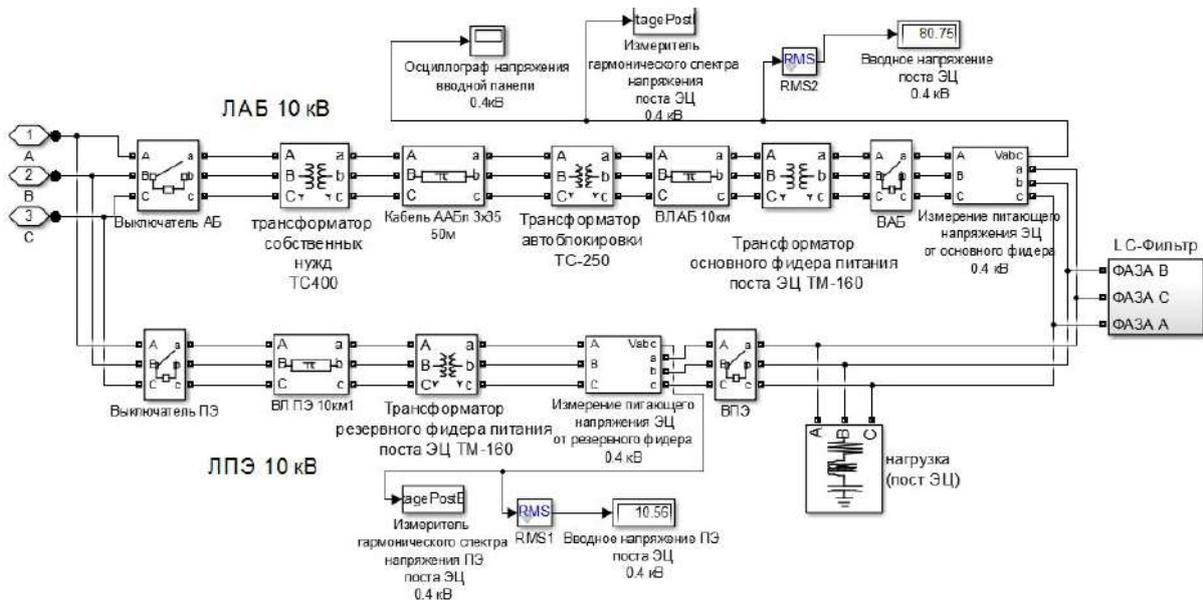


Рисунок 7 – Блок-схема подсистемы «Питание поста ЭЦ»

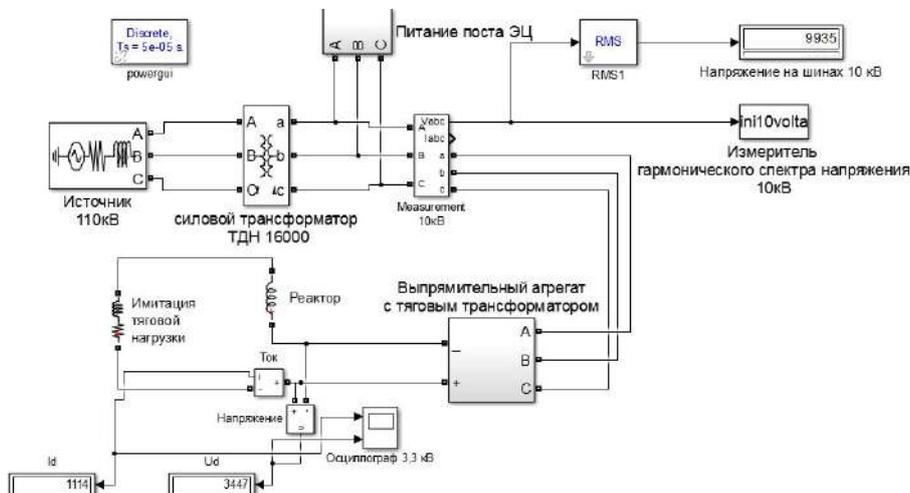


Рисунок 8 – Блок-схема имитационной модели одноагрегатной тяговой подстанции постоянного тока

Выполнялось поочередное исследование модели при питании поста ЭЦ от основного и резервного фидеров при тяговой нагрузке на выпрямителе с током 800 А. Полученные осциллограммы и спектры напряжения 0,4 кВ на вводной панели поста ЭЦ приведены на рисунках 9, 10.

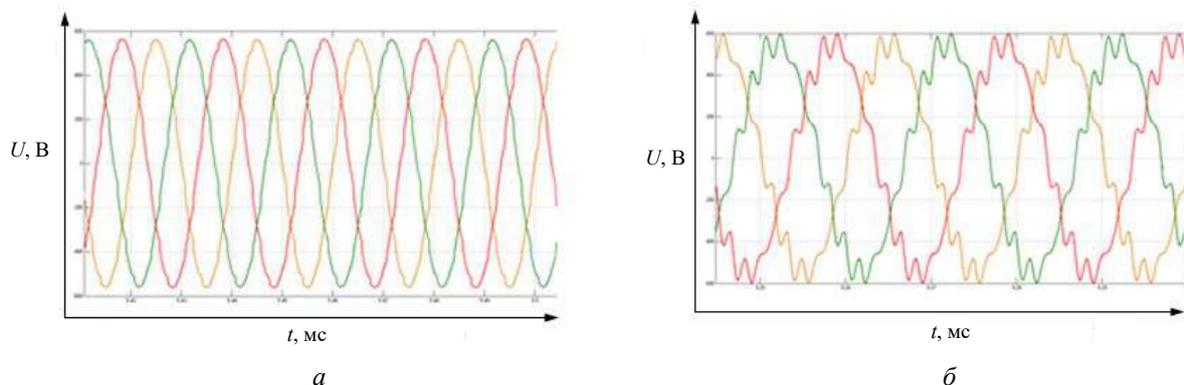


Рисунок 9 – Осциллограммы питающего напряжения 0,4 кВ поста ЭЦ при питании от резервного (а) и от основного (б) фидеров

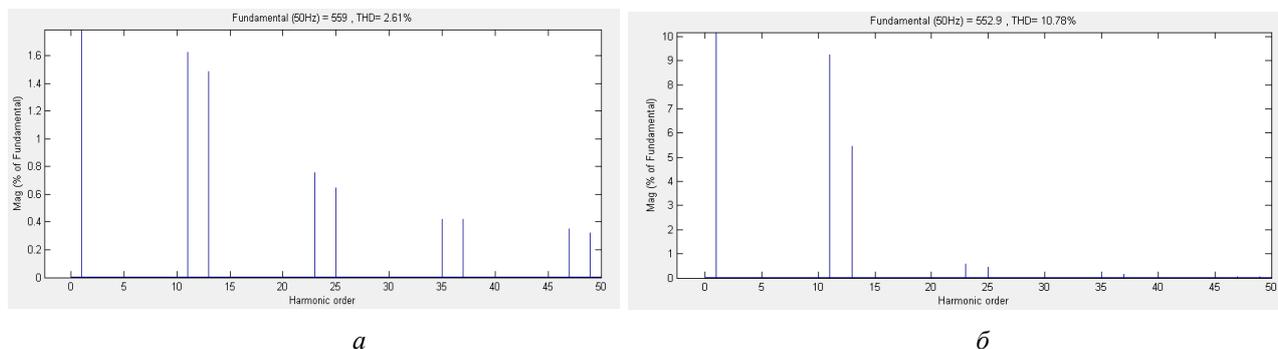


Рисунок 10 – Спектр напряжения 0,4 кВ поста ЭЦ при тяговой нагрузке на выпрямителе с током 800 А при питании от резервного (а) и от основного (б) фидеров

Полученные при моделировании осциллограммы и спектры напряжений коррелируют с данными, зафиксированными при натурных замерах. Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих (THD – *Total Harmonic Distortion*) при компьютерном моделировании составили для режима питания от резервного фидера 2,61 % и 10,78 % для режима питания от основного фидера. Расхождения между полученными значениями суммарных коэффициентов гармонических составляющих при натурных экспериментах и имитационном моделировании составили 1,12 и 2,36 % при питании от резервного и основного фидеров соответственно, что можно считать приемлимыми показателями адекватности модели в рамках решения поставленной задачи.

В качестве средства улучшения качества питающего напряжения предлагается использовать пассивный LC-фильтр. Схема фильтра приведена на рисунке 11. Расчет параметров фильтра выполнен на основе метода последовательных приближений [12] и описан в источнике [3].

Предлагаемый фильтр состоит из двух резонансных LC-контуров, включаемых в каждую фазу параллельно нагрузке на вводной панели 0,4 кВ поста ЭЦ. Реактивные параметры контуров приведены в таблице. Выбранные расчетные значения обеспечивают подавление гармоник напряжения на частотах 550 и 650 Гц. Место подключения фильтра в имитационной модели приведено на рисунке 8. Состав подсистемы «LC-Фильтр» приведен на рисунке 12.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

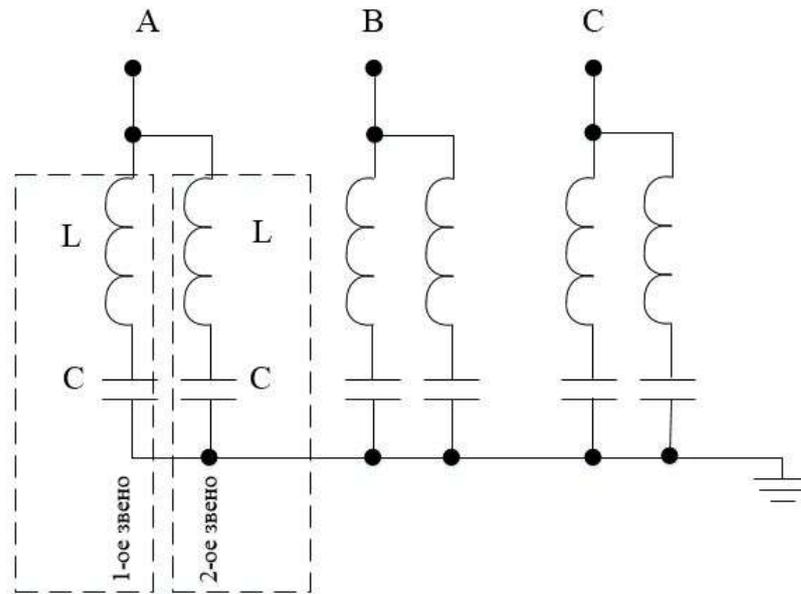


Рисунок 11 – Электрическая схема пассивного LC-фильтра

Расчетные параметры фильтра

Параметр	Первое звено	Второе звено
L, мГн	0,75	0,75
C, мкФ	110	80
f_p , Гц	550	650
$I_{\text{фазный}}$, А	8	5,8
$Q_{\text{ф}}$, квар	13	

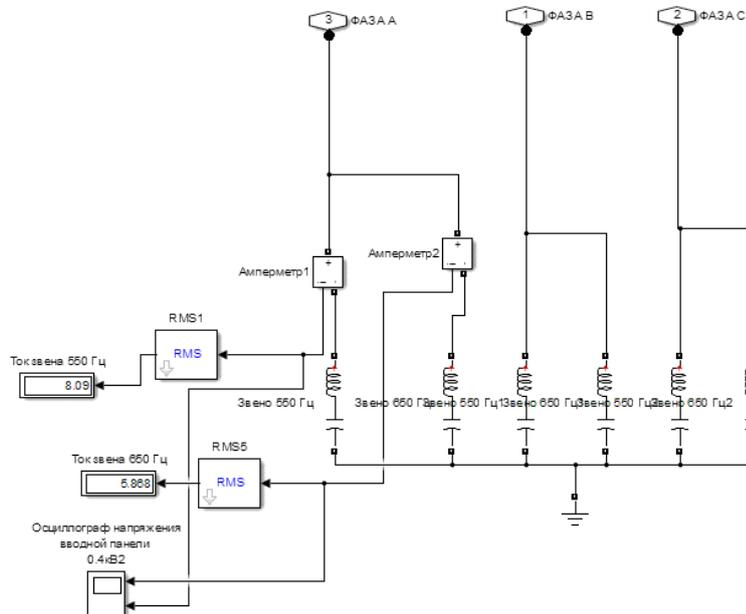


Рисунок 12 – Блок-схема подсистемы «LC-фильтр»

С помощью имитационного моделирования осуществлена предварительная оценка эффективности рассматриваемого фильтра при тяговой нагрузке на выпрямителе 1000 А при поочередном питании поста ЭЦ от основного и резервного фидеров. Полученные осциллограммы и спектральные составы напряжения 0,4 кВ приведены на рисунках 13, 14.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

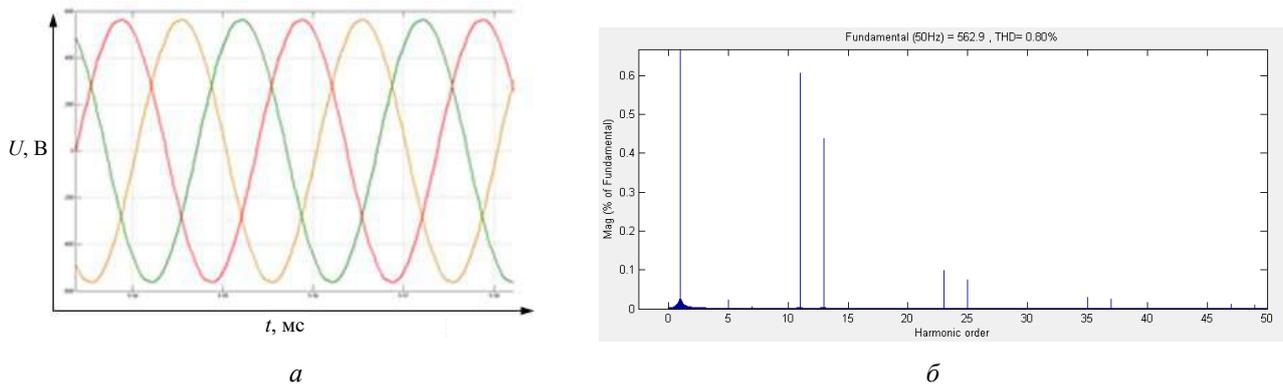


Рисунок 13 – Осциллограммы (а) и гармонический спектр напряжения 0,4 кВ (б) на вводной панели поста ЭЦ при питании от основного фидера

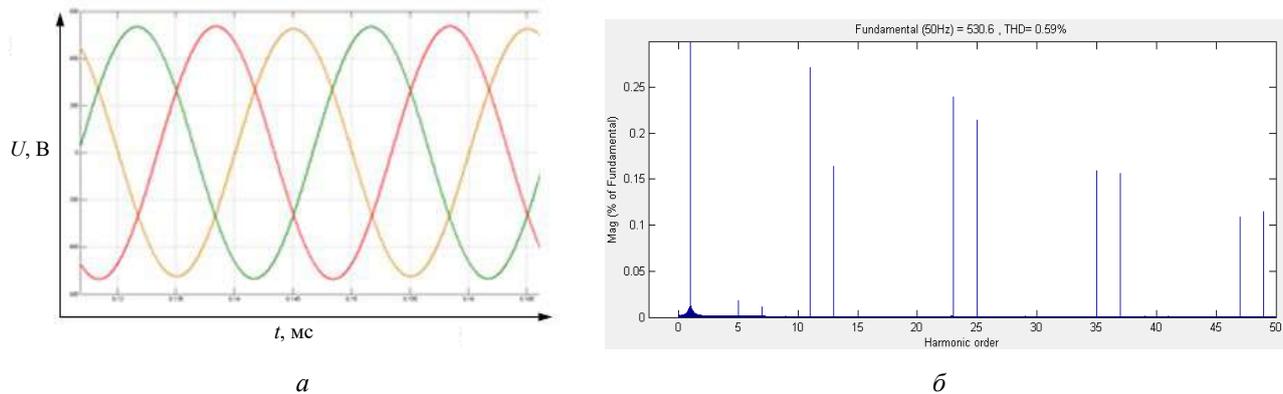


Рисунок 14 – Осциллограммы (а) и гармонический спектр напряжения 0,4 кВ (б) на вводной панели поста ЭЦ при питании от резервного фидера

По результатам, полученным в ходе моделирования, можно сделать выводы об эффективности предлагаемого фильтра. При наличии тяговой нагрузки на выпрямителе 1000 А видимые искажения кривых напряжений как основного, так и резервного питания отсутствуют. Суммарный коэффициент гармонических составляющих снизился до 0,8 % при питании от основного фидера и до 0,59 % при питании от резервного фидера. Полученные результаты соответствуют требованиям стандартов [13, 14].

Разработанный фильтр был установлен авторами на вводной панели питания поста ЭЦ ст. Бардино в январе 2025 г. По результатам опытной эксплуатации и экспериментальным замерам в течение первых двух суток были получены данные, приведенные на рисунке 15 при различных уровнях нагрузки на выпрямителе тяговой подстанции.

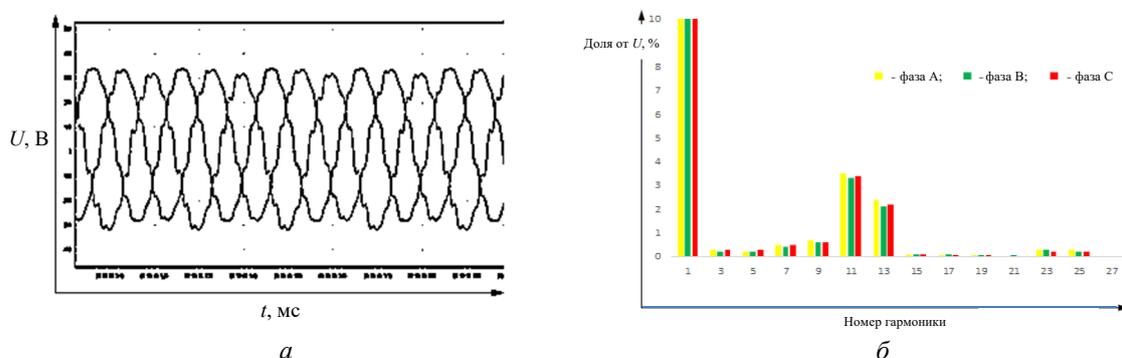


Рисунок 15 – Осциллограмма (а) и гармонический спектр (б) питающего пост ЭЦ напряжения 0,4 кВ от основного фидера при тяговой нагрузке на выпрямителе 900 – 1000 А

Приведенные на рисунке 15 диаграммы подтверждают снижение доли гармонических составляющих в кривой питающего напряжения 0,4 кВ поста ЭЦ. Коэффициенты гармонических составляющих 11-го и 13-го порядков не превышают 3,5 и 3 % соответственно, что удовлетворяет требованиям, приведенным в стандартах [13, 14]. Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения при тяговой нагрузке в 1200 А не превышал 6,8 %. За время опытной эксплуатации (восемь месяцев) аварийных переходов питания с основного фидера на резервный энергодиспетчерской службой не зафиксировано.

Отличия результатов опытных экспериментов от данных, полученных по итогам имитационного моделирования, обусловлены такими факторами, как разброс значений индуктивностей применяемых дросселей, емкостей конденсаторов, несимметрия всех уровней напряжения. Характерно наличие гармоник 5-го и 7-го порядков, присутствие которых обусловлено электромагнитным влиянием тяговых подстанций с 6-пульсовыми схемами выпрямления, получающих питание от общей сети энергоснабжения.

Внедрение и эксплуатация микропроцессорных систем электрической централизации на электрифицированных железных дорогах постоянного тока сопряжены с повышением требований к качеству питающего напряжения. Использование полупроводниковых преобразователей на тяговых подстанциях приводит к существенному гармоническому искажению напряжения всех уровней, что может приводить к неустойчивой работе систем электрической централизации.

С целью изучения проблемы были проведены натурные эксперименты на реальных объектах, подтвердившие наличие отклонений показателей качества питающего напряжения для нетяговых потребителей. Была составлена имитационная модель тяговой подстанции постоянного тока, включающая в себя основную и резервную линии электроснабжения поста ЭЦ в программной среде Matlab/Simulink. Был выполнен расчет параметров фильтра и проведено моделирование с целью оценки его эффективности при различных режимах питания поста ЭЦ и уровнях тяговой нагрузки. На основе полученных в ходе моделирования результатов об эффективности предложенного фильтра было осуществлено внедрение опытного образца. Проведенные последующие замеры показателей качества электрической энергии подтвердили эффективность предложенного фильтра. Значение суммарных коэффициентов гармонических составляющих питающего напряжения 0,4 кВ поста ЭЦ снизилось с 13,4 до 6,8 %, что соответствует требованиям, приведенным в стандартах [13, 14]. Случаев аварийных переходов с основного фидера на резервный за все время опытной эксплуатации отмечено не было.

Список литературы

1. Крюков, А. В. Улучшение качества электроэнергии в системах электроснабжения стационарных объектов железнодорожного транспорта / А. В. Крюков, И. А. Любченко. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23. – № 6. – С. 53–65. – DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-6-53-65. – EDN DGRHYA.
2. Арсентьев, М. О. Повышение качества электрической энергии в системах электроснабжения нетяговых потребителей на основе установок распределенной генерации / М. О. Арсентьев, А. В. Крюков. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2010. – № 3 (27). – С. 169–174. – EDN NQYUGF.
3. Стищенко, К. П. Расчет и оценка эффективности пассивного фильтра гармоник для нетяговых потребителей электрифицированных железных дорог с помощью имитационной модели в программной среде Matlab/Simulink / К. П. Стищенко, М. В. Кипервассер. – Текст : электронный // Международный научно-исследовательский журнал. – 2025. – № 5 (155). – DOI 10.60797/IRJ.2025.155.105. – EDN WCUSVR.
4. Резонансные явления в трехфазных линиях электропередачи, питающих нетяговых потребителей железнодорожного транспорта / Т. В. Ковалева, А. А. Комяков, О. О. Комякова,

Н. В. Пашкова. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2023. – № 3 (78). – С. 109–114. – DOI 10.20291/1815-9400-2023-3-109-114. – EDN OPJGOR.

5. Двенадцатипульсовые полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций / Б. С. Барковский, В. П. Маценко, М. Г. Шалимов [и др.]. – Москва : Транспорт, 1990. – 130 с. – Текст : непосредственный. – EDN VLZXXKJ.

6. Улучшение качества электроэнергии в системах электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, И. А. Любченко, А. В. Черепанов. – Москва-Берлин : Директ-Медиа, 2020. – 184 с. – Текст : непосредственный. – EDN KIUCMZ.

7. Селезнев, А. С. Об эффективности применения фильтров при нормализации несинусоидальных режимов / А. С. Селезнев, С. А. Кондрат, А. Н. Третьяков. – Текст : непосредственный // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 8 (103). – С. 177–183. – EDN UHNAKZ.

8. Резонансные явления в трехфазных линиях электропередачи, питающих нетяговых потребителей железнодорожного транспорта / Т. В. Ковалева, А. А. Комяков, О. О. Комякова, Н. В. Пашкова. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2023. – № 3 (78). – С. 109–114. – DOI 10.20291/1815-9400-2023-3-109-114. – EDN OPJGOR.

9. Имитационное моделирование влияния тяговых нагрузок на качество питающего напряжения нетяговых потребителей в районах угледобычи / К. П. Стищенко, А. В. Герасимук, Б. Б. Хаимзон, М. В. Кипервассер. – Текст : непосредственный // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2024. – № 10. – С. 217–221. – EDN OHXBMJ.

10. Новаш, И. В. Расчет параметров модели трехфазного трансформатора из библиотеки MatLab-Simulink с учетом насыщения магнитопровода / И. В. Новаш, Ю. В. Румянцев // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2015. – № 1. – С. 12–24. – EDN TQSVSH.

11. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – Москва : ДМК Пресс, 2007. – 288 с. – Текст : непосредственный. – EDN RAZCGT.

12. Расчет параметров и анализ работы пассивного фильтра гармоник / М. Н. Атаманов, Н. М. Дрей, А. Г. Зиганшин, Г. М. Михеев. – Текст : непосредственный // Вестник Чувашского государственного университета. – 2020. – № 1. – С. 17–25. – EDN DRBFBF.

13. ГОСТ 32144–2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 20 с. – Текст : непосредственный.

14. ГОСТ 34012–2016. Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики. Общие технические требования. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 50 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Kryukov A.V., Lyubchenko I.A. Improving the quality of electricity supply systems in stationary objects of railway transport. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki – Power engineering: research, equipment, technology*, 2021, vol. 23, no. 6, pp. 53-65. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-6-53-65>. EDN DGPHYA. (In Russian).

2. Arsent'ev M.O., Kryukov A.V. Advance of electric energy quality of railway non-traction energy supplying by distributed generation units. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2010, no. 3(27), pp. 169-174. EDN NQYUGF. (In Russian).

3. Stishenko K.P., Kipervasser M.V. Calculation and evaluation of passive harmonic filter efficiency for non-traction consumers of electrified railways using simulation model in

Matlab/Simulink software environment. *Mezhdunarodnyĭ nauchno-issledovatel'skiĭ zhurnal – International Research Journal*, 2025, no. 5(155). <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.155.105>. EDN WCUSVR. (In Russian).

4. Kovaleva T.V., Komyakov A.A., Komyakova O.O., Pashkova N.V. Resonance phenomena in three-phase power transmission lines feeding the non-traction consumers of railway transport. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2023, no. 3(78), pp. 109-114. <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2023-3-109-114>. EDN OPJGOR. (In Russian).

5. Barkovskii B.S., Matsenko V.P., Shalimov M.G., Magaĭ G.S., Panfil' L.S. *Dvenadtsatipul'sovye poluprovodnikovye vypriamiteli tiagovykh podstantsii* [Twelve-pulse semiconductor rectifiers of traction substations]. Moscow, Transport Publ., 1990, 130 p. EDN VLZ XKJ. (In Russian).

6. Zakariukin V.P., Kriukov A.V., Liubchenko I.A., Cherepanov A.V. *Uluchshenie kachestva ėlektroėnergii v sistemakh ėlektrosnabzheniia netiagovykh potrebitelei zheleznykh dorog* [Improving the quality of electricity in the electricity supply systems of non-traction railway consumers]. Moscow- Berlin, Direct Media Publ., 2020, 184 p. EDN KIUCMZ. (In Russian).

7. Seleznev A., Kondrat S., Tretiakov A. On filter effectiveness in non-sinusoidal regime normalization. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2015, no. 8(103), pp. 177-183. EDN UHHAKZ. (In Russian).

8. Kovaleva T.V., Komyakov A.A., Komyakova O.O., Pashkova N.V. Resonance phenomena in three-phase power transmission lines feeding the non-traction consumers of railway transport. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2023, no. 3(78), pp. 109-114. <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2023-3-109-114>. EDN OPJGOR. (In Russian).

9. Stishenko K.P., Gerasimuk A.V., Khaimzon B.B., Kipervasser M.V. Simulation of the effect of traction loads on the quality of supply voltage for non-traction consumers in coal mining areas. *Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniia mineral'nykh resursov – Science-intensive technologies for the development and use of mineral resources*, 2024, no. 10, pp. 217-221. EDN OHXBMJ. (In Russian).

10. Novash I.V., Rumiantsev Yu.V. Three-phase transformer parameters calculation considering the core saturation for the Matlab-Simulink transformer model. *Ėnergetika. Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedeniĭ i ėnergeticheskikh ob"edineniĭ SNG – Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*, 2015, no. 1, pp. 12-24. EDN TQSVSH. (In Russian).

11. Chernykh I.V. *Modelirovanie ėlektrotekhnicheskikh ustroĭstv v MATLAB. SimPowerSystems i Simulink* [Modeling of electrical devices in MATLAB. SimPowerSystems and Simulink]. Moscow, DMK Press Publ., 2007, 288 p. EDN RAZCGT. (In Russian).

12. Atamanov M., Drey N., Ziganshin A., Mikheev G. Calculation of parameters and analysis of the passive harmonic filter. *Vestnik Chuvashskogo universiteta – Bulletin of the Chuvash University*, 2020, no. 1, pp. 17-25. EDN DRBFBF. (In Russian).

13. GOST 32144–2013. Electrical energy quality standards in general purpose power supply systems. Moscow, Standardinform Publ., 2014. 20 p. (In Russian).

14. GOST 34012–2016. Railway automation and telemechanics equipment. General technical requirements. Moscow, Standardinform Publ., 2017. 50 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Стищенко Константин Петрович

Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ).

Кирова ул., д. 42, г. Новокузнецк, 654007, Российская Федерация.

Аспирант кафедры электротехники, электропривода и промышленной электроники, СибГИУ.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Stishenko Konstantin Petrovich

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, the Russian Federation (SibSIU).

Kirova st., 42, Novokuznetsk, 654007, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department of Electrical Engineering, Electric Drive and Industrial Electronics, SibSIU.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Тел.: +7 (953) 062-85-74.
E-mail: stishenko3332@gmail.com

Phone: +7 (953) 062-85-74.
E-mail: stishenko3332@gmail.com

Кипервассер Михаил Вениаминович

Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ).

Кирова ул., д. 42, г. Новокузнецк, 654007, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники, электропривода и промышленной электроники, СибГИУ.

Тел.: +7 (951) 175-17-96.
E-mail: kipervasser_mv@sibsiu.ru

Kiperwasser Mikhail Veniaminovich

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, the Russian Federation (SibSIU).

Kirova st., 42, Novokuznetsk, 654007, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department of Electrical Engineering, Electric Drive and Industrial Electronics, SibSIU.

Phone: +7 (951) 175-17-96.
E-mail: kipervasser_mv@sibsiu.ru

Жирнов Максим Вячеславович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Телекоммуникационные, радиотехнические системы и сети», ОмГУПС.

Тел.: +7 (905) 956-95-95.
E-mail: maxnck05@gmail.com

Zhirnov Maxim Vyacheslavovich

Omsk State University of Railway Transport (OSTU).

35 Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department "Telecommunications, Radio Engineering Systems and Networks", OSTU.

Phone: +7 (905) 956-95-95.
E-mail: maxnck05@gmail.com

Митрохин Валерий Евгеньевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Телекоммуникационные, радиотехнические системы и сети», ОмГУПС.

Тел.: +7 (903) 926-74-70.
E-mail: mitrokhin@list.ru

Mitrokhin Valery Evgenievich

Omsk State University of Railway Transport (OSTU).

35 Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor of the department "Telecommunications, Radio Engineering Systems and Networks", OSTU.

Phone: +7 (903) 926-74-70.
E-mail: mitrokhin@list.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Повышение качества питающего напряжения постов электрической централизации электрифицированных железных дорог постоянного тока / К. П. Стишенко, М. В. Кипервассер, М. В. Жирнов, В. Е. Митрохин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 4 (64). – С. 27 – 39.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Stishenko K.P., Kiperwasser M.V., Zhirnov M.V., Mitrokhin V.E. Enhancement of power supply voltage quality at electric centralization stations on DC-electrified railways. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 4(64), pp. 27-39. (In Russian).

УДК 629.463.125

Д. Я. Монастырский, К. К. Ким

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕВОДА ЭНЕРГО- И ХОЛОДОСНАБЖЕНИЯ РЕФРИЖЕРАТОРНОГО ВАГОНА НА СЖИЖЕННЫЙ ПРИРОДНЫЙ ГАЗ

Аннотация. В современных условиях эксплуатации железнодорожного рефрижераторного транспорта, основными задачами стали повышение энергоэффективности подвижного состава и снижение эксплуатационных расходов. В данной статье приведен анализ энергетической и экономической эффективности замены энергетического оборудования автономного рефрижераторного вагона для перевода с дизельного топлива на сжиженный природный газ. С целью выполнения анализа авторами разработана

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

инженерная модель энергетического баланса оборудования автономного рефрижераторного вагона, дополненная контуром рекуперации холода от регазификации сжиженного природного газа. Методология исследования основана на системном подходе, учитывающем термодинамические свойства предлагаемого на замену топлива и специфику теплообменных процессов в грузовом отделении. На основе полученной модели произведен сравнительный анализ расчетных показателей рассмотренного энергетического оборудования, предназначенного для использования сжиженного природного газа, с эксплуатационными данными существующих дизельных аналогов. В ходе оценки эффекта от замены топлива подтверждена техническая возможность обеспечения нормативных показателей автономности вагона при переходе на сжиженный природный газ без ухудшения эксплуатационных характеристик подвижного состава. Установлено, что рекуперация холода от регазификации сжиженного природного газа существенно повышает энергетические показатели оборудования, обеспечивая достаточный уровень энергонезависимости и снижение расхода топлива за счет полезного использования физической эксергии газа. Разработанная модель позволяет всесторонне оценить системный эффект от замены дизельного топлива на сжиженный природный газ с учетом различных температурных режимов кузова вагона. Выводы демонстрируют, что перевод рефрижераторного подвижного состава с дизельного топлива на сжиженный природный газ для использования в качестве энергетического топлива и хладагента (когенерация) целесообразен.

Ключевые слова: автономный рефрижераторный вагон, когенерация, сжиженный природный газ, подвижной состав, рекуперация холода, энергоэффективность.

Dmitrii Ya. Monastyrskii, Konstantin K. Kim

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS), Saint Petersburg, the Russian Federation

PERFORMANCE ASSESSMENT OF TRANSITIONING POWER AND REFRIGERATION SUPPLY OF A REFRIGERATED CAR TO LIQUEFIED NATURAL GAS

Abstract. In the modern operating conditions of railway refrigerated transport, the primary tasks have become increasing the energy efficiency of rolling stock and reducing operating costs. This article presents an analysis of the energy and economic efficiency of replacing the power equipment of an autonomous refrigerated car to transition from diesel fuel to liquefied natural gas. To perform the analysis, the authors developed an engineering model of the energy balance for the autonomous refrigerated car equipment, supplemented by a cold recovery loop from liquefied natural gas regasification. The research methodology is based on a systems approach that considers the thermodynamic properties of the proposed replacement fuel and the specifics of heat exchange processes in the cargo compartment. Based on the obtained model, a comparative analysis was performed between the calculated indicators of the considered power equipment designed for liquefied natural gas and the operational data of existing diesel analogs. During the evaluation of the fuel replacement effect, the technical feasibility of ensuring standard car autonomy indicators when transitioning to liquefied natural gas without deteriorating the rolling stock's operational characteristics was confirmed. It was established that cold recovery from liquefied natural gas regasification significantly improves the equipment's energy performance, ensuring a sufficient level of energy autonomy and reduced fuel consumption through the beneficial use of the gas's physical exergy. The developed model allows for a comprehensive assessment of the systemic effect of replacing diesel fuel with liquefied natural gas, taking into account various temperature regimes of the car body. The conclusions demonstrate that converting refrigerated rolling stock from diesel fuel to liquefied natural gas for use as both energy fuel and refrigerant (cogeneration) is expedient.

Keywords: autonomous refrigerated car, cogeneration, liquefied natural gas, rolling stock, cold energy recovery, energy efficiency.

Эксплуатация автономных рефрижераторных вагонов (АРВ) требует строгого соблюдения температурного режима во время перевозки грузов. Традиционно энергоснабжение холодильно-отопительной установки осуществляется дизель-генераторным агрегатом, размещенным в машинном отделении вагона [1, 2]. Однако рост цен на дизельное топливо и ужесточение экологических требований диктуют необходимость поиска альтернативных решений.

Сжиженный природный газ (СПГ) в последнее время рассматривается как наиболее перспективная альтернатива дизельному топливу [3]. Высокая удельная плотность энергии, экологическая чистота выхлопа и наличие значительного холодильного потенциала, высвобождаемого при регазификации, делают СПГ привлекательным для использования на хладотранспорте, в том числе в качестве топлива и хладагента [3, 4]. Вместе с тем замена

энергетического оборудования вагона сопряжена с рядом инженерных ограничений, главным из которых является объем топлива, ограниченный свободным пространством машинного отделения, где обычно расположено термическое и энергетическое оборудование.

Целью настоящей работы является проведение анализа энергетической и экономической эффективности замены дизельного энергетического оборудования АРВ на газопоршневую генераторную установку, в качестве топлива использующую пары СПГ. Замена производится с учетом требований к продолжительности работы термического и энергетического оборудования АРВ в автономном режиме.

Объектом исследования является система энергоснабжения автономного рефрижераторного вагона. Кузов вагона разделен на грузовое и машинное отделения. В машинном отделении размещены генераторная установка и топливный бак. Принято, что объем дизельного бака АРВ составляет не менее 2000 л. Средний эксплуатационный расход дизельного топлива в соответствии с принятой практикой в российских условиях перевозок принят равным 2,0 л/ч. В рамках модернизации рассматриваются замена дизельной генераторной установки на газопоршневую генераторную установку и размещение в машинном отделении криогенной топливной системы. В качестве потребителя энергии рассматривается термическое оборудование с потребляемой мощностью до 17,0 кВт. Суммарная мощность прочих потребителей не превышает 0,5 кВт.

С учетом пусковых токов компрессоров полная потребляемая мощность установки в переходных режимах достигает 31 кВт·А. Для обеспечения надежной работы термического оборудования и стабильного поддержания частоты тока (50 Гц) при всплесках нагрузки, в качестве источника энергоснабжения выбрана газопоршневая генераторная установка номинальной мощностью 35 кВт·А. Привод генератора осуществляется газовым двигателем с эффективной механической мощностью на валу 38 кВт. Максимально допустимый геометрический объем криобака, пригодного для установки в машинном отделении, принят равным 3,0 м³.

Регазификация с рекуперацией холода обеспечивается за счет передачи теплоты от воздуха грузового отделения к жидкой фазе СПГ через стенку змеевикового теплообменника. Температура хранения СПГ принята –162 °С. Значительный холодильный потенциал СПГ обеспечивается за счет большой температурной разницы с окружающей средой, и в первую очередь за счет энергии, которую необходимо подвести к СПГ во время кипения (рисунок 1).

Для регулировки параметров СПГ в схеме подачи топлива предусмотрен криогенный насос. Избыточное давление СПГ в топливной линии принято до 0,6 МПа в рамках рабочих давлений криогенных топливных систем, предназначенных для использования СПГ на транспорте.

Для регулирования подачи СПГ и снижения риска дросселирования в теплообменник в целях полезной рекуперации его холодильного потенциала в топливной линии энергетической установки предусмотрена установка трехходового регулируемого клапана (рисунок 2). Если подача СПГ в теплообменник внутри грузового отделения приведет к нарушению температурного режима перевозки груза, регазификация осуществляется в газовом коллекторе, расположенном непосредственно перед двигателем. Для запуска энергетической установки используются пары СПГ из объема криобака или аккумулятор термического оборудования.

Для корректного сравнения двух видов топлива используется метод приведения к единой энергетической базе. Объемная плотность энергии топлива рассчитывается по формуле:

$$E_{об} = \frac{Q_n^p \rho_o}{3,6}, \text{ кВт} \cdot \text{ч/л}, \quad (1)$$

где Q_n^p – низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг; ρ_o – плотность топлива, кг/л.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

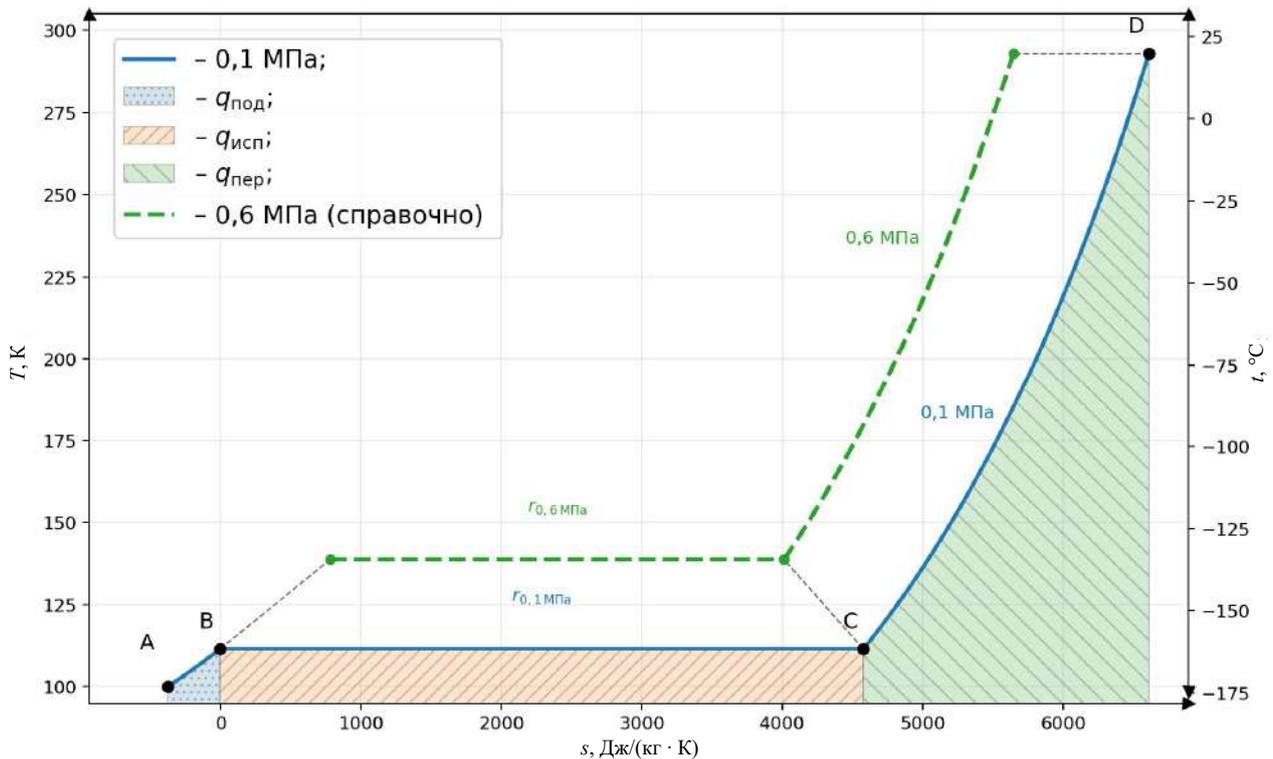


Рисунок 1 – Графическая оценка холодопроизводительности СПГ в диапазоне давлений от 0,1 до 0,6 МПа, где *A* – жидкость на входе в испаритель; *B* – насыщенная жидкость при термодинамических параметрах кипения СПГ; *C* – насыщенный пар при температуре кипения; *D* – газ на выходе из теплообменника. Линия *B – C* соответствует теплоте парообразования СПГ; $q_{\text{под}}$, $q_{\text{исп}}$, $q_{\text{пер}}$ – удельная энергия охлаждения до кипения, при кипении и после кипения соответственно, Дж/кг

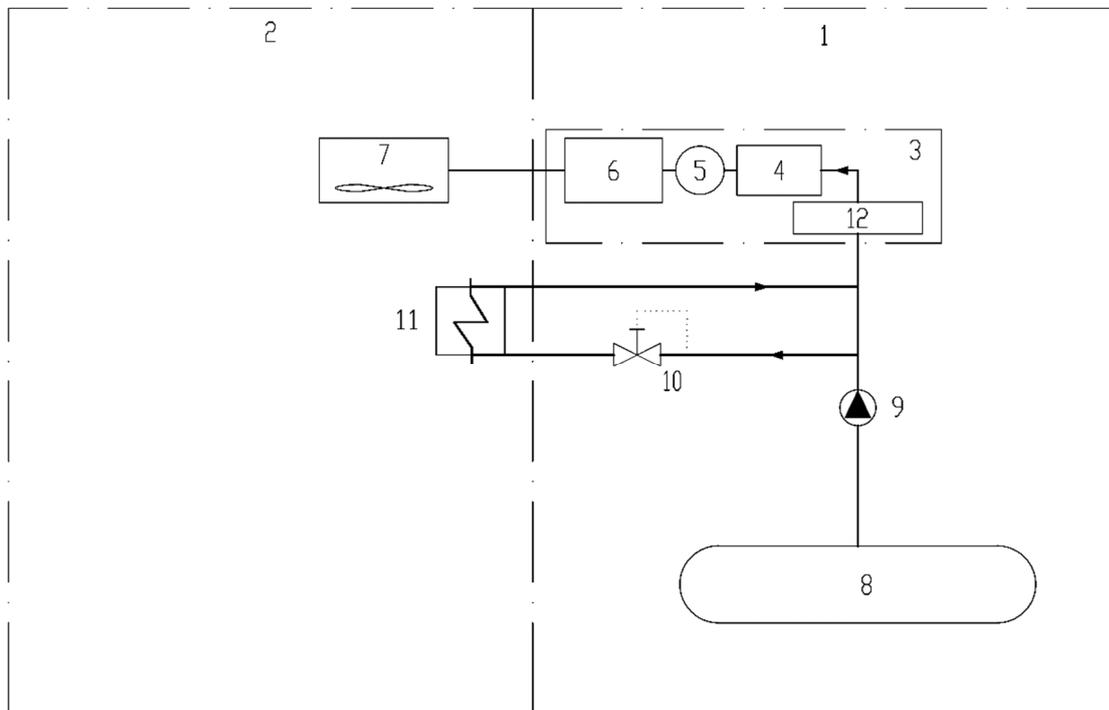


Рисунок 2 – Схема регазификации СПГ в топливном контуре холодильного агрегата: 1 – машинное отделение АРВ; 2 – грузовое отделение АРВ; 3 – холодильный агрегат; 4 – газопоршневой ДВС; 5 – генератор электроэнергии; 6 – компрессорно-конденсаторный блок; 7 – воздухоохладитель; 8 – криогенный бак для СПГ; 9 – криогенный насос; 10 – регулируемый трехходовой клапан; 11 – змеевиковый теплообменник; 12 – газовый коллектор

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Требуемая электрическая мощность генераторной установки зависит от тепловой нагрузки на вагон и эффективности холодильной машины:

$$P_{эл} = \frac{Q_t}{K_x} + P_{всп}, \text{ кВт}, \quad (2)$$

где Q_t – тепловая нагрузка на грузовой отсек кузова вагона, кВт; K_x – фактический холодильный коэффициент установки (~1,4); $P_{всп}$ – мощность вспомогательных систем, кВт.

Для определения параметров топливной линии с СПГ массовый расход топлива определяется выражением:

$$G_{спг} = \frac{3,6N_{гтд}}{Q_n^p \eta_{гтд}}, \text{ кг/ч}, \quad (3)$$

где $N_{гтд}$ – мощность теплового двигателя, кВт; $\eta_{гтд}$ – эффективный коэффициент полезного действия теплового двигателя генераторной установки. Холодопроизводительность рекуперации от регазификации СПГ определяется по формуле:

$$Q_{рек} = \frac{G_{спг}(h_{вых} - h_{вх})}{3600}, \text{ кВт}, \quad (4)$$

где $h_{вых}$ и $h_{вх}$ – энтальпии СПГ на выходе и входе в теплообменник соответственно, кДж/кг, при нагреве СПГ от -162°C до $+20^\circ\text{C}$.

Скорректированная потребляемая электрическая мощность при использовании рекуперации холода от регазификации определяется выражением:

$$P_{эл} = \frac{Q_t - Q_{рек}}{K_x} + P_{всп}, \text{ кВт}. \quad (5)$$

Объем топлива, необходимый для обеспечения рейса, рассчитывается по формуле:

$$V_t = \frac{E_{потр}}{E_{об} \eta_{гтд}}, \text{ л}, \quad (6)$$

где $E_{потр}$ – суммарная потребная электрическая энергия за рейс, кВт·ч.

В модели принято, что разность энтальпий $h_{вых} - h_{вх}$ обеспечивает системе рекуперации примерно 915 кДж/кг. В таком случае дополнительная холодопроизводительность достигает 2,1 кВт при максимально возможном расходе СПГ 8,3 кг/ч. Этот поток холода может быть направлен непосредственно на охлаждение грузового отсека или на переохлаждение хладагента, что снизит нагрузку на компрессор холодильно-отопительной установки.

Сравнение удельной энергоемкости топлив показало, что объемная плотность энергии дизельного топлива значительно выше (таблица 1). Один литр газа содержит на 41 % меньше энергии, чем литр дизельного топлива, что обуславливает необходимость повышения эффективности предлагаемой системы для сохранения продолжительности автономности без увеличения существующего объема машинного отделения.

Таблица 1 – Сравнение энергетических характеристик топлив

Параметр	Дизельное топливо	Сжиженный природный газ
Плотность, кг/л	0,84	0,45
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	42,7	47,0
Объемная плотность энергии, кВт·ч/л	9,96	5,87

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Для верификации модели использованы данные эксплуатации дизельных генераторных установок со средним расходом 2,0 л/ч. При запасе топлива 2000 л предельная автономность составляет 1000 часов, или 41,6 суток. При использовании сжиженного природного газа без утилизации холода расход топлива для обеспечения аналогичной нагрузки возрастает до 3,14 л/ч. При полезном объеме 1500 л, что соответствует криобаку СDPW–1050–1500–1.6 (AUYAN, Китай), рассчитанному при коэффициенте заполнения не более 0,9 и невыбираемом остатке, полезный объем системы с двумя баками (рисунок 3) составит 2600 л, а запас автономности – 828 часов, или 34,6 суток.

Внедрение системы рекуперации холода позволяет снизить потребляемую электрическую мощность генераторной установки. При средней эксплуатационной нагрузке генератора около 7 кВт за продолжительность рейса эффект от рекуперации составит 0,35 кВт.

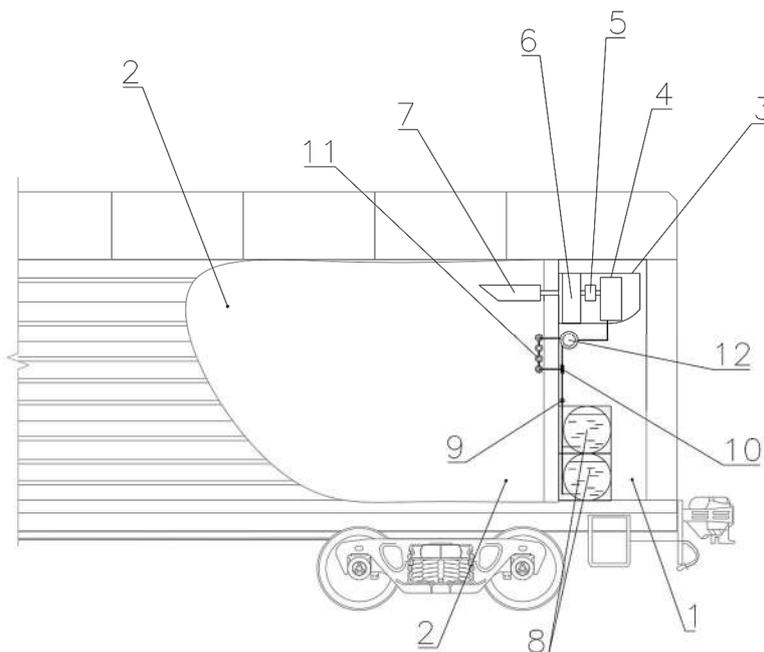


Рисунок 3 – Компоновка машинного отделения АРВ: 1 – машинное отделение; 2 – грузовое отделение; 3 – холодильный агрегат; 4 – двигатель; 5 – генератор; 6 – компрессорно-конденсаторный блок; 7 – воздухоохладитель; 8 – криогенный бак для СПГ; 9 – криогенный насос; 10 – регулируемый трехходовой клапан; 11 – змеевиковый теплообменник; 12 – газовый коллектор

Если в вагоне перевозятся замороженные грузы при температуре воздуха грузового отсека до -20°C , а расход топлива максимальный, эффект от рекуперации составит до 2,1 кВт. В этом режиме расход газа сокращается, что увеличивает запас автономности (таблица 2).

Таблица 2 – Результаты моделирования автономности и затрат на топливо

Параметр	Базовое топливо	СПГ без рекуперации	СПГ с рекуперацией
	Дизельное	Сжиженный природный газ	Сжиженный природный газ
Топливо	Дизельное	Сжиженный природный газ	Сжиженный природный газ
Средняя электрическая нагрузка, кВт	7,0	7,0	6,75
Холодильная мощность от рекуперации (средняя), кВт	0	0	0,35
Холодильная мощность от рекуперации (максимальная), кВт	0	0	2,1
КПД энергетической установки	0,35	0,38	0,38
Средний расход топлива, л/ч	2,00	3,14	3,06
Полезный объем бака, л	2000	2600	2600
Автономность, суток	41,6	34,6	35,5
Затраты на топливо, руб./ч	144,0	78,5	76,5
Снижение затрат, %	–	45,5	46,8

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Для расчета экономических показателей приняты рыночные цены, актуальные на конец 2025 г.: дизельное топливо – 72 руб./л, сжиженный природный газ – 25 руб./л. В таком случае для дизельного топлива стоимость генерации составит 20,65 руб./(кВт·ч), а для СПГ – 11,21 руб./(кВт·ч).

Результаты моделирования подтверждают, что прямая замена дизельного топлива на газ без дополнительных энергосберегающих мероприятий нецелесообразна, так как ведет к существенному сокращению плеча автономности (рисунок 4). Однако стандартные габариты машинного отделения типовых АРВ позволяют устанавливать баки сжиженного природного газа, эквивалентные дизельным по запасу энергии.

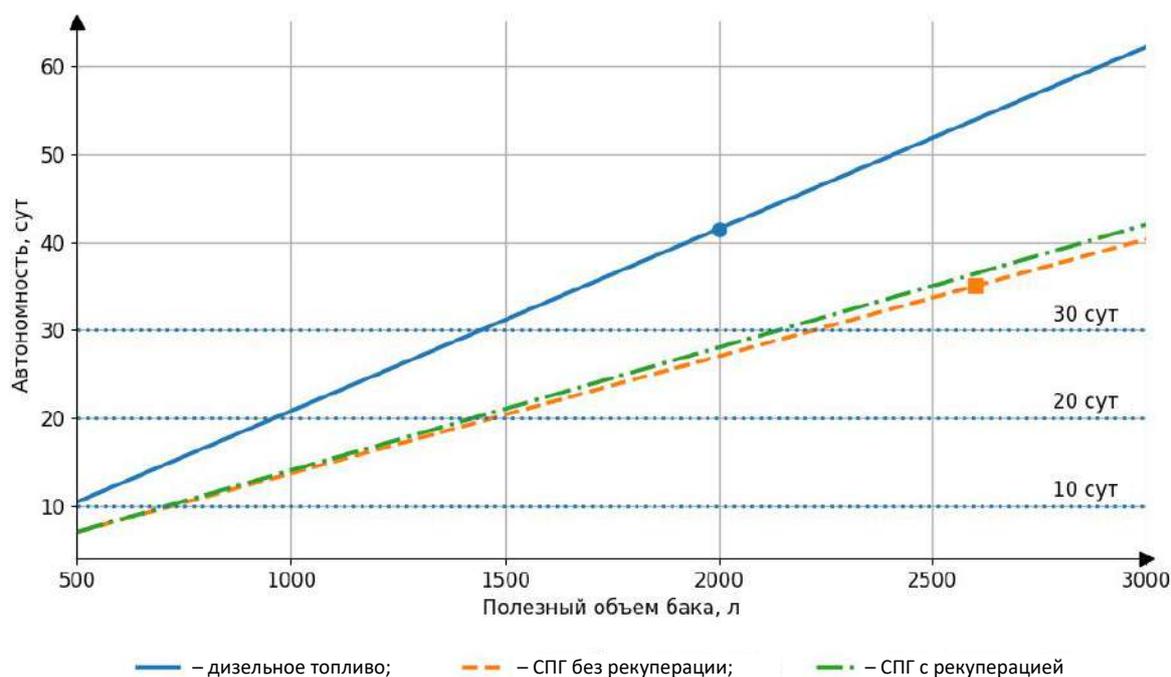


Рисунок 4 – Зависимость запаса автономности АРВ от полезного объема бака

Внедрение контура рекуперации холода позволяет дополнительно использовать холодильный потенциал регазификации величиной 0,92 МДж/кг, что создает запас на случай простоев и задержки вагона на пути следования. Это решение делает газовую генераторную установку на СПГ конкурентоспособной в качестве альтернативного энергетического оборудования АРВ.

Заметным фактором повышения эффективности становится рекуперация холода. В стандартном цикле регазификации из 1 кг СПГ в полезную работу преобразуется только часть энергии топлива, что составляет 17,9 МДж при КПД двигателя 0,38.

Известные исследования способов утилизации холода на транспорте подтверждают, что рекуперация холода в целом рациональна в отличие от использования физической эксергии СПГ или перепада потенциала для генерации электричества [5]. Несмотря на эффект от рекуперации и компенсацию теплопритоков в экстремальных условиях, что характеризуется снижением риска порчи грузов, наибольший эффект достигается из-за снижения затрат на производство электроэнергии (рисунок 5).

Известно, что рекуперация холода от регазификации СПГ целесообразна и перспективна на грузовом и пассажирском автомобильном транспорте [6, 7], а также в контейнерных перевозках, в том числе за счет снижения выбросов продуктов сгорания топлива, ускорения подготовки грузового отделения к рейсу и снижения риска порчи перевозимых грузов [4, 9].

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

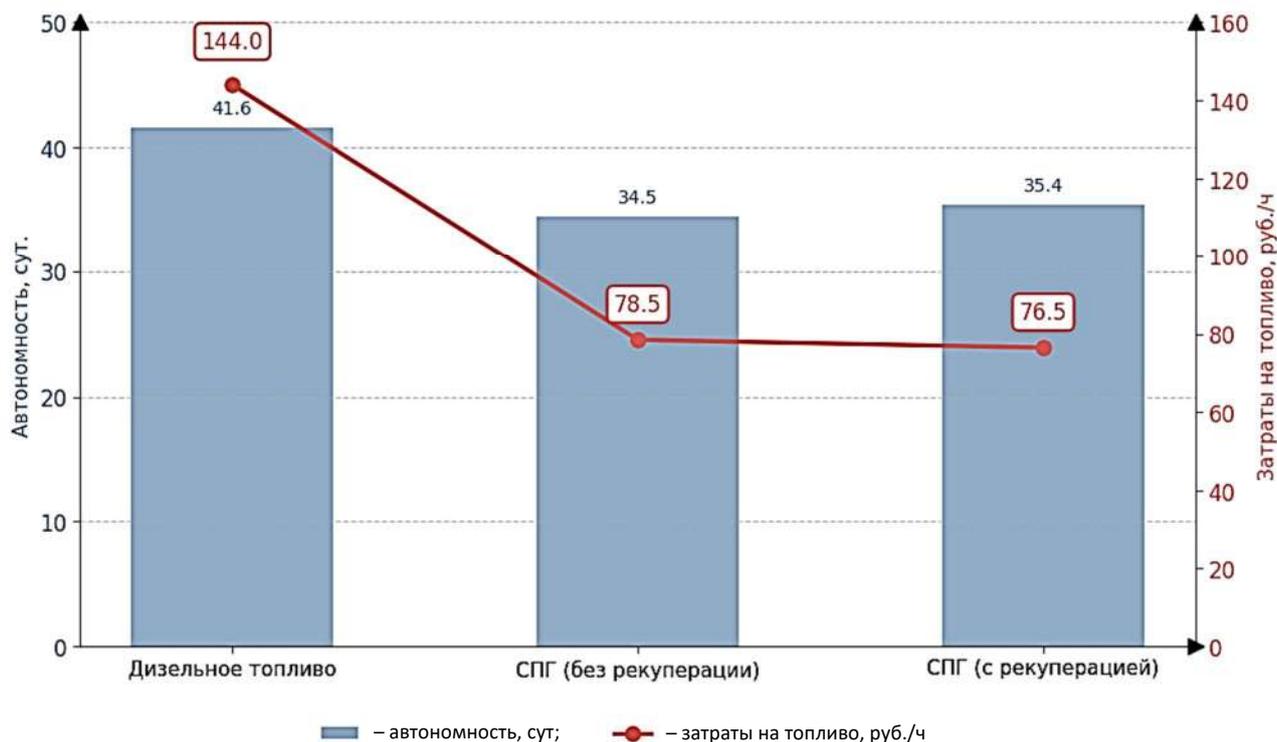


Рисунок 5 – Сравнение автономности и часовых затрат на топливо АРВ при замене дизельного топлива на СПГ (с рекуперацией и без нее)

Выполненное исследование энергетического баланса и технико-экономическое моделирование эксплуатации автономного рефрижераторного вагона подтвердило эффективность перехода на сжиженный природный газ.

1. Установлено, что физико-химические свойства сжиженного природного газа в сочетании с высоким КПД современных газопоршневых генераторных установок позволяют обеспечить нормативное требование о запасе автономности без дозаправки в рамках существующих габаритных ограничений машинного отделения при условии установки криобака объемом до 3,0 м³.

2. Доказано, что внедрение контура рекуперации холода от регазификации СПГ для поддержки основного термического оборудования вагона является важным условием для повышения эффективности АРВ. Рекуперация холода позволяет снизить расход топлива и повысить запас автономности до значений, сопоставимых с дизельными аналогами.

3. Эксплуатационная модель на сжиженном природном газе обеспечивает снижение топливных затрат до 47 %, что представляет модернизацию машинного отделения автономных рефрижераторных вагонов обоснованным технологическим шагом.

Список литературы

1. Железнодорожный хладотранспорт и доставка скоропортящихся грузов / В. В. Ефимов, Н. Г. Кобозева, О. А. Конограй, Н. А. Слободчиков. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2022. – 344 с. – Текст : непосредственный.

2. Тертеров, М. Н. Железнодорожный хладотранспорт / М. Н. Тертеров, Н. Е. Лысенко, В. Н. Панферов. – Москва : Транспорт, 1987. – 255 с. – Текст : непосредственный.

3. Ворон, О. А. Использование сжиженного природного газа в комбинированной энергосиловой установке автономного рефрижераторного вагона / О. А. Ворон. – Текст : непосредственный // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного

транспорта. – 2019. – Т. 78. – № 3. – С. 188–192. – DOI 10.21780/2223-9731-2019-78-3-188-192. – EDN ROCDWH.

4. Киселев, И. Г. О целесообразности использования сжиженного природного газа на рефрижераторных контейнерах с навесными дизель-генераторами / И. Г. Киселев, С. Б. Комиссаров, Д. Я. Монастырский. – Текст : непосредственный // Бюллетень результатов научных исследований. – 2021. – № 4. – С. 104–113. – DOI 10.20295/2223-9987-2021-4-104-113. – EDN GQVUYV.

5. Dorosz, P., Wojcieszak, P., & Malecha, Z. (2018). Exergetic analysis, optimization and comparison of LNG cold exergy recovery systems for transportation. *Entropy*, 20(1), 59. <https://doi.org/10.3390/e20010059>.

6. Tan, H., Li, Y., Tuo, H., Zhou, M., & Tian, B. (2010). Experimental study on liquid/solid phase change for cold energy storage of Liquefied Natural Gas (LNG) refrigerated vehicle. *Energy*, 35(5), 1927-1935. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.01.006>.

7. Tan, H., Li, Y., & Tuo, H. (2014). Theoretical and experimental study on a self-refrigerating system for LNG-fueled refrigerated vehicles. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 20, 192-199. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2014.06.022>.

8. Wang, F., Li, M., Zhang, Y., Liu, X., Xie, D., Zhang, Q., & Yang, H. (2021). Study on roof-mounted radiant cooling system for LNG-fueled refrigerated vehicles. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 16(2), 268-274. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctaa062>.

9. Монастырский, Д. Я. Эффективность применения утилизации холода СПГ в автономных рефрижераторных контейнерах / Д. Я. Монастырский, И. Г. Киселев. – Текст : непосредственный // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2025. – Т. 11. – № 2. – С. 246–260. – DOI 10.17816/transsyst681999. – EDN MAUGAY.

References

1. Efimov V.V., Kobozeva N.G., Konogray O.A., Slobodchikov N.A. *Zheleznodorozhnyy khladotransport i dostavka skoroportyashchikhsya gruzov* [Railway refrigerated transport and delivery of perishable goods]. Moscow, Educational and Methodological Center for Railway Transport Education (UMTs ZhDT) Publ., 2022, 344 p. (In Russian).

2. Terterov M.N., Lysenko N.E., Panferov V.N. *Zheleznodorozhnyy khladotransport* [Railway refrigerated transport]. Moscow, Transport Publ., 1987, 255 p. (In Russian).

3. Voron O.A. The use of liquefied natural gas in the combined power unit of autonomous refrigerated car. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Russian Railway Science Journal*, 2019, vol. 78, no. 3, pp. 188-192. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-3-188-192>. EDN ROCDWH. (In Russian).

4. Kiselyov I.G., Komissarov S.B., Monastyrsky D.Ya. On the expediency of using liquefied natural gas in refrigerated containers with mounted diesel generators. *Biulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy – Bulletin of scientific research result*, 2021, no. 4, pp. 104-113. <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2021-4-104-113>. EDN GQVUYV. (In Russian).

5. Dorosz, P., Wojcieszak, P., & Malecha, Z. (2018). Exergetic analysis, optimization and comparison of LNG cold exergy recovery systems for transportation. *Entropy*, 20(1), 59. <https://doi.org/10.3390/e20010059>.

6. Tan, H., Li, Y., Tuo, H., Zhou, M., & Tian, B. (2010). Experimental study on liquid/solid phase change for cold energy storage of Liquefied Natural Gas (LNG) refrigerated vehicle. *Energy*, 35(5), 1927-1935. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.01.006>.

7. Tan, H., Li, Y., & Tuo, H. (2014). Theoretical and experimental study on a self-refrigerating system for LNG-fueled refrigerated vehicles. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 20, 192-199. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2014.06.022>.

8. Wang, F., Li, M., Zhang, Y., Liu, X., Xie, D., Zhang, Q., & Yang, H. (2021). Study on roof-mounted radiant cooling system for LNG-fueled refrigerated vehicles. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 16(2), 268-274. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctaa062>.

9. Monastyrsky D.Y., Kiselev I.G. Efficiency of LNG cold energy recovery in standalone refrigerated containers. *Innovatsionnye transportnye sistemy i tekhnologii – Modern Transportation Systems and Technologies*, 2025, vol. 11, no. 2, pp. 246-260. <https://doi.org/10.17816/transsyst681999>. EDN MAUGAY. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Монастырский Дмитрий Ярославович

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС). Московский пр., д. 9, г. Санкт-Петербург, 190031, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Теоретические основы электротехники и энергетики», ПГУПС.

Тел.: +7 (812) 457-81-42.

E-mail: swen_88@mail.ru

Ким Константин Константинович

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС).

Московский пр., д. 9, г. Санкт-Петербург, 190031, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники и энергетики», ПГУПС.

Тел.: +7 (812) 457-81-42.

E-mail: kimkk@inbox.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Монастырский, Д. Я. Оценка эффективности перевода энерго- и холодоснабжения рефрижераторного вагона на сжиженный природный газ / Д. Я. Монастырский, К. К. Ким. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 4 (64). – С. 39 – 48.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Monastyrskii Dmitrii Yaroslavovich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS).

9, Moscow av., Saint-Petersburg, 190031, the Russian Federation.

Ph.D. student of the department “Theoretical Foundations of Electrical Engineering and Energetics”, PGUPS.

Phone: +7 (812) 457-81-42.

E-mail: swen_88@mail.ru

Kim Konstantin Konstantinovich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS).

9, Moscow av., Saint-Petersburg, 190031, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, full professor, head of the department “Theoretical Foundations of Electrical Engineering and Energetics”, PGUPS.

Phone: +7 (812) 457-81-42.

E-mail: kimkk@inbox.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Monastyrskii D.Ya., Kim K.K. Performance assessment of transitioning power and refrigeration supply of a refrigerated car to liquefied natural gas. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 4 (64), pp. 39-48. (In Russian).

УДК 656.073

С. Т. Болтаев, О. О. Мухиддинов, Э. Ш. Жоникулов

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ), г. Ташкент, Республика Узбекистан

ФОРМИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ НА ЛИНЕЙНЫХ ПУНКТАХ ДИСПЕТЧЕРСКОЙ ЦЕНТРАЛИЗАЦИИ

Аннотация. В статье рассмотрены современные подходы к совершенствованию систем диспетчерской централизации (ДЦ) с использованием программируемых логических контроллеров (ПЛК). Приведен анализ структуры и функционирования линейного пункта (ЛП), в составе которого реализуются каналы телеуправления (ТУ), телесигнализации (ТС) и синхронизации (ЦС). Особое внимание уделено вопросам повышения достоверности передаваемых данных за счет применения циклических избыточных кодов (CRC). В работе показаны возможности моделирования состояний контролируемых объектов с применением теории автоматов, в частности, автомата Мура, что позволяет повысить предсказуемость выходных характеристик системы и надежность управления. На примере ПЛК Siemens SIMATIC S7-1200 в среде TIA Portal приведена программная реализация фрагментов логики ДЦ на языке LD (Ladder Diagram). Полученные результаты демонстрируют эффективность применения ПЛК в железнодорожной автоматике и подтверждают перспективность дальнейшего внедрения интеллектуальных алгоритмов диагностики для повышения безопасности движения поездов.

В данной статье описано проведенное комплексное исследование системы диспетчерской централизации, являющейся ключевым элементом для обеспечения безопасности и эффективности управления движением поездов на современной железной дороге. Основное внимание уделяется процессам формирования и анализа дискретных сигналов на линейных пунктах, которые поступают от объектов электрической централизации (ЭЦ), таких как стрелки и светофоры. В работе подробно рассматриваются алгоритмы обработки этих сигналов, методы выявления и диагностики потенциальных неисправностей, таких как ложная занятость путевых участков или потеря контроля над объектами, которые могут привести к сбоям в движении.

Для повышения надежности и достоверности контроля состояния объектов предложена модель на основе теории автоматов, а именно автомата Мура. Данная модель позволяет формализовать и предсказать поведение системы в различных состояниях, учитывая временные последовательности изменения сигналов. С целью обеспечения целостности и достоверности передаваемых данных между центральным и линейными пунктами в работе предлагается использование помехоустойчивого циклического избыточного кода (CRC-8).

Практическая часть исследования включает в себя разработку и моделирование программной логики на языке релейно-контактных схем (Ladder Diagram) в среде TIA Portal для программируемого логического контроллера Siemens SIMATIC S7-1200, сертифицированного для применения на железнодорожном транспорте. Приведены структурные и функциональные схемы системы, таблицы переходов состояний автомата и временные диаграммы сигналов. Результаты работы направлены на повышение отказоустойчивости и бесперебойности функционирования систем диспетчерской централизации, что является ключевым фактором для развития интеллектуальных транспортных систем будущего.

Ключевые слова: диспетчерская централизация, электрическая централизация, дискретные сигналы, автомат Мура, телемеханика.

Sunnatillo T. Boltaev, Obidjon O. Muhiddinov, Egamberdi Sh. Joniqulov

Tashkent State Transport University (TSTU), Tashkent, the Republic of Uzbekistan

FORMATION OF SIGNALS AT LINEAR DISPATCH CENTRALIZATION POINTS

Abstract. The article examines modern approaches to improving dispatcher centralization (DC) systems through the use of programmable logic controllers (PLCs). An analysis is presented of the structure and functioning of the line station (LS), which incorporates channels for telecontrol (TC), telesignaling (TS), and synchronization (SC). Particular attention is paid to enhancing the reliability of transmitted data by applying cyclic redundancy codes (CRC). The study demonstrates the potential of modeling the states of controlled objects using automata theory, in particular the Moore automaton, which allows for improved predictability of system output characteristics and greater control reliability. Using the Siemens SIMATIC S7-1200 PLC in the TIA Portal environment, fragments of DC logic were implemented in the Ladder Diagram (LD) language. The obtained results demonstrate the effectiveness of applying PLCs in railway automation and confirm the prospects for further integration of intelligent diagnostic algorithms aimed at enhancing train traffic safety.

This article presents a comprehensive study of the dispatcher centralization (DC) system, which serves as a key element in ensuring the safety and efficiency of train traffic management on modern railways. The primary focus is on the processes of forming and analyzing discrete signals at line stations (LS), which originate from electrical interlocking (EI) objects such as switches and signals. The study provides a detailed discussion of signal processing algorithms, as well as methods for detecting and diagnosing potential malfunctions – such as false track occupancy or loss of object control – that may lead to operational disruptions.

To enhance the reliability and accuracy of object state monitoring, a model based on automata theory, namely the Moore automaton, is proposed. This model enables the formalization and prediction of system behavior under different states, taking into account temporal sequences of signal transitions. To ensure the integrity and reliability of transmitted data between the central and line stations, the use of a noise-resistant cyclic redundancy code (CRC-8) is proposed.

The practical part of the research includes the development and simulation of program logic in the Ladder Diagram language within the TIA Portal environment, using the Siemens SIMATIC S7-1200 PLC certified for railway applications. Structural and functional diagrams of the system, state transition tables of the automaton, and signal timing charts are provided. The results are aimed at improving the fault tolerance and uninterrupted functioning of dispatcher centralization systems, which constitutes a key factor in the advancement of future intelligent transport systems.

Keywords: dispatcher centralization, electric centralization, discrete signals, Moore automaton, remote control.

Современные железнодорожные системы требуют высокой степени автоматизации и надежности для обеспечения безопасности движения поездов и эффективного управления перевозочным процессом. Одной из ключевых систем, реализующих данные функции,

является система диспетчерской централизации (ДЦ). Она объединяет в себе устройства автоматики, телемеханики и связи, обеспечивая централизованное управление маршрутами, стрелками и светофорами на железнодорожных станциях и перегонах [1 – 7].

Актуальность темы обусловлена необходимостью повышения точности и надежности обработки информации в условиях усложняющейся инфраструктуры и увеличения интенсивности движения. В условиях роста требований к безопасности особое внимание уделяется анализу и контролю дискретных сигналов, поступающих от объектов электрической централизации (ЭЦ), а также своевременному выявлению неисправностей оборудования.

Цель данного исследования заключается в анализе телесигналов, формируемых в линейном пункте (ЛП), и моделировании состояния объектов управления в системе ДЦ на основе применения теории автоматов.

Диспетчерская централизация представляет собой комплекс, состоящий из устройств автоматики, телемеханики и связи. В составе системы функционируют каналы телеуправления (ТУ) и телесигнализации (ТС). По каналу ТУ с центрального поста (ЦП) передаются сигнал телеуправления – команда, подаваемая поездным диспетчером (ДНЦ) и циклический синхросигнал (ЦС), определяющий начало нового цикла передачи сигналами ТС, отражающими состояние устройств на станции, и принимаются на линейном пункте. В зависимости от принятого на ЛП сигнала он либо передает ответ ЦП, либо выполняет соответствующую команду [1].

Поскольку система ДЦ является технологической системой, включающей в себя человеческие и аппаратные ресурсы, качество управления зависит от объема, оперативности и достоверности принимаемой информации. В современной практике развития систем центрального диспетчерского управления (ЦДУ) прослеживается тенденция к построению этих систем на основе программируемых логических контроллеров (ПЛК). ПЛК представляют собой специальные цифровые вычислительные устройства, предназначенные для управления технологическими процессами, способные функционировать в широком диапазоне температур, устойчивые к помехам и вибрациям.

В системе ДЦ контроллер выполняет следующие функции: сбор информации с реле электрической централизации, первичная обработка собранных данных, передача их на верхний уровень ДЦ, прием управляющих команд с верхнего уровня и дальнейшая передача их исполнительным устройствам.

На участке ДЦ движение поездов осуществляется на основе команд, передаваемых поездным диспетчером, с использованием средств автоматики, телемеханики и связи, путем организации определенных маршрутов. В состав маршрутов, устанавливаемых на станции, входят стрелки и светофоры, ограничивающие движения, при этом поезда следуют в соответствии с показаниями светофоров.

Стрелки и светофоры, входящие в состав электрической централизации, являются основными объектами контроля системы ДЦ [2, 6]. В процессе эксплуатации ДЦ могут возникать различные неисправности. Вследствие повреждений монтажных проводов или отказов оборудования ЭЦ могут проявляться нештатные состояния:

- ложная занятость путей участков;
- потеря контроля над отдельными объектами или над всей станцией;
- невозможность открытия/закрытия светофоров;
- невозможность установки или отмены маршрутов и др. [2].

На рисунке 1 приведена доля неисправностей, возникающих в устройствах СЦБ.

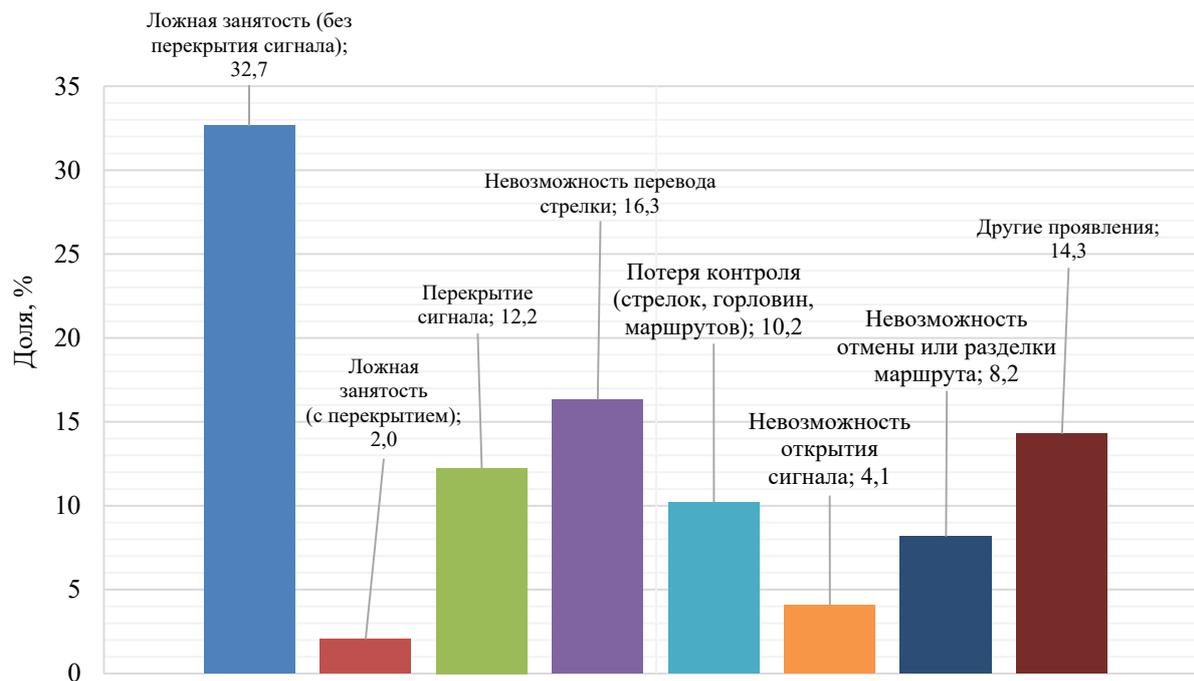


Рисунок 1 – Виды неисправностей в устройствах ЭЦ

Исходя из изложенного выше, программную часть ДЦ на линейном пункте (рисунок 2) можно разделить на следующие три составляющие:

- программу оценки входных данных;
- программу выполнения заданных команд;
- управляющую программу.

Устройство передающей системы, изображенное на рисунке 2, является частью системы, обеспечивающей связь между центральным постом и линейным пунктом. В проектах, внедряемых в производство в настоящее время, в качестве приемо-передающих устройств применяются комплексы UMUX.

Возникающие неисправности оказывают влияние на нормальную работу ДНЦ при организации движения поездов. Это может привести к остановке поездов либо к их задержкам. Поэтому достоверность информации, поступающей от объектов электрической централизации, имеет важное значение. Как и во всех системах ДЦ, в линейном пункте контроль состояния объектов осуществляется на основе анализа напряжений на входах модулей. На входах дискретных модулей формирование информации производится посредством пороговых функций:

$$f(u) = \begin{cases} 0, & \text{если } u < U_{\text{ч}}; \\ 1, & \text{если } u > U_{\text{ч}}, \end{cases} \quad (1)$$

где u – напряжение на входах дискретных модулей; $U_{\text{ч}}$ – пороговое напряжение.

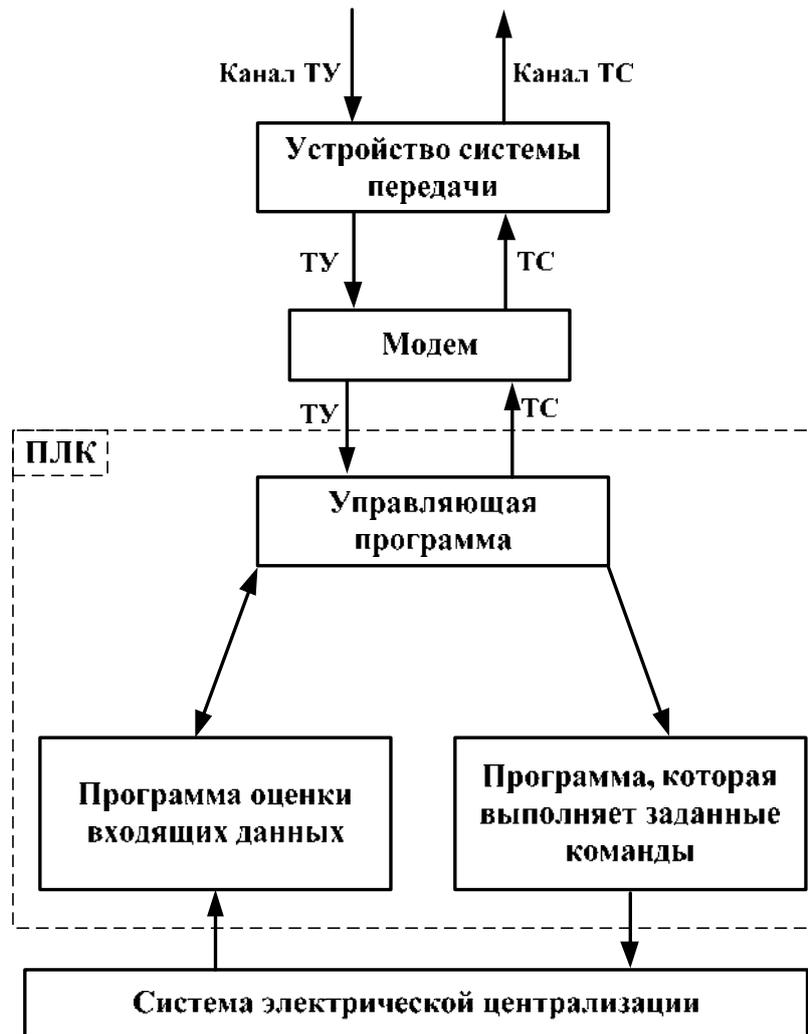


Рисунок 2 – Функциональная схема системы на ЛП

Вид дискретного сигнала на входах модулей приведен на рисунке 3.

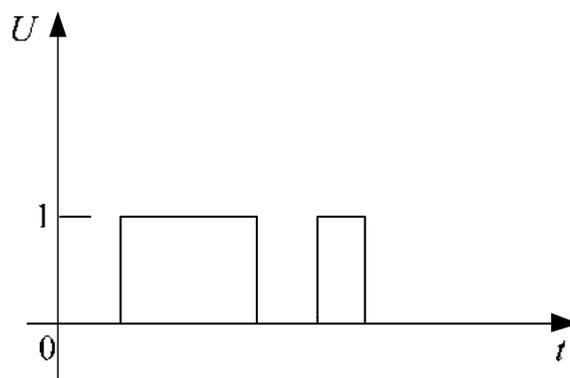


Рисунок 3 – Пример дискретного сигнала

В ходе исследования ПЛК был запрограммирован традиционным образом на основе языка релейно-контактных схем, соответствующего стандарту IEC 61131-3, или на языке программирования *Ladder Diagram (LD)*. Данный язык позволяет инженеру в наглядной форме описывать логические операции посредством электрических цепей с нормально разомкнутыми и нормально замкнутыми контактами. Обозначения основных элементов языка LD приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Условные обозначения в языке LD

Элементы языка LD (Ladder Diagram)	Описание
	Нормально открытый контакт: находится в разомкнутом состоянии, когда значение связанной переменной равно <i>false</i> , и замыкается при значении <i>true</i>
	Нормально закрытый контакт: напротив, находится в замкнутом состоянии, когда значение переменной равно <i>false</i> , и размыкается при значении <i>true</i>
	Окончательный результат логической цепи записывается в целевую (результатирующую) переменную

В ходе проведения исследования были изучены различные типы ПЛК, при этом были выбраны контроллеры компании *Siemens*. В программной среде *TIA Portal* для ПЛК *Siemens SIMATIC S7-1200*, имеющего сертификаты, допускающие его применение на железнодорожном транспорте, была разработана часть программы на языке LD, представленная на рисунке 4.

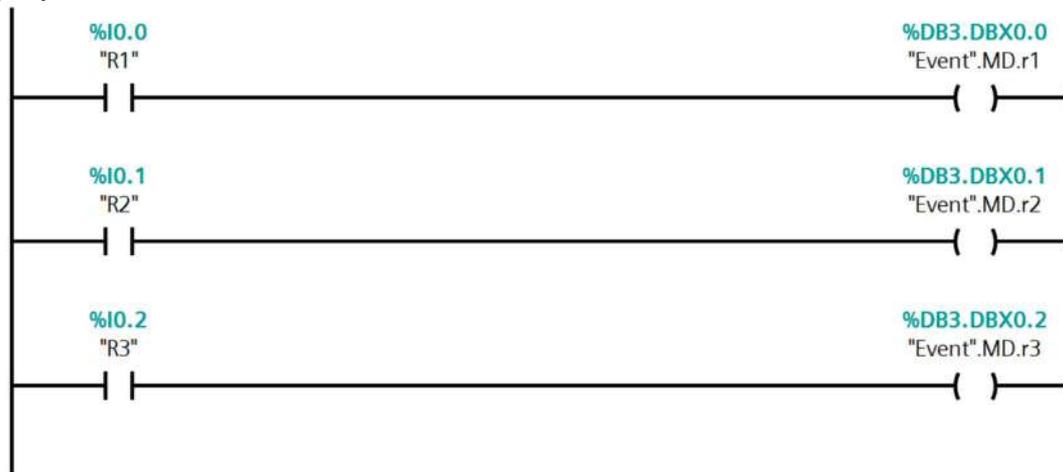


Рисунок 4 – Пример программы на языке LD

В данном примере (см. рисунок 4) входы I0.0, I0.1 и I0.2 подключены к соответствующим контактам реле, отображающих состояние объектов ЭЦ. В зависимости от изменения состояния реле в ЭЦ локальным переменным (r_1, r_2, r_3) присваивается логическая единица или логический ноль.

В программе оценки входных данных обрабатывается информация, поступающая от системы ЭЦ. Управляющая программа в зависимости от содержания команды, переданной с центрального поста, формирует ответ или передает команду в систему ЭЦ.

В системе ДЦ объектами контроля являются комплексы релейно-контактных схем, основную часть которых составляют релейные элементы. При отслеживании поезда, вошедшего на участок ДНЦ, на маршруте его движения срабатывают отдельные реле в соответствии с логикой работы схемы.

Движение поездов осуществляется в определенной логически обоснованной последовательности. Например, при приеме поезда на произвольной станции в нормальном состоянии на входном светофоре должен загореться разрешающий сигнал, а стрелки должны быть установлены по направлению маршрута. Каждый элемент маршрута рассматривается как отдельный объект. События, происходящие на каждом контролируемом объекте на линейном пункте, зависят от динамики изменений релейных элементов $r_i \in R$ (R – набор реле в системе ЭЦ). Динамика изменения событий r_i , характеризующих состояние релейных контактов

(под напряжением или без напряжения), представляет собой последовательность телесигналов, возникающих на соответствующих дискретных входах в течение определенного временного интервала t , которая отражает состояние контролируемых объектов.

Такую последовательность можно описать следующим образом:

$$P = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, \{r_{j1}, r_{j2}, \dots\}, \dots, r_{in}), \quad (2)$$

где P – множество событий; r_{in} – событие, происходящее в данный момент времени в последовательности событий, а $\{r_{j1}, r_{j2}, \dots\}$ – подмножество, представляющее собой совокупность событий, наблюдаемых одновременно.

Последовательность может быть записана в виде конъюнктивной формулы темпоральной логики (3):

$$P = \& (r_i \varphi_k r_j). \quad (3)$$

С помощью φ_k определяются временные отношения между событиями.

В качестве примера приведем временную последовательность ТС-импульсов, получаемых от реле R_1, R_2, R_3 , представленных на рисунке 5.

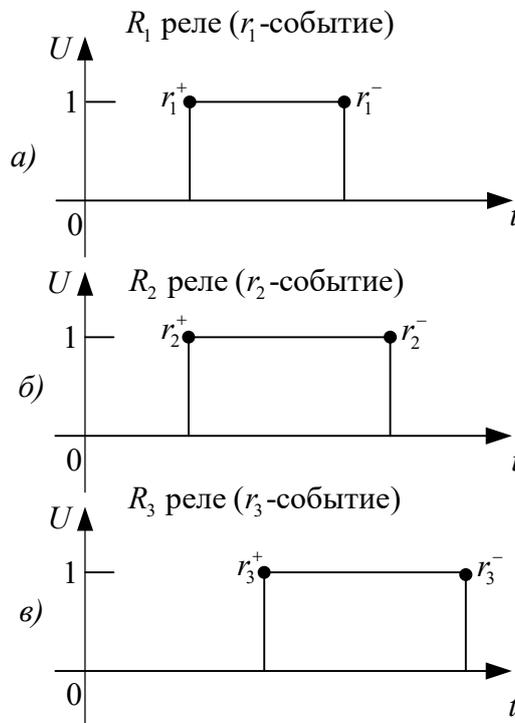


Рисунок 5 – Пример диагностируемого временного процесса

Событие, показанное на рисунке 5, представлено в выражении:

$$P = (\{r_1^+, r_2^+\}, r_3^+, r_1^-, r_2^-, r_3^-). \quad (4)$$

В выражении (4) r_i^+ – событие, характеризующее наличие тока в реле i -й системы, а r_i^- – событие, описывающее его обесточенное состояние. Данную последовательность будем называть диагностируемым временным процессом (ДВП).

Для ДВП, приведенного на рисунке 5, темпоральная формула имеет вид:

$$P = (r_1^+ \varphi_0 r_2^+) \& (r_1^+ \varphi_2 r_3^+) \& (r_3^+ \varphi_2 r_1^-) \& (r_2^- \varphi_0 r_1^-) \& (r_2^- \varphi_2 r_3^-); \quad (5)$$

$$\varphi = \{\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2\}. \quad (6)$$

Здесь φ – множество временных отношений между определенными событиями; φ_0 – события, происходящие одновременно; φ_1 – события, происходящие ранее по времени; φ_2 – события, происходящие позже по времени. Формулу (5) можно выразить через различные комбинации. Это выражается через данные таблицы 2.

Таблица 2 – Формирование темпоральных отношений

	r_1^+	r_1^-	r_2^+	r_2^-	r_3^+	r_3^-
r_1^+	φ_0	φ_2	φ_0	φ_2	φ_2	φ_2
r_1^-	φ_1	φ_0	φ_1	φ_2	φ_1	φ_2
r_2^+	φ_0	φ_2	φ_0	φ_2	φ_2	φ_2
r_2^-	φ_1	φ_1	φ_1	φ_0	φ_1	φ_2
r_3^+	φ_1	φ_2	φ_1	φ_2	φ_0	φ_2
r_3^-	φ_1	φ_1	φ_1	φ_1	φ_1	φ_0

Анализируя φ_k , можно выявить ложную занятость и аналогичные возможные ложные данные. Поезд последовательно проходит секции, что отслеживается посредством контроля состояния путевых реле. Если занятость не происходит в установленной последовательности, то можно сделать первичный вывод о возникновении ложной занятости.

Моделирование состояний контролируемых объектов на основе теории автоматов рассмотрим на примере стрелочных и бесстрелочных участков станции, а также путей. Автомат описывается с помощью шестикомпонентного множества:

$$C = \langle Z, X, A, \delta, \lambda, W \rangle \quad (7)$$

где $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_n\}$ – множество, определяющее состояние объекта (входной алфавит); $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ – множество, характеризующее состояние реле (комбинация реле в объекте); $A = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}$ – множество состояний автомата; δ – функция переходов; λ – функция выходов; $W = \{w_1, w_2, \dots, w_p\}$ – множество выходных сигналов.

Обобщенная структурная схема автомата C приведена на рисунке 6.

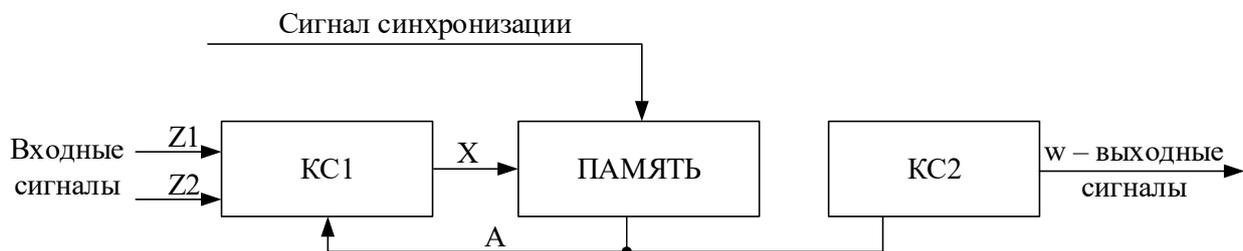


Рисунок 6 – Структурная схема автомата C

На рисунке 6 КС1 и КС2 – комбинаторные схемы, КС2 формирует выходной сигнал автомата, КС1 формирует сигнал управления памятью. Память автомата представляет собой совокупность триггеров. В представленной структурной схеме автомат Мура применяется исключительно на выходном уровне (КС2). Это позволяет формировать выходные сигналы только на основе состояний памяти, что обеспечивает устойчивость и предсказуемость выходных характеристик при минимальной задержке. Такой подход исключает непосредственное влияние мгновенных изменений входных сигналов на выход, что повышает

надежность работы системы [4]. Работа автомата Мура на основе структурной схемы описывается формулами:

$$\begin{cases} X = f_{КС1}(Z, a(t)); \\ a(t+1) = \delta(a(t), Z); \\ W = \lambda(a(t)), \end{cases} \quad (8)$$

где $Z = \{z_1, z_2\}$ и $a(t) \in A$.

Контроль путевых участков осуществляется посредством проверки состояния путевых и замыкающих реле. Обозначим: токовое состояние путевого реле $z_1=0$, бестоковое состояние $z_1=1$. Кроме того, в зависимости от состояния замыкающих реле возможны состояния $z_2=0$ или $z_2=1$. Количество комбинаций $N=2^n$. N – число комбинаций; n – число входных переменных. Всего образуется $n = 2 \Rightarrow N = 2^2 \Rightarrow N = 4$ комбинаций (таблица 3).

Таблица 3 – Состояние путевых участков на станции

z/x	x_1	x_2	x_3	x_4
z_1	0	0	1	1
z_2	0	1	0	1

Для автомата C составим таблицу функций переходов и выходов (таблица 4).

Таблица 4 – Функции переходов и выходов автомата C

X	$\lambda(a_1)$	$\lambda(a_2)$	$\lambda(a_3)$	$\lambda(a_4)$
	w_1	w_2	w_3	w_4
x_1	$\delta(a_1, x_1)$	$\delta(a_1, x_1)$	$\delta(a_1, x_1)$	$\delta(a_1, x_1)$
x_2	$\delta(a_2, x_2)$	$\delta(a_2, x_2)$	–	$\delta(a_2, x_2)$
x_3	$\delta(a_3, x_3)$	–	$\delta(a_3, x_3)$	$\delta(a_3, x_3)$
x_4	–	$\delta(a_4, x_4)$	$\delta(a_4, x_4)$	$\delta(a_4, x_4)$

На основании данных таблицы 4 графическое представление автомата приведено на рисунке 7.

На рисунке 7 a_1 – состояние, когда по участку пути маршрут не установлен и он свободен; если на вход автомата поступает информация x_2 или x_3 , то соответственно происходит переход в состояние a_2 – маршрут установлен по участку пути и он свободен либо в состояние a_3 – маршрут не установлен по участку пути и он занят. Из состояния a_1 переход в a_4 – маршрут установлен по участку пути и он занят – технически невозможен. Поэтому переход из a_1 в состояние a_4 отсутствует.

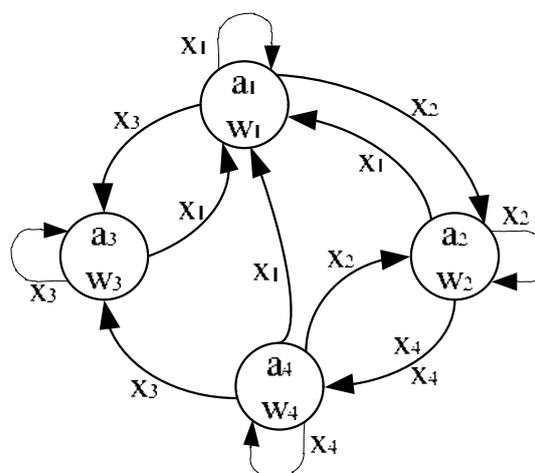


Рисунок 7 – Графическое представление автомата C

Программная реализация функционального блока для секции, разработанного на основе структуры автомата Мура, приведенной на рисунке 6, представлена на рисунке 8.

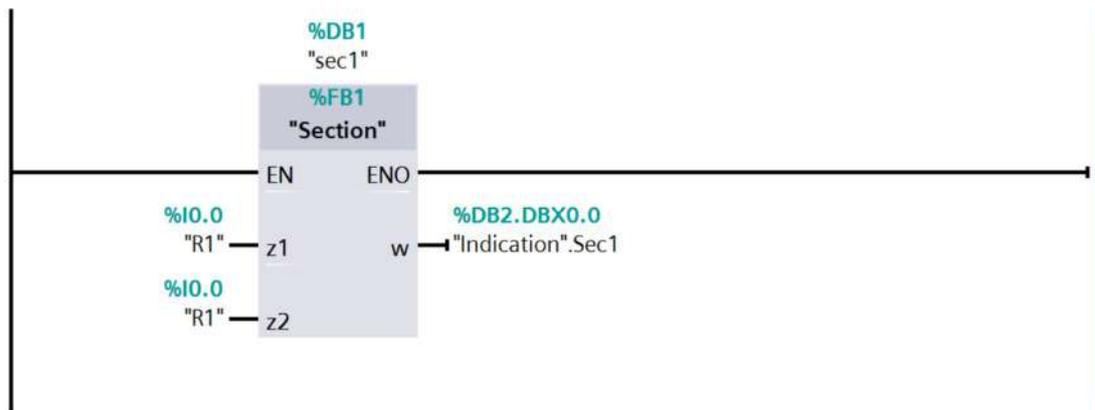


Рисунок 8 – Пример программного представления автомата Мура

Алгоритм работы части системы ДЦ на ЛП, приведенной на рисунке 2, представлен на рисунке 9.

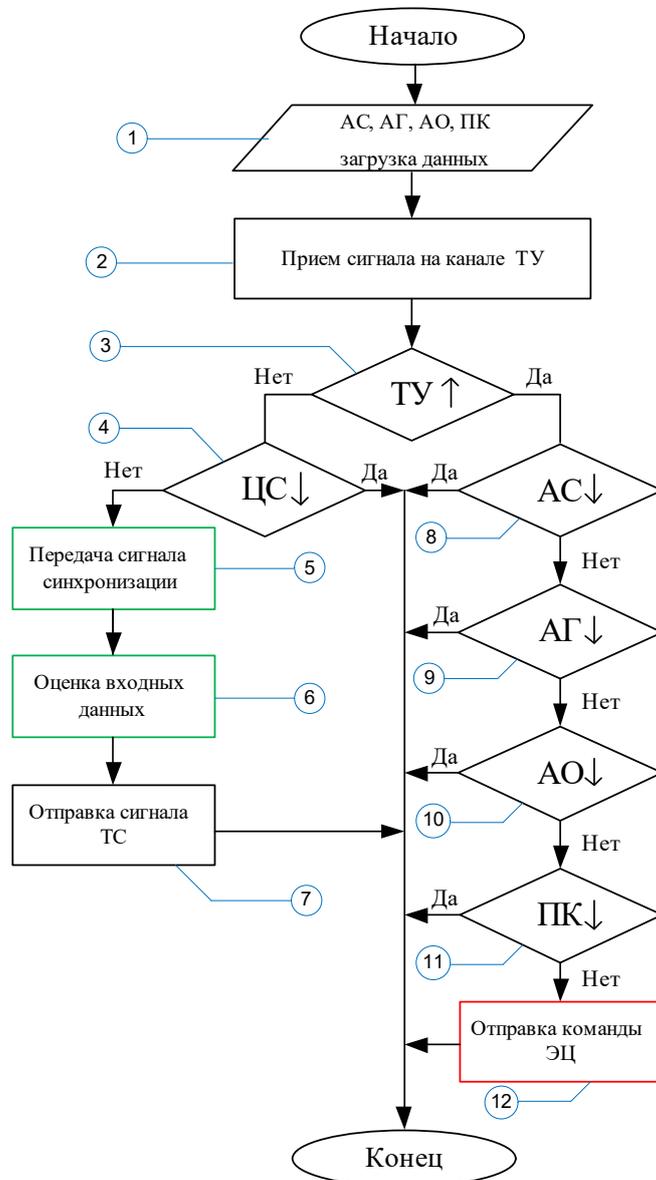


Рисунок 9 – Алгоритм работы системы ДЦ на линейном пункте

В алгоритме, приведенном на рисунке 9, адрес станции участка обозначен как АС, групповой адрес станции – АГ, адрес соответствующего объекта в группе – АО, а признак заданной команды ТУ – как ПК. Эти данные вводятся в блоке 1. Сигнал, принимаемый из канала ТУ (блок 2), проверяется на соответствие сигналу ТУ↑ (блок 3), а при несоответствии ЦС признается ЦС↓ в блоке 4. Составляющая часть сигнала ТУ проверяется в таком же порядке, что отражено в блоках 8 – 11 алгоритма. Если результат проверки является удовлетворительным, то принятая команда передается в ЭЦ (блок 12). Если принятый сигнал является сигналом ЦС, то из управляющей программы в программу оценки входных данных передается сигнал синхронизации (блок 5). В программе оценки входных данных производится оценка входной информации (блок 6), формируется сигнал ТС и передается сигнал ТС (блок 7).

В настоящее время в системах железнодорожной автоматики и телемеханики циклические коды (CRC) получили широкое распространение в системах передачи данных и используются как средство повышения достоверности применяемых кодов благодаря своим свойствам [3, 5, 8 – 10].

В составе сигнала ТС содержится адрес станции, группы объектов при контроле станций, в каждой группе формируется оперативная часть сигнала и CRC.

Сигнал, передаваемый по каналу ТС, в общем случае вычисляется с помощью полиномиальной функции, обеспечивающей помехоустойчивый обмен данными между ЦП и ЛП в составе ДЦ, и определяется выражением:

$$F(x) = S(x) \cdot x^r + R(x), \quad (9)$$

где r – степень CRC; $S(x)$ – последовательность информационных бит. Параметр S задается в виде полинома и приводится в формуле

$$S(x) = s_0 + s_1 \cdot x + \dots + s_{k-1} \cdot x^{k-1}, s_i \in \{0,1\}. \quad (10)$$

С учетом того, что количество станций в составе АО «Узбекистон темир йўллари» превышает $260 > 2^8$ и меньше $513 > 2^9$, длину кода адреса станции принимаем равной 9. Для одной станции максимально может быть 31 группа, а в каждой группе 18 ячеек. Так как $31_{10} = 11111_2$, вычисляем общую длину информационного кода: $9 + 5 + 18 = 32$. Отсюда $S(x)$ можно записать в виде полинома:

$$S(x) = s_0 + s_1 \cdot x + \dots + s_{32-1} \cdot x^{32-1}, s_i \in \{0,1\}. \quad (11)$$

С учетом ресурсных возможностей ПЛК Siemens SIMATIC S7-1200 недопущения его перегрузки и обеспечения достаточного уровня выявления ошибок оптимальным вариантом было выбрано использование кода CRC-8. Как правило, CRC-8 функционирует на основе распространенных полиномов:

$$g(x) = x^8 + x^2 + x + 1. \quad (12)$$

Из формулы (9) следует, что $r = 8$. Кроме того, $R(x)$ является остатком, и он определяется по формуле:

$$R(x) = (x^r \cdot M(x)) \bmod g(x), \deg R(x) < r. \quad (13)$$

В качестве примера последовательно рассмотрим формирование ТС для 20-й группы 34-й станции. Предположим, что информационная последовательность для вычисления CRC имеет вид, представленный в таблице 5.

Таблица 5 – Информационная часть ТС-сигнала

Информационное содержание	Адрес станции									Адрес группы					Оперативная часть																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Порядковый номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Код	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	

В таблице 5 код в полиномиальной форме $S(x)$ имеет вид:

$$S(x) = x^{31} + x^{28} + x^{25} + x^{22} + x^{21} + x^{19} + x^{17} + x^{15} + x^{13} + x^{11} + x^9 + x^8 + x^5 + x^3 + x^1. \quad (14)$$

С помощью формулы (13) вычисляется $R(x)$, в результате получаем выражение

$$R(x) = x^7 + x^5 + x^2 + x^1 \rightarrow 10100110 = 0xA6. \quad (15)$$

Из результата (15) следует, что остаток $R(x) = 0xA6$.

Обобщая изложенное выше, можно отметить, что в одном цикле ТС-сигнала код, передающий информацию 20-й группы 34-й станции (Информация + CRC), имеет вид: 0001000010 10100 101001100100101110.

Если при делении принятой на центральном посту информации на $g(x)$ остаток равен нулю, то это означает, что ТС-сигнал был принят полностью и корректно.

Таким образом, обеспечение безопасности движения на железнодорожном транспорте, эффективное управление потоками поездов и контроль их бесперебойного движения основаны на точности, оперативности и надежности системы ДЦ. В части ЛП системы ДЦ для предотвращения ошибок использовались анализ дискретных сигналов, временные последовательности и теория автоматов. С помощью этих методов каждый сигнал системы анализируется, состояние оценивается на основе временных интервалов и принимаются соответствующие меры. Моделирование рабочих состояний с учетом возможных задержек на выходе было выполнено с использованием автомата Мура.

Выполненное исследование показало, что использование ПЛК в системах диспетчерской централизации обеспечивает высокую гибкость и адаптивность программных решений, позволяя оперативно вносить изменения в алгоритмы управления. Применение циклических избыточных кодов (CRC-8) способствует повышению достоверности телесигналов и снижению вероятности ложной занятости путевых участков. Моделирование логики работы станционных устройств на основе автомата Мура доказало свою эффективность для формирования устойчивых и предсказуемых выходных сигналов, что повышает надежность функционирования системы.

Практическая реализация разработанных решений на базе контроллера Siemens SIMATIC S7-1200 подтвердила возможность их применения в железнодорожной отрасли. Результаты работы могут быть использованы при модернизации действующих систем ДЦ и разработке новых поколений цифровых комплексов, обеспечивающих высокий уровень безопасности движения поездов.

В заключение можно сказать, что ДЦ-системы являются неотъемлемой частью современной транспортной инфраструктуры. Они не только обеспечивают безопасность, но и позволяют эффективно управлять железнодорожной сетью с высокими надежностью и скоростью. Дальнейшее развитие этих систем и их интеграция с искусственным интеллектом и цифровыми технологиями откроют новую эру в железнодорожной отрасли.

Список литературы

1. Boltayev, S., Muhiddinov, O., Vasiyev, X., & Qodirov, I. (2025). Poyezd dispetcheri uchastkasida marshrutlarni avtomatik boshqarishni modellashtirish. *Journal of Transport*, 2(2), 117-121. (In Uzbek).
2. Хидиров, Э. И., & Болтаев, С. Т. (2022). “Ўзбекистон темир йўллари” акциядорлик жамиятининг сигналлаштириш ва алоқа хўжалиги курилмаларидаги носозликлар таҳлили. *Oriental renaissance: Innovative, educational, natural and social sciences*, 2(5), 174-181. (In Uzbek).
3. Baltayev, J. S., & Boltayev, S. (2022). Model and Methods for Detecting Undetected Errors Using a Signature Analyzer. In *International School on Neural Networks, Initiated by IIASS and EMFCSC* (pp. 1101-1110). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-11058-0_112.
4. Шифрин, Б. М. Синтез дискретных автоматов / Б. М. Шифрин, И. В. Елисеев, Е. С. Пендриков. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова, 2018. – 36 с. – Текст : непосредственный. – EDN BOQFMR.
5. Хатламаджиян, А. Е. Методы автоматизации процессов логического контроля в транспортных системах диспетчерского управления на основе гибридных моделей и генетических алгоритмов : специальности 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами», 05.13.17 «Теоретические основы информатики» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Хатламаджиян Агоп Ервандович; Ростовский государственный университет путей сообщения. – Ростов-на-Дону, 2005. – 18 с. – Текст : непосредственный. – EDN NIHDCL.
6. Формирование и оптимизация баз знаний интеллектуальных систем динамического типа на основе генетических алгоритмов / А. Н. Шабельников, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик, С. М. Ковалев // Известия ТРТУ. – 2003. – № 2 (31). – С. 79–87. – EDN KWDIAL.
7. Переборов, А. С. Диспетчерская централизация / А. С. Переборов, О. К. Дрейман, Л. Ф. Кондратенко; под ред. В. В. Сапожникова. – Москва : Транспорт, 1989. – 303 с. – Текст : непосредственный.
8. Модульные коды с суммированием в системах функционального контроля. I. Свойства обнаружения ошибок кодами в информационных векторах / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, М. Р. Черепанова. – Текст : непосредственный // Электронное моделирование. – 2016. – Т. 38. – № 2. – С. 27–48. – EDN VZILYF.
9. Ускорение вычисления CRC в устройствах на базе программируемых логических интегральных схем / А. А. Блюдов, Е. А. Волков, Ю. В. Иванов, Г. Ю. Пронин. – Текст : непосредственный // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2025. – Т. 22. – № 1. – С. 179–185. – DOI 10.20295/1815-588X-2025-1-179-185. – EDN ONVSGS.
10. Блюдов, А. А. Распределение мощности кодов с наименьшей избыточностью алфавитов в зависимости от количества бит и кодового расстояния / А. А. Блюдов, Д. В. Пивоваров, Г. Ю. Пронин. – Текст : непосредственный // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2023. – Т. 20. – № 2. – С. 365–375. – DOI 10.20295/1815-588X-2023-2-365-375. – EDN HTDIMR.

References

1. Boltayev, S., Muhiddinov, O., Vasiyev, X., & Qodirov, I. (2025). Poyezd dispetcheri uchastkasida marshrutlarni avtomatik boshqarishni modellashtirish. *Journal of Transport*, 2(2), 117-121. (In Uzbek).
2. Хидиров, Э. И., & Болтаев, С. Т. (2022). “Ўзбекистон темир йўллари” акциядорлик жамиятининг сигналлаштириш ва алоқа хўжалиги қурилмаларидаги носозликлар таҳлили. *Oriental renaissance: Innovative, educational, natural and social sciences*, 2(5), 174-181. (In Uzbek).
3. Baltayev, J. S., & Boltayev, S. (2022). Model and Methods for Detecting Undetected Errors Using a Signature Analyzer. In *International School on Neural Networks, Initiated by IIASS and EMFCSC* (pp. 1101-1110). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-11058-0_112.
4. Shifrin B.M., Eliseev I.V., Pendrikov E.S. *Sintez diskretnykh avtomatov* [Synthesis of discrete automata]. St. Petersburg, Saint Petersburg State Forest Technical University named after S. M. Kirov Publ., 2018, 36 p. EDN BOQFMR. (In Russian).
5. Khatlamadzhiian A.E. *Metody avtomatizatsii protsessov logicheskogo kontrolya v transportnykh sistemakh dispetcherskogo upravleniya na osnove gibridnykh modelei i geneticheskikh algoritmov* (Methods of automation of logical control processes in transport dispatch control systems based on hybrid models and genetic algorithms). Doctor's thesis abstract, Rostov-on-Don, 2005, 18 p. EDN NIHDCL. (In Russian).
6. Shabelnikov A.N., Kureychik V.V., Kureychik V.M., Kovalev S.M. Formation and optimization of knowledge bases for dynamic-type intelligent systems based on genetic algorithms. *Izvestiia TRTU – Proceedings of Taganrog State Radio Engineering University*, 2003, no. 2(31), pp. 79-87. EDN KWDIAL. (In Russian).
7. Pereborov A.S., Dreyman O.K., Kondratenko L.F. Ed. by V.V. Sapozhnikov. *Dispetcherskaia tsentralizatsiia* [Dispatcher centralization]. Moscow, Transport Publ., 1989, 303 p. (In Russian).
8. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.V., Efanov D.V., Cherepanova M.R. Modulo codes with summation in concurrent error detection systems. I. Ability to detect errors by modulo codes in data vectors. *Élektronnoe modelirovanie – Engineering simulation*, 2016, vol. 38, no. 2, pp. 27-48. EDN VZILYF. (In Russian).
9. Blyudov A., Volkov E., Ivanov Yu., Pronin G. Acceleration of software CRC calculation based on programmable logic integrated circuits. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia – Proceedings of Petersburg transport university*, 2025, vol. 22, no. 1, pp. 179-185. <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2025-1-179-185>. EDN ONVSGS. (In Russian).
10. Blyudov A., Pivovarov D., Pronin G. Power distribution of codes with the lowest alphabet redundancy depending on the number of bits and code distance. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia – Proceedings of Petersburg transport university*, 2023, vol. 20, no. 2, pp. 365-375. <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2023-2-365-375>. EDN HTDIMR. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Болтаев Суннатилло Туймуродович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

Темирйўлчилар ул., д. 1, г. Ташкент, 100060, Республика Узбекистан.

Кандидат технических наук, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика», ТГТрУ.

Тел.: +998 (90) 957-10-88.

E-mail: sunnat_3112@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Boltaev Sunnatillo Tuymurodovich

Tashkent State of Transport Universitet (TSTU).

1st House of Temiryulchilar street of Tashkent City, 100060, Republic of Uzbekistan.

Ph.D. in Engineering, professor of the department “Automation and Remote Control”, TSTU.

Phone: +998 (90) 957-10-88.

E-mail: sunnat_3112@mail.ru

Мухиддинов Обиджон Омонжон-угли

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

Темирийўлчилар ул., д. 1, г. Ташкент, 100060, Республика Узбекистан.

Докторант кафедры «Автоматика и телемеханика», ТГТрУ.

Тел.: +998 (91) 922-93-93.

E-mail: muhiddinovobidjon@gmail.com

Muhiddinov Obidjon Omonjon-o'g'li

Tashkent State of Transport Universitet (TSTU).

1st House of Temiryulchilar street of Tashkent City, 100060, Republic of Uzbekistan.

Doctoral student of the department "Automation and Remote Control", TSTU.

Phone: +998 (90) 922-93-93.

E-mail: muhiddinovobidjon@gmail.com

Жоникулов Эгамберди Шавкат-угли

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

Темирийўлчилар ул., д. 1, г. Ташкент, 100060, Республика Узбекистан.

Докторант кафедры «Автоматика и телемеханика», ТГТрУ.

Тел.: +998 (91) 102-27-97.

E-mail: egamberdijoniqulov@gmail.com

Joniqulov Egamberdi Shavkat-o'g'li

Tashkent State of Transport Universitet (TSTU).

1st House of Temiryulchilar street of Tashkent City, 100060, Republic of Uzbekistan.

Doctoral student of the department "Automation and Remote Control", TSTU.

Phone: +998 (91) 102-27-97.

E-mail: egamberdijoniqulov@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Болтаев, С. Т. Формирование сигналов на линейных пунктах диспетчерской централизации / С. Т. Болтаев, О. О. Мухиддинов, Э. Ш. Жоникулов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 4 (64). – С. 48 – 62.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Boltaev S.T., Muhiddinov O.O., Joniqulov E.Sh. Formation of signals at linear dispatch centralization points. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 4(64), pp. 48-62. (In Russian).

УДК 656.073

З. Г. Адилова, Г. М. Юлдашова, Х. М. Якумбаев, Д. Ш. Бобоев, С. И. Асенова

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ), г. Ташкент, Республика Узбекистан

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ ПАРАМЕТРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ТЕРМИНАЛОВ ДЛЯ КОНТРЕЙЛЕРНЫХ ПЕРЕВОЗОК В УЗБЕКИСТАНЕ

Аннотация. В данной статье представлена комплексная методологическая основа определения оптимальных параметров железнодорожных терминалов, предназначенных для контейнерных перевозок в Республике Узбекистан. Основное внимание уделено созданию научно обоснованного подхода, который сочетает аналитическое моделирование, статистическую оценку и пространственный анализ. Применение такого интегрированного метода позволяет реализовать системный, последовательный и основанный на эмпирических данных процесс выбора мест размещения терминалов, определения их технических, эксплуатационных и пропускных характеристик, а также учета экономических, инфраструктурных и логистических особенностей регионов. В ходе исследования была разработана детализированная рейтинговая система, направленная на комплексную оценку эффективности функционирования 18 логистических центров, действующих на территории страны. При проведении анализа учитывались показатели пропускной способности, техническое состояние инфраструктуры, уровень мультимодальной связанности, транспортная доступность, географическое положение, потенциал дальнейшего развития и устойчивость к изменениям рыночной конъюнктуры. Полученные результаты показали, что, несмотря на высокие эксплуатационные показатели центров, расположенных в Бухарской и Самаркандской областях, наиболее перспективным регионом для строительства нового контейнерного терминала является Навоийская область. Выбор данного региона объясняется сбалансированным развитием транспортной сети, наличием свободных земельных участков, благоприятными природно-географическими условиями и стратегически выгодным центральным положением, обеспечивающим эффективное соединение внутренних и международных грузовых коридоров. Результаты проведенного исследования имеют высокую научную и практическую значимость для специалистов в области транспортного планирования, логистики и государственной политики, так как разработанная методика способствует устойчивому развитию интермодальной инфраструктуры Узбекистана и всего Центрально-Азиатского региона.

Ключевые слова: контейнерный терминал, контейнерные перевозки, контейнер, интермодальные перевозки, логистическая инфраструктура.

Ziyoda G. Adilova, Guzal M. Yuldashova, Khamid M. Yakupbaev,
Diyor Sh. Boboev, Sitorabonu I. Asenova

Tashkent State Transport University (TSTU), Tashkent, the Republic of Uzbekistan

METHODOLOGICAL BASES FOR THE DEVELOPMENT OF PARAMETERS OF RAILWAY TERMINALS FOR PIGGYBACK TRANSPORTATION IN UZBEKISTAN

Abstract. *This article presents a comprehensive methodological framework developed to determine the optimal parameters of railway terminals designed for piggyback transportation in the Republic of Uzbekistan. The main focus is on creating a scientifically grounded approach that combines analytical modeling, statistical evaluation, and spatial analysis. The application of this integrated method enables a systematic, consistent, and data-driven process for selecting terminal locations, defining their technical, operational, and throughput characteristics, and accounting for the economic, infrastructural, and logistical specificities of each region. Within the framework of the study, a detailed rating system was developed to assess the performance and operational efficiency of 18 logistics centers currently functioning across the country. The evaluation criteria included throughput capacity, infrastructure condition, level of multimodal connectivity, transport accessibility, geographical position, potential for future development, and resilience to market fluctuations. The findings revealed that, despite the relatively high operational indicators of the logistics centers located in the Bukhara and Samarkand regions, the Navoi region was identified as the most favorable location for the construction of a new piggyback terminal. This conclusion is explained by the region's balanced transport network, availability of undeveloped land resources, favorable natural and geographical conditions, and strategically advantageous central position that connects major domestic and international freight corridors. The results of the conducted research have high scientific and practical significance for experts in transport planning, logistics, and public policy, providing a methodological foundation for the sustainable development of intermodal infrastructure in Uzbekistan and the broader Central Asian region.*

Keywords: *piggyback terminal, piggyback transportation, container, intermodal transport, logistics infrastructure.*

Для государств, не имеющих выхода к морю, стремящихся повысить свою экономическую конкурентоспособность на мировых рынках, ключевое значение имеет развитие эффективных мультимодальных транспортных систем. Узбекистан, расположенный на перекрестке транспортных коридоров Центральной Азии, сталкивается с особыми логистическими вызовами, требующими внедрения инновационных решений в сфере грузовых перевозок [2]. Страна располагает возможностью оптимизировать свою транспортную систему за счет применения контрейлерных перевозок – специфической интермодальной технологии, при которой загруженные автомобильные прицепы транспортируются на железнодорожных платформах, учитывая наличие более 6500 км железнодорожных линий, соединяющих основные экономические центры государства [3]. Современные статистические данные по контейнерным перевозкам, демонстрирующие устойчивый рост, подчеркивают актуальность развития контрейлерных перевозок в Узбекистане.

Анализ данных АО «Узбекистон темир йуллари» за период с 2021 по 2024 г. показывает общий рост объемов контейнерных перевозок на 105,98 %, при этом особенно значительным является увеличение экспортных контейнерных отправок – на 243,29 %, что подтверждает возрастающую потребность в эффективных интермодальных решениях. Улучшение баланса направленных потоков, выражающееся в снижении соотношения импорта к экспорту с 3,13 в 2021 г. до 1,48 в 2024 г., также способствует формированию благоприятных условий для организации двунаправленных контрейлерных сервисов с минимизацией порожних рейсов.

Среди ключевых преимуществ контрейлерных перевозок для логистической системы Узбекистана можно выделить снижение затрат на автомобильные дальнемагистральные перевозки, уменьшение негативного воздействия на окружающую среду, повышение уровня безопасности за счет сокращения интенсивности движения грузовых автотранспортных средств по автомобильным магистралям, а также возможность решения проблемных «узких мест» при трансграничных перевозках (Bontekoning и др., 2004) [5]. Эффективность применения данного вида перевозок, таким образом, напрямую зависит от наличия грамотно

спроектированной терминальной инфраструктуры с параметрами, адаптированными к специфическим эксплуатационным, географическим и экономическим условиям Узбекистана.

В настоящее время логистическая система Узбекистана включает в себя 18 логистических центров, расположенных в 13 регионах, с совокупной вместимостью 14 700 TEU и годовым грузооборотом порядка 15 032 тыс. т. Указанные центры существенно различаются по мощности, размерам и эксплуатационным параметрам, что одновременно формирует как возможности, так и вызовы для развития контейнерных терминалов. С географической точки зрения наблюдается концентрация мощностей в восточной и центральной частях страны при относительной недос-таточной развитости западных регионов, что свидетельствует о необходимости стратегического расширения транспортно-логистической сети [1].

В исследовании установлены базовые показатели на основе эксплуатационных параметров действующих терминалов, включая время цикла контейнерных операций – 12 мин, терминальную мощность – 3 500 TEU и среднее время обработки поезда – 193 мин. На основе этих данных могут быть разработаны специализированные параметры, ориентированные на контейнерные перевозки. Работа также выявляет ключевые направления для совершенствования, в частности, повышение эффективности использования пропускной способности путей (в настоящее время – 51,06 %) и уровня загрузки перегрузочного оборудования (76,51 %) [6].

Ключевыми элементами многофакторной методики оценки мест размещения терминалов, разработанной в данном исследовании, являются объем грузопотоков (вес – 25 %), транспортная связанность (20 %), состояние действующей инфраструктуры (15 %), близость к таможенным объектам (15 %), наличие свободных территорий (15 %) и вопросы регионального баланса (10 %). Такой комплексный подход обеспечивает возможность принятия решений о стратегических инвестициях в инфраструктуру на основе объективных данных [8].

Вклад данного исследования заключается в разработке методологического каркаса, который восполняет существующий разрыв между теоретическими моделями интермодальных перевозок и практическими потребностями, характерными для условий Узбекистана [9]. Предложенные критерии предоставляют железнодорожным операторам, транспортным планировщикам и регулирующим органам инструментарий для формирования эффективной системы контейнерных перевозок, способствующей повышению региональной связанности страны и улучшению показателей ее логистической деятельности.

Обзор сети логистических центров. Для обеспечения растущих потребностей в грузовых перевозках в Узбекистане создана сеть из 18 логистических центров, стратегически размещенных на территории страны. Эти центры рассматриваются в качестве потенциальных площадок для развития контейнерных сервисов и одновременно выступают опорным звеном национальной системы интермодальных перевозок [4].

Общая площадь указанных логистических центров составляет 1556,13 га, а их совокупная вместимость достигает 14700 TEU (эквивалент двадцатифутового контейнера). Совокупный годовой грузооборот данных центров составляет порядка 15 032 тыс. т, что наглядно демонстрирует масштаб логистической деятельности в Узбекистане [7].

Географическое распределение и региональная вместимость.

Логистические центры распределены по 13 регионам Узбекистана, характеризуясь различной степенью концентрации и уровнем пропускной способности.

Для региона r , в котором функционирует несколько логистических центров, совокупная вместимость определяется следующим образом:

$$TC_r = \sum_{i=0}^{n_r} C_i, \quad (1)$$

где TC_r – совокупная вместимость региона r ;

C_i – вместимость i -го логистического центра.

В Навоийской области три логистических центра с совокупной вместимостью 1 550 TEU и общей площадью 40,41 га, что подчеркивает ее значение в качестве ключевого логистического узла.

Ферганская область располагает двумя логистическими центрами с совокупной вместимостью 1050 TEU и общей площадью 8,37 га.

В Кашкадарьинской области два логистических центра с совокупной вместимостью 450 TEU и общей площадью 5,54 га.

Ташкентская область располагает двумя логистическими центрами с совокупной вместимостью 1000 TEU и общей площадью 3,89 га, обслуживающими столичный регион.

Оставшиеся регионы – Андижанская, Наманганская, Сырдарьинская, Джизакская, Самаркандская, Сурхандарьинская, Бухарская, Хорезмская области и Республика Каракалпакстан – каждый располагают одним логистическим центром.

Данное географическое распределение выявляет как сильные стороны, так и недостатки в национальной логистической сети:

1) восточные регионы (Ферганская долина, включая Ферганскую, Андижанскую и Наманганскую области) обладают развитой логистической инфраструктурой, представленной четырьмя центрами;

2) центральные регионы вокруг Ташкента и Навои формируют еще один значимый кластер;

3) западные и южные регионы обладают сравнительно меньшим количеством объектов, что потенциально указывает на направления для будущего развития.

Анализ основных логистических центров.

Ведущие центры по емкости (TEU).

Диаграмма, приведенная на рисунке 1, отражает контейнерообработывающую способность ведущих логистических центров, при этом наибольшей емкостью обладает ЛЦ «Улугбек» (Самарканд) – 2100 TEU, за ним следуют ЛЦ «Андижан» (1750 TEU) и ЛЦ «Бухара» (1700 TEU).

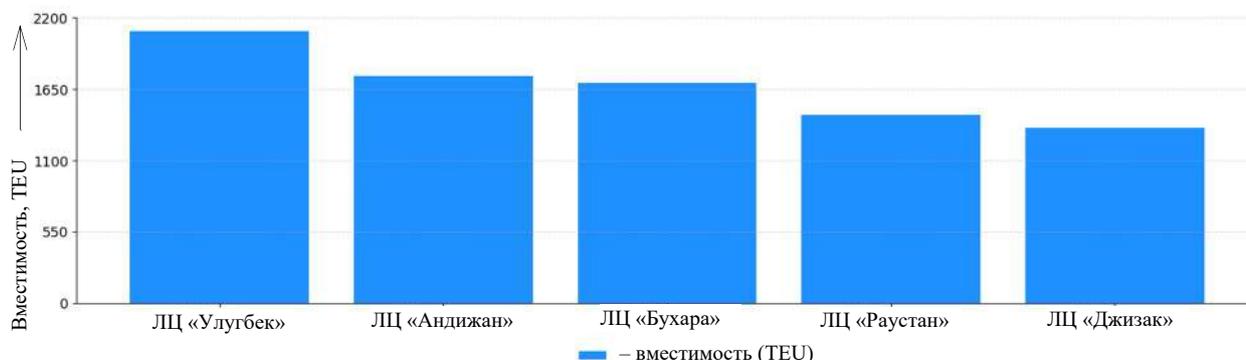


Рисунок 1 – Пять крупнейших логистических центров по емкости (TEU)

Ведущие логистические центры по контейнерообработывающей способности распределяются следующим образом: ЛЦ «Улугбек» (Самарканд) – 2100 TEU; ЛЦ «Андижан» – 1750 TEU; ЛЦ «Бухара» – 1700 TEU; ЛЦ «Раустан» (Наманган) – 1450 TEU; ЛЦ «Джизак» – 150 TEU.

Эти пять центров обеспечивают 56,8 % совокупной емкости контейнерообработки в Узбекистане, что указывает на концентрацию соответствующих мощностей в ключевых стратегических узлах.

Ведущие центры по площади.

Имеется существенный разрыв в размерах между логистическими центрами: наибольшая площадь у ЛЦ «Андижан» (1450 га), за которым следует ЛЦ «Кармана» (34,7 га), тогда как остальные центры имеют значительно меньшие площади.

Логистические центры с наибольшей площадью распределяются следующим образом: ЛЦ «Андижан» – 1450 га; ЛЦ «Кармана» (Навои) – 34,7 га; ЛЦ «Джизак» – 13,17 га; ЛЦ «Раустан» (Наманган) – 8,25 га; ЛЦ «Улугбек» (Самарканд) – 8,19 га.

Площадь ЛЦ «Андижан» указывает на потенциал для значительного расширения операций, включая развитие объектов для контрейлерных перевозок.

Ведущие центры по грузообороту.

На рисунке 2 показано, что наибольший грузооборот обеспечивает ЛЦ «Бухара» – 2150 тыс. т/год, за ним следуют ЛЦ «Улугбек» (1650 тыс. т/год) и другие центры.

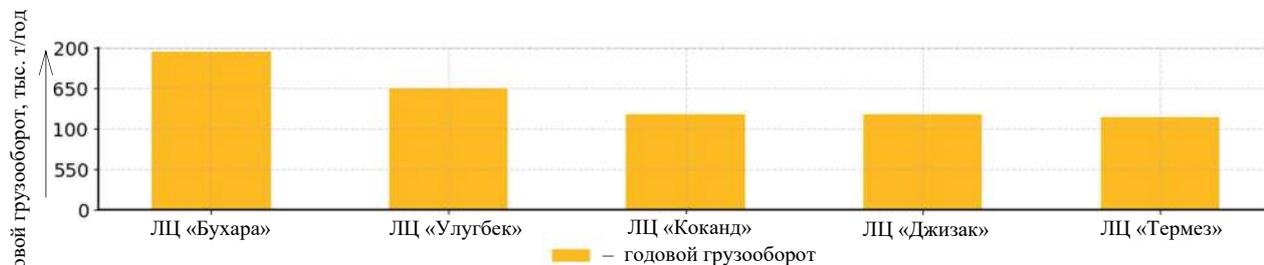


Рисунок 2 – Пять крупнейших логистических центров по годовому грузообороту (тыс. т/год)

Центры, обеспечивающие наибольший годовой грузооборот, распределяются следующим образом: ЛЦ «Бухара» – 2150 тыс. т/год; ЛЦ «Улугбек» (Самарканд) – 1650 тыс. т/год; ЛЦ «Коканд» (Фергана) и ЛЦ «Джизак» – по 1290 тыс. т/год; ЛЦ «Термез» (Сурхандарьинская область) – 1260 тыс. т/год.

Эти центры, которые, учитывая стабильные грузопотоки, являются основными претендентами для развития контрейлерных перевозок (piggyback), представляют собой наиболее загруженные узлы обработки грузов в стране.

Анализ инфраструктурных объектов.

Логистические центры значительно различаются по доступной инфраструктуре:

- 38,9 % центров (семь объектов) имеют открытые таможенные склады;
- 33,3 % центров (шесть объектов) имеют закрытые таможенные склады;
- 22,2 % центров (четыре объекта) имеют открытые склады;
- 38,9 % центров (семь объектов) имеют закрытые склады.

Такое распределение объектов указывает на различный уровень сервисных возможностей в сети. Для развития контрейлерных перевозок наиболее подходящими для первоначального внедрения будут центры, имеющие как таможенные объекты, так и достаточные складские мощности.

Анализ данных АО «Узбекистон Темир Йуллари» за период 2021 – 2024 гг. показывает значительный рост контейнерных перевозок по всем категориям движения.

Расчет темпа роста любой категории перевозок за период с года a по год b определяется следующим образом:

$$G_{a,b} = \frac{V_b - V_a}{V_a} \times 100 \%, \quad (2)$$

где $G_{a,b}$ – темп роста за период с года a по год b ;

V_b – значение в году b ;

V_a – значение в году a .

Используя формулу (2), можно количественно определить темпы роста:

общий контейнерный трафик увеличился на 105,98 %: с 165748 контейнеров в 2021 г. до 341401 контейнера в 2024 г.;

импортный контейнерный трафик вырос на 62,67 %: с 120342 контейнеров до 195761 контейнера;

экспортный контейнерный трафик показал самый значительный рост – 243,29 %: с 38487 контейнеров до 132121 контейнера.

Транзитный контейнерный трафик увеличился на 95,39 %: с 6919 контейнеров до 13519 контейнеров.

Этот устойчивый рост по всем категориям указывает на быстро развивающийся рынок интермодальных перевозок в Узбекистане, создавая прочную основу для потенциального внедрения контейнерных перевозок.

Динамика импорта/экспорта/транзита и дисбалансы.

Анализ структуры контейнерного трафика показывает значительные изменения в распределении между импортным, экспортным и транзитным трафиками (таблица 1).

Таблица 1 – Динамика импорта, экспорта и транзита

Год	Импорт (%)	Экспорт (%)	Транзит (%)	Соотношение импорта и экспорта
2021	72,61	23,22	4,17	3,13
2022	69,12	25,32	5,56	2,73
2023	55,62	39,85	4,53	1,40
2024	57,34	38,70	3,96	1,48

Доля трафика для каждой категории рассчитывается по формуле:

$$S_i = \frac{C_i}{C_T} \times 100 \%, \quad (3)$$

где S_i – доля трафика типа i ;

C_i – количество контейнеров для трафика типа i ;

C_T – общее количество контейнеров.

На основе данного анализа можно сделать такие выводы.

1. Снижение доминирования импорта: доля импортных контейнеров значительно сократилась – с 72,61 % в 2021 г. до 57,34 % в 2024 г.
2. Рост доли экспорта: доля экспортных контейнеров увеличилась с 23,22 до 38,70 %.
3. Улучшение торгового баланса: соотношение импорта и экспорта существенно улучшилось – с 3,13 в 2021 г. до 1,48 в 2024 г., что указывает на более сбалансированные торговые потоки.
4. Относительно стабильный транзитный трафик: транзитный трафик остался незначительной, но стабильной частью общего контейнерного потока.

Эта тенденция к более сбалансированным потокам импорта и экспорта благоприятна для потенциального внедрения контейнерных перевозок, поскольку она предполагает сокращение пустых обратных рейсов и более высокую потенциальную загрузку в обоих направлениях.

Анализ экспресс-контейнерных поездов.

Анализ данных экспресс-контейнерных поездов дает представление о текущих операционных схемах.

Распределение по размерам контейнеров.

Из 7566 контейнеров, перевезенных экспресс-поездами, 2193 контейнера (28,98 %) составили 20-футовые контейнеры и 5373 контейнера (71,02 %) составили 40-футовые контейнеры.

Преобладание 40-футовых контейнеров полностью соответствует требованиям системы «riggyback», поскольку стандартные размеры автоприцепов совместимы с аналогичными платформами для погрузки.

Поток контейнеров по направлениям.

Анализ потоков контейнеров по направлениям (рисунок 3) показывает следующее распределение:

- 1) Коканд: 2 735 контейнеров (36,15 % от общего числа), 68467 т;
- 2) Улугбек: 2 068 контейнеров (27,33 %), 48727 т;
- 3) Ахтачи: 814 контейнеров (10,76 %), 16204 т;

- 4) Маргилан: 794 контейнера (10,49 %), 18574 т;
- 5) Раустан: 702 контейнера (9,28 %), 15419 т;
- 6) Бухара: 407 контейнеров (5,38 %), 9516 т;
- 7) Джизак: 46 контейнеров (0,61 %), 365 т.

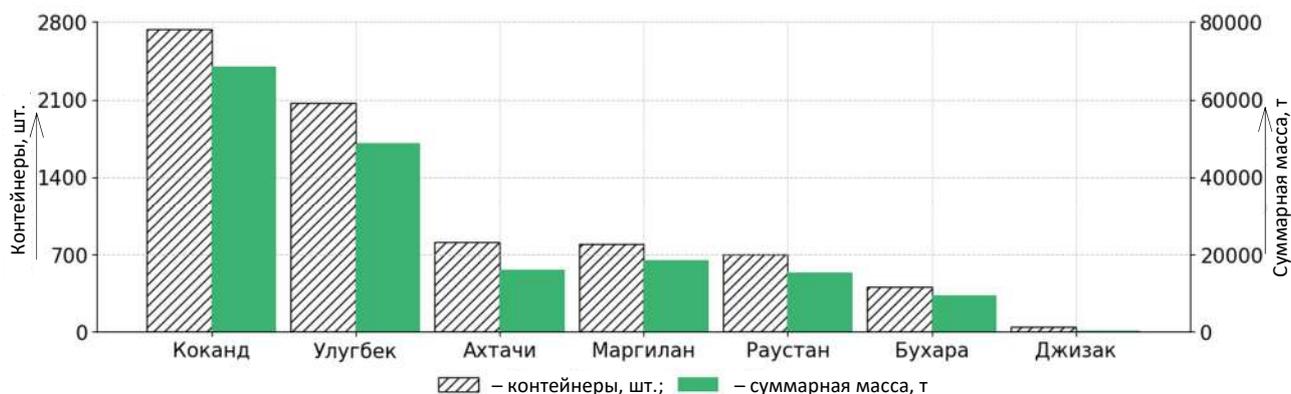


Рисунок 3 – Анализ потоков контейнеров по направлениям

Данный анализ подчеркивает ведущую роль направлений в регионе Ферганской долины (Коканд, Маргилан) и Самаркандской области (Улугбек), которые вместе обеспечивают почти 74 % контейнерных потоков на экспресс-поездах.

Использование пропускной способности поездов.

Коэффициент использования пропускной способности поезда рассчитывается следующим образом:

$$U_t = \frac{C_a}{C_s} \times 100 \%, \quad (4)$$

где U_t – коэффициент использования пропускной способности поезда;

C_a – среднее количество контейнеров на поезд;

C_s – стандартная пропускная способность поезда по времени.

Исходя из расчетной стандартной пропускной способности поезда в 50 контейнеров текущие экспресс-контейнерные поезда работают примерно на 75,28 % своей мощности: общее количество перевезенных контейнеров – 7566; общее количество отправленных поездов – 201; среднее количество контейнеров на поезд – 37,64; средний вес груза на поезд – 881,95 т.

Данный коэффициент использования пропускной способности указывает на наличие потенциала для дополнительных грузоперевозок, включая систему «piggyback», без необходимости значительного увеличения числа поездов.

Коридоры с интенсивным грузопотоком для потенциального использования контрейлерных перевозок.

Анализ выявляет следующие коридоры с высоким грузопотоком в качестве основных кандидатов для контрейлерных перевозок:

- 1) Чукурсой – Коканд: 1389 контейнеров, 34932 т;
- 2) Ташкент – Коканд: 1299 контейнеров, 32988 т;
- 3) Сергели – Улугбек: 1068 контейнеров, 24675 т;
- 4) Ташкент – Маргилан: 533 контейнера, 12711 т;
- 5) Чукурсой – Улугбек: 495 контейнеров, 10533 т.

Эти коридоры, особенно соединяющие Ташкент с Ферганской долиной (Коканд, Маргилан), демонстрируют наибольший объем грузопотока и являются логичными отправными точками для внедрения контрейлерных перевозок.

Особенно вдоль обозначенных коридоров с высоким грузопотоком, соединяющих основные экономические центры, исследование данных подтверждает значительный потенциал роста контрейлерных перевозок в Узбекистане. Возможность внедрения этого вида

перевозок в железнодорожную систему Узбекистана подкрепляется существенным увеличением контейнерного трафика, более сбалансированными потоками по направлениям и доступной пропускной способностью поездов.

Разработка критериев оценки эффективности контейнерных терминалов.

Базовые показатели операционной деятельности.

На основе анализа операционных параметров по данным участка Келес – Чукурсой установлены следующие базовые показатели операционной деятельности, которые могут служить основой для оценки эффективности контейнерного терминала:

Основные параметры операционной деятельности:

- время операционного цикла с контейнером – 12 минут на контейнер;
- использование погрузочного оборудования – 92,31 % (коэффициент использования за смену);

- эффективность погрузки вагонов – 78,84 % (фактически vs. план);
- эффективность разгрузки вагонов – 74,17 % (фактически vs. план);
- эффективность обработки тоннажа – 80,86 % (фактически vs. план).

Параметры пропускной способности терминала:

- контейнерная вместимость терминала – 3500 TEU;
- количество контейнерных поездов в сутки – пять поездов;
- пропускная способность одного пути – 150 TEU;
- общая пропускная способность путей – 1500 TEU (для 10 погрузочных путей).

Временные параметры:

- общее время обработки поезда – 193 мин;
- среднее время обработки на один TEU – 1,29 мин.

Параметры, связанные с издержками:

- стоимость железнодорожной перевозки – 77143 (денежных единиц) за вагон;
- стоимость хранения – 114,9 (денежных единиц) за тонну в сутки.

Комплексные показатели эффективности.

На основе базовых операционных показателей был разработан комплекс сводных показателей эффективности, специально адаптированных для контейнерных терминалов.

Показатели операционной эффективности представлены на рисунке 4.

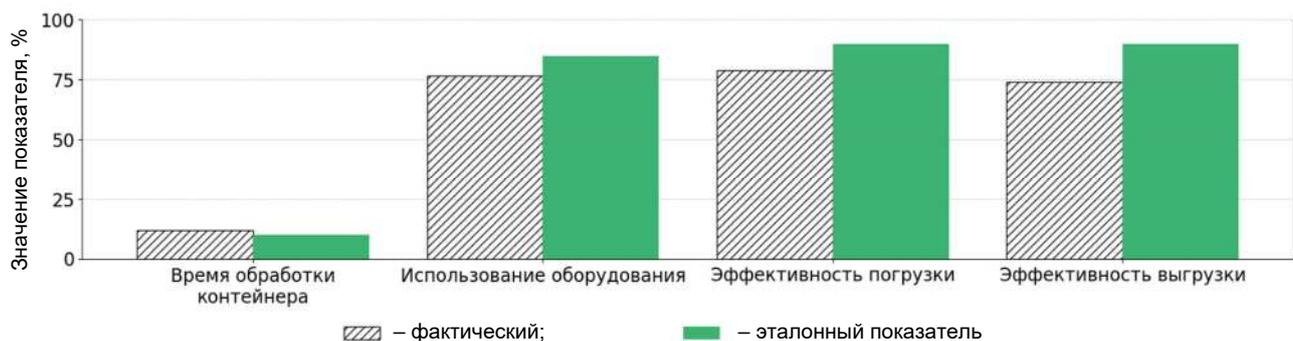


Рисунок 4 – Показатели операционной эффективности по сравнению с эталонами

Эффективность использования оборудования рассчитывается по формуле:

$$E_{\text{испол}} = \frac{P_{\text{погр}} - P_{\text{выгр}}}{2} \times 100 \%, \quad (5)$$

где $E_{\text{испол}}$ – эффективность использования оборудования;

$P_{\text{погр}}$ – эффективность погрузки (фактически/план);

$P_{\text{выгр}}$ – эффективность выгрузки (фактически/план).

$$E_{\text{испол}} = \frac{78,84 \% - 74,17 \%}{2} = 76,51 \%$$

Эффективность времени обработки контейнера/контрейлера: измеряется время, необходимое для обработки одного контейнера или контрейлера. Текущая база – 12 мин на контейнер.

Эффективность обработки поезда: оценивается общее время, необходимое для обработки поезда. Текущая база – 193 мин на поезд.

Эффективность использования оборудования: оценивается, насколько эффективно используется погрузочно-разгрузочное оборудование. Текущая база – 76,51 %.

Многофакторная система оценки эффективности терминала.

На основе комплексных показателей эффективности разработана всесторонняя многофакторная система оценки эффективности терминала, специально предназначенная для контрейлерных терминалов (рисунок 5).

Компоненты системы рейтинга и их весовые коэффициенты:

$$E_{\text{общий}} = (E_{\text{оэ}} \times W_{\text{оэ}}) + (E_{\text{ипс}} \times W_{\text{ипс}}) + (E_{\text{в}} \times W_{\text{в}}) + (E_{\text{ээ}} \times W_{\text{ээ}}), \quad (6)$$

где $E_{\text{общий}}$ – общий показатель эффективности;

$E_{\text{оэ}}, E_{\text{ипс}}, E_{\text{в}}, E_{\text{ээ}}$ – показатели по отдельным компонентам;

$W_{\text{оэ}}, W_{\text{ипс}}, W_{\text{в}}, W_{\text{ээ}}$ – соответствующие весовые коэффициенты.

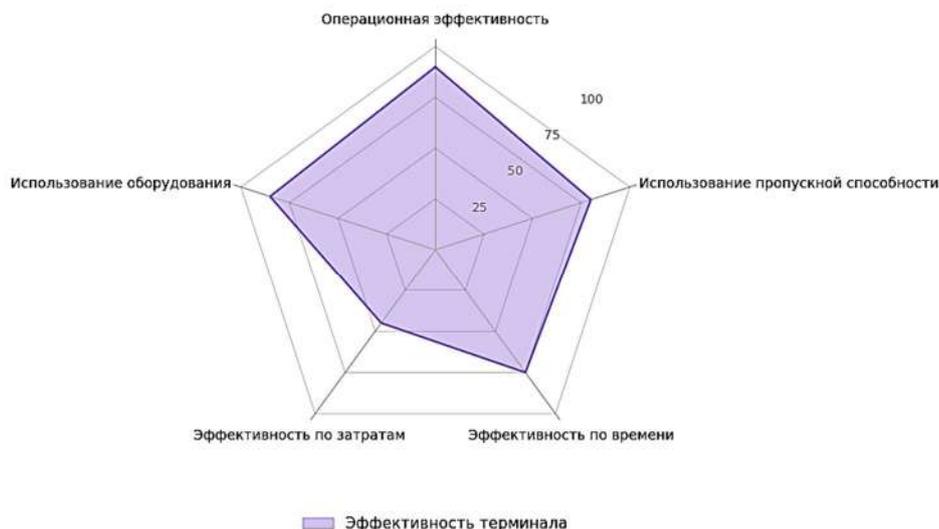


Рисунок 5 – Рейтинг эффективности терминала

1. Операционная эффективность (35 %).

Время обработки контейнера/контрейлера: эталон < 10 мин/единица.

Коэффициент использования оборудования: эталон > 85 %.

Эффективность погрузки/разгрузки: эталон > 90 %.

2. Использование пропускной способности (25 %).

Использование пропускной способности путей: эталон > 80 %.

Вместимость складских помещений терминала: эталон достаточен для пикового спроса.

Использование мощности оборудования: эталон > 90 %.

3. Временная эффективность (20 %).

Среднее время обработки: эталон, основанный на стандартах.

Время оборота поезда: эталон – минимальное.

Время операционного цикла с контейнером: эталон < 10 мин.

4. Экономическая эффективность (20 %)

Стоимость обработки одного TEU: эталон – конкурентоспособная.

Эффективность затрат на хранение: эталон – конкурентоспособная.

Стоимость перевозки: эталон – минимальная.

Расчет сводного показателя эффективности.

Сводный показатель эффективности рассчитывается с учетом весов для каждой компонентной области: компонент операционной эффективности – 2,30 (вес 30 %); компонент использования мощности – 1,53 (вес 30 %); компонент временной эффективности – 1,73 (вес 20 %); компонент стоимостной эффективности – 1,00 (вес 20 %).

Совокупный показатель эффективности терминала – 6,56 (из 10).

Следующая шкала оценивания предоставляет стандартизированный способ оценки эффективности контрейлерного терминала:

отлично (90 – 100 %): терминал функционирует с почти оптимальной эффективностью;

хорошо (75 – 89 %): терминал работает эффективно, однако имеются незначительные возможности для улучшения;

удовлетворительно (60 – 74 %): терминал функционирует на приемлемом уровне, но обладает существенным потенциалом для совершенствования;

требует улучшения (40 – 59 %): терминал сталкивается с операционными трудностями, требующими вмешательства;

неудовлетворительно (< 40 %): терминал нуждается в серьезной операционной реструктуризации.

Применение к развитию контрейлерного терминала.

Разработанные в данном разделе критерии оценки эффективности формируют надежную основу

для оценки существующих терминалов на предмет их потенциальной конверсии для контрейлерных операций;

проектирования новых контрейлерных терминалов с оптимальными эксплуатационными параметрами;

мониторинга эксплуатационных показателей после внедрения;

выявления направлений для улучшения путем сопоставления фактических показателей с эталонными значениями.

Базовые показатели текущей эксплуатации показывают, что хотя некоторые аспекты (например, использование смен) функционируют хорошо, существуют значительные возможности для улучшения в таких областях, как использование пропускной способности путей (51,06 %) и время обработки контейнера (12 мин).

Для контрейлерных операций критерии оценки должны уделять дополнительное внимание следующим аспектам:

– эффективной обработке грузовых прицепов, что может требовать специализированного оборудования;

– достаточной длине путей для конфигураций контрейлерных вагонов;

– достаточному пространству для маневров грузовиков на территории терминала;

– специализированному оборудованию для погрузки/разгрузки в контрейлерных операциях.

Применяя указанные критерии оценки эффективности на этапах планирования и проектирования, Узбекистан сможет развивать контрейлерные терминалы, максимально повышающие эксплуатационную эффективность и экономическую отдачу.

Методика выбора местоположения для новых контрейлерных терминалов.

Многокритериальная структура оценки местоположения.

На основе анализа данных о распределении логистических центров была разработана комплексная многокритериальная структура для выбора оптимальных местоположений новых контрейлерных терминалов в Узбекистане:

$$S_j = \sum_{i=1}^n w_i \times C_{ij}, \quad (7)$$

где S_j – оценка для местоположения j ;

w_i – вес критерия i ;

C_{ij} – оценка местоположения j по критерию i .

1. Объем грузопотока (25 %): оценивает существующие объемы грузов и потенциальный спрос на контейнерные услуги.

2. Транспортная связанность (20 %): анализирует доступ к автомобильным и железнодорожным сетям и потенциал интеграции.

3. Существующая инфраструктура (15 %): оценивает наличие и качество существующих терминальных объектов.

4. Близость к таможне (15 %): учитывает наличие или расстояние до таможенных объектов.

5. Доступная площадь (15 %): оценивает пространство, доступное для развития и расширения терминала.

6. Региональный баланс (10 %): учитывает стратегическое распределение логистической инфраструктуры по стране.

Такой подход с взвешенными критериями позволяет проводить систематическую и объективную оценку потенциальных местоположений, при этом сохраняя гибкость для корректировки весов в зависимости от изменяющихся стратегических приоритетов.

Региональная оценка для развития контейнерных терминалов.

Анализ данных логистических центров по регионам выявляет четкие закономерности потенциала развития на территории Узбекистана (рисунок 6).

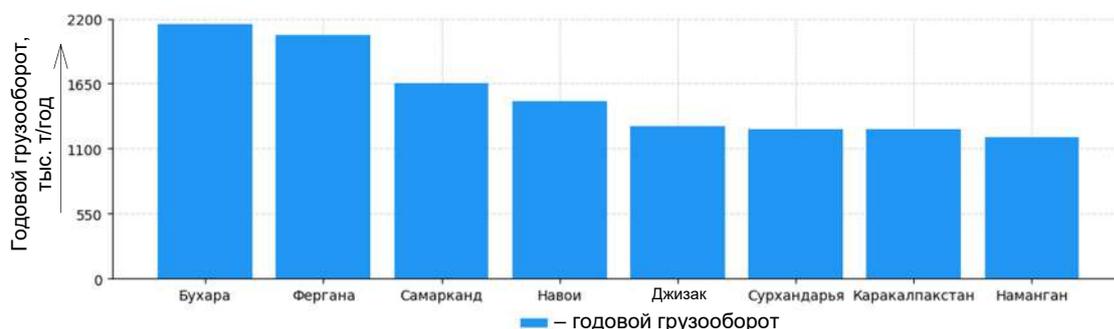


Рисунок 6 – Потенциал регионального развития по грузообороту

Три региона демонстрируют особенно высокий потенциал для развития контейнерных терминалов:

Бухарская область: с одним логистическим центром, обслуживающим 2150 тыс. т/год – наибольший показатель в стране, а также с существующими таможенными объектами;

Ферганская область: совокупный грузооборот двух центров составляет 2064 тыс. т/год с уже установленными таможенными объектами;

Самаркандская область: здесь расположен ЛЦ «Улугбек» с наибольшей контейнерной емкостью (2100 TEU) и значительным грузооборотом (1650 тыс. т/год).

Пять регионов демонстрируют умеренный потенциал для развития контейнерных терминалов:

Навоийская область: примечательна наличием трех логистических центров с общей площадью 40,41 га – крупнейшей в стране;

Джизакская область: один центр с сбалансированной емкостью (1350 TEU) и грузооборотом (1290 тыс. т/год);

Сурхандарьинская область: стратегическое пограничное расположение с грузооборотом 1260 тыс. т/год;

Республика Каракалпакстан: важна для покрытия северо-западного региона с грузооборотом 1260 тыс. т/год;

Наманганская область: часть плотной сети Ферганской долины с грузооборотом 1200 тыс. т/год.

Остальные регионы демонстрируют меньший непосредственный потенциал, но могут выполнять стратегические функции:

Хорезмская область: умеренный грузооборот (1050 тыс. т/год), но отсутствуют таможенные объекты;

Кашкадарьинская область: два центра с совокупным невысоким грузооборотом (840 тыс. т/год);

Ташкентская область: несмотря на близость к столице, относительно низкий грузооборот (570 тыс. т/год);

Сырдарьинская область: ограниченная емкость (200 TEU) и грузооборот (200 тыс. т/год).

Наиболее перспективные местоположения для развития контейнерных терминалов.

На основе многокритериальной оценки следующие локации занимают наиболее высокие позиции для развития контейнерного терминала (рисунок 7):

ЛЦ «Бухара» (оценка: 8,16): превосходит по объему грузопотока (10,0/10) и транспортной связанности (8,0/10), имеет действующие таможенные объекты;

ЛЦ «Улугбек» (Самарканд) (оценка: 7,87): наивысшая оценка инфраструктуры (10,0/10) с высокой транспортной связанностью (8,0/10);

ЛЦ «Раустан» (Наманган) (оценка: 6,69): сбалансированные оценки по критериям с хорошей транспортной связанностью (7,0/10);

ЛЦ «Джизак» (оценка: 6,53): сильные показатели по доступной площади (13,17 га) с существенным грузооборотом;

ЛЦ «Термез» (Сурхандарья) (оценка: 5,70): стратегическое пограничное расположение со значительными объемами грузопотока.

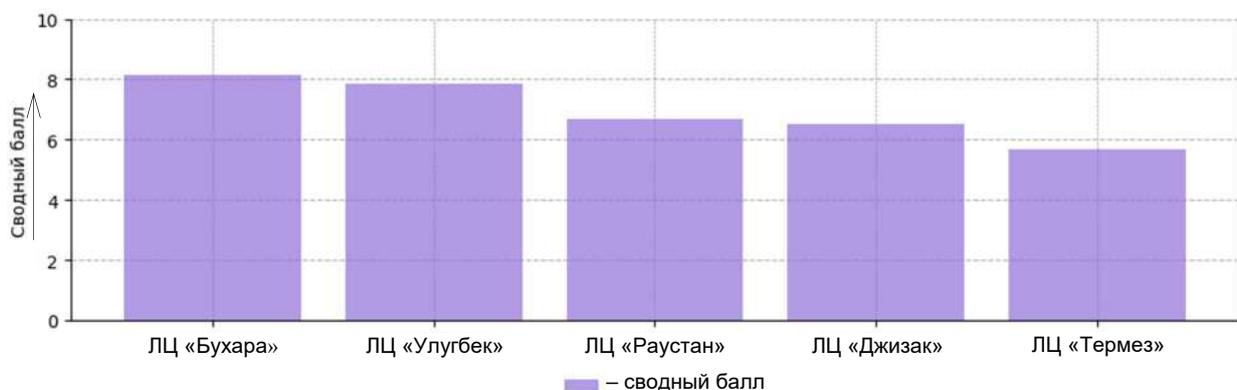


Рисунок 7 – Топ-5 потенциальных местоположений по совокупной оценке

Рекомендуемый регион для развития нового контейнерного терминала.

На основе комплексного анализа данных логистических центров и применения многокритериальной структуры оценки Навоийская область выступает наиболее стратегически выгодным местом для развития нового контейнерного терминала, несмотря на то, что отдельные центры региона не имеют наивысших оценок:

1. Доступная площадь: с общей площадью 40,41 га по трем центрам (в частности, ЛЦ «Кармана» с 34,7 га) Навоийская область предлагает наибольшую территорию для строительства нового терминала.

2. Стратегическое расположение: находясь в центральной части Узбекистана, Навои служит естественным узлом, соединяющим транспортные коридоры восток-запад и север-юг.

3. Распределение существующей инфраструктуры: наличие трех действующих логистических центров (ЛЦ «Кармана», ЛЦ «Тинчлик» и ЛЦ «Янги Зарафшан») создает основу для развития сети.

4. Потенциал роста: регион демонстрирует значительный грузооборот (1 498 тыс. т/год совокупно) при ограниченной текущей емкости, что указывает на потенциал роста.

5. Промышленное развитие: свободная экономическая зона Навои является одной из крупнейших зон промышленного развития в Узбекистане, формируя естественный спрос на интермодальные перевозки.

6. Дополняющее покрытие: развитие контейнерных терминалов в Навои создаст сбалансированную национальную сеть в сочетании с высоко оцененными местоположениями в Бухаре, Самарканде и Ферганской долине.

Эта рекомендация сочетает в себе немедленную эксплуатационную эффективность (с учетом наивысших оценок отдельных центров) с стратегическими соображениями по развитию сети, обеспечивая оптимальное покрытие потребностей грузоперевозок Узбекистана и максимально раскрывая потенциал для будущего роста.

Анализ экономической целесообразности и окупаемости инвестиций в развитие контейнерного терминала.

Требования к инвестициям и финансовые прогнозы.

На основе комплексных технических и эксплуатационных параметров, установленных для контейнерных терминалов в Узбекистане, в этом разделе проводится анализ экономической целесообразности и потенциала окупаемости инвестиций для рекомендуемого проекта в Навоийской области. Рассчитываются капитальные затраты, эксплуатационные расходы, прогнозы доходов и период окупаемости, чтобы предоставить четкую финансовую основу для принятия решений.

Для оптимизации капитальной эффективности и снижения первоначальных инвестиционных рисков рекомендуется подход поэтапного внедрения в три фазы (таблица 2).

Таблица 2 – Инвестиции и эффективность по этапам развития контейнерного терминала

Фаза	Период, года	Основные элементы	Инвестиции, млн долларов	Пропускная способность, прицепов/месяц	Срок окупаемости, год
Фаза 1	1-2	Базовая инфраструктура терминала и необходимое оборудование	23,1	350	4,2
Фаза 2	3-4	Расширение пропускной способности обработки и складских площадей	10,7	550	5,1 (суммарный)
Фаза 3	5-6	Развитие полной пропускной способности и внедрение современных систем	6,5	750+	5,4 (окончательный)

Помимо прямой финансовой отдачи развитие контейнерных терминалов в Навоийской области создаст следующие эффекты:

- сокращение транспортных расходов для грузоотправителей: 7,2 млн долларов в год;
- экологические преимущества: 3,4 млн долларов в год;
- влияние на региональное экономическое развитие: 12,7 млн долларов в год;
- создание рабочих мест: 270 прямых и 850 косвенных рабочих мест.

Такие более широкие экономические выгоды усиливают инвестиционную привлекательность проекта, особенно с учетом стратегической важности развития мультимодальных транспортных возможностей Узбекистана.

Инвестиции в развитие контейнерного терминала в Навоийской области представляются финансово целесообразными, с умеренными сроками окупаемости и значительными стратегическими преимуществами на основе финансового анализа и стратегических соображений.

Предлагаемая поэтапная стратегия внедрения закрепляет за Узбекистаном статус регионального лидера в современной интермодальной транспортной инфраструктуре и позволяет адаптироваться в зависимости от рыночного отклика, тем самым сбалансировав инвестиционные риски и потребности в развитии.

Сосредоточив внимание на адаптации мирового опыта интермодальных перевозок к местной логистической и инфраструктурной специфике, данная работа предлагает комплексную методологическую основу для создания контейнерных транспортных терминалов в Узбекистане. Исследование выявляет ключевые факторы эффективности терминалов и стратегического выбора местоположения через анализ существующей логистической сети, тенденций контейнерных перевозок, показателей эксплуатационной деятельности и возможностей регионального развития. Навоийская область, особенно ЛЦ «Кармана», выделена как наиболее подходящее место для размещения новой контейнерной инфраструктуры, обеспечивая как пространственные, так и стратегические преимущества. Предложенная система оценки эффективности терминалов и многокритериальная структура анализа представляют собой надежные инструменты для планировщиков и законодателей при оценке готовности терминалов и определении инвестиционных приоритетов. Поддерживаемый убедительными прогнозами окупаемости инвестиций, оценкой поэтапного внедрения и значительными более широкими экономическими выгодами, экономический анализ подтверждает финансовую целесообразность предлагаемого проекта. В конечном итоге работа предоставляет контекстно ориентированную, основанную на данных дорожную карту для развития интермодальных грузоперевозок в Узбекистане, способствуя улучшению национальной транспортной связанности и укреплению позиции страны как важного логистического центра Центральной Азии.

Список литературы / References

1. Hisakata, R., Nishida, S. Y., & Johnston, A. (2016). An adaptable metric shapes perceptual space. *Current Biology*, 26(14), 1911-1915. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2016.05.047>.
2. J.F., Sambrook & Russell, D. (2001). *Molecular Cloning: A Laboratory Manual (3-Volume Set)*.
3. Gross, P. Railway track cracks identification. In: 9th International Railway Conference : proceedings. Vol. 2. Mechanical engineering in transport. London : London College of Transport, 2001. ISBN 80-7157- 524-0, p. 262-268.
4. Hogue, C. W. (2001). Structure databases. *Bioinformatics: a practical guide to the analysis of genes and proteins*, 83-109.
5. Transport. Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Transport> (accessed 01.12.2025).
6. Mukhamedova, Z. (2024). Determination methods of factors affecting piggyback transportation. *Civil Engineering and Architecture*, 12(1), 121-132. <https://doi.org/10.13189/cea.2024.120110>.
7. Mukhamedova, Z. G., & Dilbarova, M. R. (2022). The study of modern methods for choosing a rational freight traffic by rail. *Sci J Veh Roads*, 2, 125-130.
8. Ergashev Botir, Samatov Gaffor, Musabekov Zokir, & Uralova Hilola (2022). Methodology for assessing the quality of serving piggyback transportation. *Universum: технические науки*, (4-12 (97)), 63-68.
9. Tsyganov A.V., Osintsev N.A., Rakhmangulov A.N., Zenkin A.A. Sustainability Criteria for a Piggyback System. *World of Transport and Transportation*. 2023;21(5):126-134. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-5-14>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Адилова Зиёда Гафурджановна

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТУ).

Темирийлчилар ул., д. 1, г. Ташкент, 100067, Республика Узбекистан.

Доктор технических наук, доцент кафедры «Транспортно-грузовые системы», ТГТУ.

Тел.: + 998 (90) 329-83-00.

E-mail: mziyoda@mail.ru

Юлдашова Гузал Мэлс кизи

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТУ).

Темирийлчилар ул., д. 1, г. Ташкент, 100067, Республика Узбекистан.

Студентка бакалавриата по направлению «Организация грузоперевозок и транспортная логистика», ТГТУ.

Тел.: +998 (99) 126-18-69.

E-mail: guzaluldashova497@mail.ru

Якупбаев Хамид Маратович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТУ).

Темирийлчилар ул., д. 1, г. Ташкент, 100060, Республика Узбекистан.

Докторант кафедры «Транспортно-грузовые системы», ТГТУ.

Тел.: +998 (90) 006-18-36.

E-mail: xamidjon19962303@gmail.com

Бобоев Диёр Шомуротович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТУ).

Темирийлчилар ул., д. 1, г. Ташкент, 100060, Республика Узбекистан.

Докторант кафедры «Транспортно-грузовые системы», ТГТУ.

Тел.: +998 (90) 414-18-03.

E-mail: diyor1803boboyev@gmail.com

Асенова Ситорабону Икрамжан кизи

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТУ).

Темирийлчилар ул., д. 1, г. Ташкент, 100067, Республика Узбекистан.

Студентка бакалавриата по направлению «Транспортная логистика», ТГТУ.

Тел.: +998 (99) 790-98-34.

E-mail: asenovasitorabonu@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Методологические основы разработки параметров железнодорожных терминалов для контейнерных перевозок в Узбекистане / З. Г. Адилова, Г. М. Юлдашова [и др.]. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 4 (64). – С. 62 – 76.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Adilova Ziyoda Gafurdjanovna

Tashkent State Transport University (TSTU).

1, Temiriyulchilar st., Tashkent, 100067, Republic of Uzbekistan.

Doctor Of Sciences in Engineering, associate professor of the department «Transport and cargo systems», TSTU.

Phone: + 998 (90) 329-83-00.

E-mail: mziyoda@mail.ru

Yuldashova Guzal Mels qizi

Tashkent State Transport University (TSTU).

1, Temiriyulchilar st., Tashkent, 100067, Republic of Uzbekistan.

Undergraduate student, specialization «Organization of cargo transportation and transport logistics», TSTU.

Phone: +998 (91) 192-13-14.

E-mail : guzaluldashova497@mail.ru

Yakupbaev Khamid Maratovich

Tashkent State Transport University (TSTU).

1st House of Temiriyulchilar street of Tashkent City, 100060, Republic of Uzbekistan.

Doctoral student of the department «Transport cargo system», TSTU.

Phone: +998 (90) 006-18-36.

E-mail: xamidjon19962303@gmail.com

Boboev Diyor Shomurotovich

Tashkent State Transport University (TSTU).

1st House of Temiriyulchilar street of Tashkent City, 100060, Republic of Uzbekistan.

Doctoral student of the department «Transport cargo system», TSTU.

Phone: +998 (90) 414-18-03.

E-mail: diyor1803boboyev@gmail.com

Asenova Sitorabonu Ikramjan qizi

Tashkent State Transport University (TSTU).

1, Temiriyulchilar st., Tashkent, 100067, Republic of Uzbekistan.

Undergraduate student, specialization «Transport logistics», TSTU.

Phone: +998 (99) 790-98-34.

E-mail : asenovasitorabonu@gmail.com

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Adilova Z.G., Yuldashova G.M., Boboev D.Sh., Yakupbaev Kh.M., Asenova S.I. Methodological bases for the development of parameters of railway terminals for piggyback transportation in Uzbekistan. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 4 (64), pp. 62-76. (In Russian).

Д. О. Романова, А. Т. Попов, О. А. Сулова

Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ), г. Липецк, Российская Федерация

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТРАНСПОРТНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРИ ПРИМЕНЕНИИ
МИКРОПРОЦЕССОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЯХ**

Аннотация. Предмет исследования: Промышленная транспортная система металлургического предприятия, Процессы управления железнодорожным транспортом и перспективы внедрения микропроцессорной централизации (МПЦ) как элемента модернизации устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. Цель: Исследование целесообразности применения микропроцессорной централизации на промышленных станциях металлургического комбината. Изучение необходимости в замене системы блочной маршрутно-релейной централизации управления движением поездов на станции на современные системы контроля устройств железнодорожной автоматики и телемеханики, поиск и определение внетранспортного эффекта от проведения данных мероприятий. Методы: Натурные наблюдения и обследование фактического состояния систем железнодорожной автоматики и телемеханики на 19 железнодорожных станциях комбината. Статистические наблюдения, объективные наблюдения, аналитический метод, дедуктивный метод, сравнительный анализ статистических данных (объемы перевозок, интенсивность маневровой работы, количество отказов). Сопоставление технических характеристик. Результаты: Оценка экономической эффективности замены традиционных схем железнодорожной автоматики на инновационные компьютерные системы, получение побочных положительных результатов в организации работы промышленного транспорта. Выявлено существенное снижение эксплуатационных расходов, подтверждено снижение отказов на станциях с МПЦ (особенно по рельсовым цепям) и повышение надежности за счет встроенной диагностики. Область применения результатов: Результаты применимы при планировании модернизации железнодорожной автоматики на промышленных железнодорожных станциях, в процессах оптимизации эксплуатационных затрат и повышения безопасности перевозок, при разработке методик оценки экономической эффективности внедрения МПЦ на предприятиях с интенсивным железнодорожным движением. Выводы: Повышение надежности и устойчивости работы промышленных транспортных систем в условиях роста турбулентности транспортных потоков и экономических отношений в системе «производство – транспорт – потребление».

Ключевые слова: железнодорожный промышленный транспорт, железнодорожный путь, железнодорожная станция, железнодорожная промышленная станция, стрелочный перевод, стрелка, сигнал, микропроцессорная централизация (далее – МПЦ), блочная маршрутно-релейная централизация (далее – БМРЦ), железнодорожная автоматика и телемеханика (далее – ЖАТ), металлургическое производство, металлургический комбинат, промышленная транспортная система (далее – ПТС), синергетический эффект, экономическая и технологическая турбулентность, система «производство – транспорт – потребление».

Diana O. Romanova, Alexey T. Popov, Olga A. Suslova

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, the Russian Federation

**IMPROVEMENT OF TRANSPORT SERVICES FOR METALLURGICAL
PRODUCTION IN THE APPLICATION OF MICROPROCESSOR CONTROL
AT INDUSTRIAL RAILWAY STATIONS**

Abstract. Subject of research. The study focuses on the industrial transport system of a metallurgical enterprise, specifically on railway traffic management processes and the prospects for implementing microprocessor-based centralization (MPC) as a key element in modernizing railway automation and remote control systems. Objective. To assess the feasibility of deploying MPC at industrial stations of a metallurgical plant. Evaluate the need to replace the existing block route-relay centralization system for train traffic control. Explore modern control systems for railway automation and telemechanics. Identify non-transport benefits of such modernization measures. Methods. Field observations and inspections of the current state of railway automation and telemechanics systems across 19 railway stations of the plant, statistical and objective observations, analytical and deductive methods, comparative analysis of statistical data (traffic volumes, shunting operation intensity, number of failures), technical specifications comparison. Results. The study delivered: identification of ancillary positive effects in industrial transport operations management.

Key findings include: a significant reduction in operational costs; confirmed decrease in failure rates at stations equipped with MPC; enhanced reliability due to built-in diagnostic capabilities. Area of application. The results are applicable for: planning modernization of railway automation at industrial railway stations; optimizing operational costs and improving transportation safety; developing methodologies to evaluate the economic efficiency of MPC implementation at enterprises with intensive railway traffic. Conclusions. The research demonstrates that MPC deployment enhances the reliability and resilience of industrial transport systems. This is particularly critical in conditions of increasing turbulence in transport flows and economic relations within the «production-transport-consumption» system.

Keywords: railway industrial transport, railway track, railway station, railway industrial station, switchboard, arrow, signal, microprocessor centralization (hereinafter referred to as MPC), block route and relay centralization (hereinafter referred to as BMRC), railway automation and telemechanics (hereinafter referred to as JAT), metallurgical production, metallurgical plant, industrial transport system (hereinafter referred to as TCP), synergetic effect, economic and technological turbulence, “production – transport – consumption” system.

Железнодорожный промышленный транспорт образует совместно с обслуживаемыми производственными цехами промышленную транспортную систему (ПТС). Работа основных цехов металлургического комбината зависит от стабильности и устойчивости функционирования железнодорожного транспорта, который обслуживает данное производство [1, 2]. В условиях значительных колебаний транспортных потоков сбой в работе транспорта способен привести к задержкам в основном производстве со сложными проблемами во взаимодействии с поставщиками и потребителями продукции исследуемого предприятия. Отрицательные экономические последствия носят трудноопределимый характер и большие объемы. МПЦ рассматривается как готовый данный инструмент, не является предметом проектирования и конструирования. Исследуются возможности и влияния применения компьютерных технологий на устойчивость и стабильность работы ПТС по сравнению с существующими традиционными системами железнодорожной автоматики.

Современные металлургические комбинаты представляют собой сложный производственный комплекс, включающий в себя агломерационное, коксохимическое, сталеплавильное, прокатное, доменное производство и большую группу вспомогательных цехов. В единую систему эти производственные подразделения связывает железнодорожный транспорт, осуществляющий внешние связи с магистральным транспортом и внутреннее технологическое взаимодействие между цехами, отделами и участками производства. Структура железнодорожной инфраструктуры общей протяженностью железных дорог более 500 км и количеством более 1500 стрелочных переводов промышленного предприятия может включать в себя до 20 железнодорожных станций, объединенных в маневровые районы, перегоны между станциями, транспортно-грузовые комплексы, склады, локомотивные и вагонные депо, склады открытого и закрытого типа, тупики очистки вагонов, гаражи размораживания вагонов, сортировочные горки и вытяжки. Маневровая и поездная работа осуществляется локомотивным парком более 120 единиц. В системе возможно одновременное нахождение до 8000 вагонов магистрального парка и до 2500 вагонов заводского парка [2, 3]. Годовой объем перевозок достигает 150 млн т. Учитывая особые условия функционирования – высокую неравномерность прибытия и отправления поездов с внешней сети, ограниченность длин станционных путей, недостаточность площадей для реконструкции и развития железнодорожных объектов при устойчивой тенденции увеличения производственных мощностей – можно констатировать глубокое взаимопроникновение и тесное взаимодействие железнодорожной и производственной инфраструктуры. Успехи и недостатки функционирования каждой из этих инфраструктур существенно влияют друг на друга, образуя прочный синергетический эффект как положительного, так и отрицательного свойства. Все сказанное выше служит достаточным основанием для рассмотрения изложенного объекта в качестве промышленной транспортной системы со всеми вытекающими правилами и закономерностями системного подхода. Многообразие выпускаемой продукции по номенклатуре, ее химическому и физическому свойствам накладывает дополнительные специфические требования к функционированию ПТС в связи с конкретными рыночными условиями и их высокой динамикой.

С целью повышения эффективности работы железнодорожного транспорта в современной практике используются разнообразные подходы. Обосновываются и применяются реконструкция элементов железнодорожной инфраструктуры, внедрение новых типов локомотивов и вагонов, погрузо-выгрузочных механизмов, информационно-управляющих и цифровых технологий [4] и др.

В данной работе авторы приводят методику и результаты исследования применения нового типа устройств железнодорожной автоматики, именуемое микропроцессорной централизацией (МПЦ) и управлением в условиях ПТС металлургического комбинат. Безусловно, наиболее интересны результирующие конечные синергетические эффекты и экономические оценки данного дорогостоящего проекта.

Состояние и характер развития МПЦ в структуре ПТС. В рассматриваемой промышленной транспортной системе металлургического комбината, состоящей из 19 железнодорожных станций, оснащены микропроцессорной централизацией восемь станций, оставшиеся 11 имеют значительный износ релейных систем и хронический недоштат квалифицированных специалистов в области СЦБ. Многие принимаемые на работу выпускники железнодорожных вузов, даже имеющие дипломы с отличием, оказываются не готовыми к компетентному поддержанию работоспособности оборудования и увольняются.

В связи с этим поддержание необходимого уровня безопасности и стабильной работы устройств железнодорожной автоматики (ЖАТ) с целью бесперебойного обеспечения железнодорожными перевозками цехов комбината становится все труднее. Однако кроме сказанного в основе исследуемого реновационного процесса все-таки лежат более глубокие технико-экономические основания. Особенно важно, что процесс улучшения, реконструкции, реставрации устройств ЖАТ производится без разрушения целостности структуры, непрерывно от существующего процесса транспортного обслуживания предприятия.

Исторически-экономический ход исследуемого процесса приведен в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Хронологическо-экономические аспекты оснащения станций

Название станции	Тип устройств СЦБ	Кол-во стрелок	Восст. стоим. на начало периода (руб.)	Стоимость одной стрелки (руб.)	Дата внедрения	Организация-изготовитель
Станция 1	МПЦ	21	67 305 764	3 205 036,42	01.10.2008	Заводы МПС/ Ш4191-9
Станция 2	МПЦ	67	525 417 699	7 842 055,21	01.12.2011	ООО «ПОЛИВИД»
Станция 3	МПЦ	33	204 062 762	6 183 720,07	01.12.2012	АО «НПЦ «Промэлектроника»
Станция 4	МПЦ	72	523 345 771	7 268 691,26	01.12.2012	ООО «ПОЛИВИД»
Станция 5	МПЦ	63	381 545 261	6 056 273,99	01.12.2013	ООО «ПОЛИВИД»
Станция 6	МПЦ	53	25 587 486	4 827 812,94	30.09.2017	ООО «Бомбардье Транспортейшн (Сигнал)»
Станция 7	МПЦ	19	111 154 881	5 850 256,91	31.10.2021	АО «НПЦ «Промэлектроника»
Станция 8	МПЦ	94	354 244 533	3 768 558,87	31.10.2021	АО «НПЦ «Промэлектроника»

Таблица 2 – Железнодорожные станции, оснащенные БМРЦ и ручными стрелочными переводами

Название станции	Тип устройств СЦБ	Кол-во стрелок	Дата внедрения	Организация-изготовитель
Станция 9	БМРЦ	95	01.01.1970	Заводы МПС
Станция 10	БМРЦ	31	01.04.1970	Заводы МПС
Станция 11	БМРЦ	21	01.10.1976	Заводы МПС
Станция 12	БМРЦ	14	01.02.1977	Заводы МПС
Станция 13	БМРЦ	39	01.12.1978	Заводы МПС
Станция 14	БМРЦ	82	01.04.1979	Заводы МПС
Станция 15	БМРЦ	49	01.05.1987	Заводы МПС
Станция 16	БМРЦ	77	01.12.2009	Заводы МПС
Станция 17	БМРЦ	100	01.03.2010	Заводы МПС
Станция 18	БМРЦ	121	30.08.2011	Заводы МПС
Станция 19	БМРЦ	69	30.08.2011	ОАО «Элтеза»

Данные таблиц 1 и 2 получены методами натуральных наблюдений и обследования фактического состояния систем в связи с работой авторов на этих объектах. Из таблицы 1 видны значительные колебания удельных затрат на оснащение станций МПЦ от 3,2 до 7,842 млн руб. за стрелку у разных исполнителей и достаточно действенный процесс реновации от 2008 до 2021 г. Таблица 2 дает представление о состоянии железнодорожных станций, оснащенных традиционными средствами ЖАТ. На примере станций 16 – 19 видно, что наряду с внедрением МПЦ, производилась реконструкция существующих систем блочно-маршрутной релейной централизации.

Интенсивность маневровой работы по изучаемым станциям приведена в таблице 3.

Таблица 3 – Производительность маневровых локомотивов, тонн на локомотив в час

Станция	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Кол-во лок. в работе	Средняя за сутки
1	363	388	411	418	414	373	380	342	375	401	390	410	7,26	388
2	548	591	617	602	529	555	554	556	550	600	601	618	5,97	576
3	124	126	127	124	118	121	119	118	123	125	120	119	4,91	122
4	1658	1905	1875	1911	1822	1806	2004	1869	1824	1870	1965	1990	1,98	1874
5	1297	1328	1377	1370	1407	1311	1286	1249	1310	1355	1312	1400	3	1333
6	455	445	341	405	444	443	434	431	444	446	443	445	2,32	431
7	54	63	62	62	62	67	64	65	60	63	63	67	16,95	62
8	375	384	395	348	407	417	412	391	380	401	403	420	4	394
9	331	329	336	277	297	277	289	269	287	276	336	332	5,58	303
10	183	291	223	205	230	223	212	275	223	236	230	265	1,10	233
11	271	275	288	268	251	281	249	257	271	276	268	280	4	269
12	776	742	745	732	795	740	843	911	840	800	879	906	1,21	809
13	493	557	507	490	558	564	497	538	540	533	548	571	2	533
14	776	792	787	809	862	803	802	775	888	879	836	865	8,89	822
15	317	302	368	333	367	336	343	353	340	360	339	354	2,32	342
16	175	196	174	218	211	209	216	212	211	200	198	218	5	203
17	776	792	787	809	862	803	802	775	888	879	836	865	8,89	822
18	443	450	474	470	473	472	466	456	470	472	460	477	8,88	465
19	186	175	165	162	166	162	171	159	176	177	180	187	4,91	172
Итого	9601	10131	10059	10013	10275	9963	10143	10001	10200	10349	10407	10789	99,17	10160

Анализ данных таблицы 3 показывает широкий разброс занятости станционных локомотивов маневровыми операциями, что объяснимо особенностями технологии обслуживаемого производства. Например, при обслуживании доменных печей принимается во внимание фактор высокой стоимости задержки в доменном производстве (свыше 50 тыс. у. е. в час на доменную печь) по сравнению со стоимостью простоя локомотива (2 – 3 тыс. руб./ч, в зависимости от серии), что приводит к принятию нестандартных решений в использовании тяговых средств. С целью снижения рисков перехода доменных печей на «тихий ход» расстановка маневровых локомотивов с коэффициентом использования 0,3 считается обоснованной.

Одновременно данные таблицы 3 наглядно демонстрируют сложность переустройства ЖАТ без остановки железнодорожного движения по станциям, с фрагментарным закрытием отдельных стрелочных переводов и путей с одновременным функционированием старой и новой систем.

Данные и расчеты из таблицы 3 приведены из годового отчета о деятельности структурного подразделения, на котором работают авторы.

Сравнение БМРЦ и МПЦ. Современное состояние рынка с неизбежностью диктует потребность в развитии, переоснащении цехов и комбината в целом. Однако дальнейшее

наращивание мощности невозможно без модернизации транспортной системы комбината. Устройства железнодорожной автоматики, эксплуатирующиеся на станции – электрическая централизация, автоблокировка и полуавтоблокировка на перегонах, автоматическая переездная сигнализация, автоматическая обдувка стрелок от снега, различные системы контроля и диагностики – разрабатывались и внедрялись в работу в 60-е – 80-е гг., построены на релейной элементной базе, в настоящее время не удовлетворяют современным требованиям безопасности (из-за физической изношенности основных фондов), сдерживают внедрение новых информационных, безлюдных и малообслуживаемых технологий, не обеспечивают сокращения эксплуатационных расходов, снижения трудозатрат. Многие элементы и приборы этих систем сняты с производства как морально устаревшие [5 – 7].

Количество отказов ЖАТ на промышленных железнодорожных станциях приведено в таблице 4. Анализ отказов показывает, что число отказов в традиционных средствах электрической централизации заметно выше, чем в исследуемой инновационной системе.

Таблица 4 – Количество отказов устройств СЦБ за 2021 – 2024 гг.

Станция	Кабель	Рельсовая цепь	Светофор	Стрелка	ЭССО	ИТОГ
МПЦ						
Станция 1	2	1	18	10	143	174
Станция 2	–	1	2	19	37	63
Станция 3	–	–	1	3	16	22
Станция 4	–	15	15	26	57	133
Станция 5	–	2	8	18	39	82
Станция 6	–	15	2	17	27	62
Станция 7	–	1	2	3	7	13
Станция 8	–	–	3	30	18	58
БМРЦ						
Станция 9	6	25	8	60	4	110
Станция 10	18	147	24	66	–	267
Станция 11	18	7	2	4	–	28
Станция 12	1	5	9	13	–	28
Станция 13	6	89	11	24	–	130
Станция 14	4	64	12	14	–	94
Станция 15	9	78	25	42	–	155
Станция 16	2	170	9	19	–	200
Станция 17	8	190	14	21	1	234
Станция 18	3	231	67	95	11	447
Станция 19	6	60	15	30	19	130

Проанализировав данные таблицы 4, видно, что большая часть отказов на станциях, оборудованных МПЦ, приходится на электронную систему счета осей. На станциях, оборудованных БМРЦ, большая часть отказов приходится на рельсовые цепи. При сравнении указанных систем необходимо учитывать основные факторы, определяющие экономическую эффективность при проведении комплексной реконструкции средств ЖАТ: снижение эксплуатационных затрат в различных отраслях на территории внедрения; комплексное решение задач по управлению движением поездов; увеличение скорости оборота подвижного состава; улучшение взаимодействия между всеми подразделениями, участвующими в процессе перевозок; автоматизация документооборота; внедрение информационных технологий; применение передовых методов обслуживания и содержания систем ЖАТ; сокращение количества используемых средств ЖАТ; уменьшение затрат на модернизацию и развитие систем ЖАТ [8].

В таблице 5 приводятся некоторые сравнительные показатели, позволяющие количественно и качественно оценить исследуемые системы.

Данные таблицы 5 получены методами натуральных наблюдений и обследования фактического состояния систем в связи с работой авторов на этих объектах. Внедрение МПЦ

на станции 8 в 2021 г. позволило объединить пост электрической централизации и административно-бытовой комплекс (АБК), тем самым необходимая площадь под оборудование снизилась на 40 %. Ежегодные расходы на электроэнергию и запасные части для ремонта оборудования удалось сократить с 4 269 287 руб. на БМРЦ до 1 670 000 на МПЦ. Ежегодные эксплуатационные затраты по обслуживанию постового и напольного оборудования приведены в таблице 6.

Таблица 5 – Сравнение технических и эксплуатационных характеристик БМРЦ и МПЦ

№ п/п	Характеристики	МПЦ	БМРЦ
1	Необходимая площадь под оборудование	На 40 % меньше	100 %
2	Количество релейных блоков/ реле на 1 стрелочный перевод	0,4/8	8/50
3	Энергопотребление (на 1 стрелку)	50 – 60 Вт	430 – 500 Вт
4	Ежегодные эксплуатационные расходы (на 1 стрелку)	656 руб.	3527 руб.
5	Встроенная диагностика	Да	Нет
6	Архивная система состояния первичной аппаратуры	Да	Нет
7	Автоматизированная система протоколирования	Да	Нет
8	Перестройка логики централизованного процесса в связи с изменением путевого развития станции	Просто	Сложно

Таблица 6 – Ежегодные эксплуатационные расходы на обслуживание станции

Годовые эксплуатационные расходы на обслуживание системы электрической централизации, состоящей из 94 стрелок	МПЦ	БМРЦ
Материальные затраты на электроэнергию и запасные части для ремонта оборудования	1 670 000 руб.	4 269 287 руб.
Трудозатраты на обслуживание устройств электрической централизации	740 100 руб.	2 500 000 руб.
Итого	2 410 100 руб.	4 519 287 руб.

Внедрение данных систем позволило улучшить безопасность, увеличило информативность, позволило архивировать данные и просматривать историю.

Анализ таблиц позволяет сделать предположение о наличии преимуществ МПЦ в строительстве:

сокращение капиталовложений за счет уменьшения габаритов постов ЭЦ и сокращение постовых устройств;

сокращение стоимости и сроков строительно-монтажных и пусконаладочных работ.

Преимущества МПЦ в эксплуатации:

повышенная надежность благодаря отказоустойчивым системам ЖАТ;

снижение эксплуатационных затрат на обслуживание устройств;

уменьшение количества реле и блоков на одну централизованную стрелку – с 50/8 до 8/0,4;

упрощение процесса изменения логики централизации при модернизации путевого развития;

расширение функционала электрической централизации (ЭЦ) при интеграции АРМ ДСП в корпоративную автоматизированную систему управления (АСУ);

упрощение интеграции с диспетчерской централизацией (ДЦ), особенно с современными микропроцессорными системами;

применение электрической системы счета осей (ЭССО) для контроля свободности участков пути на станциях и перегонах, что позволяет контролировать пути с любым сопротивлением балласта, уменьшить расход кабеля и значительно сократить эксплуатационные затраты, ранее требовавшиеся для рельсовых цепей [9].

Одновременно необходимо отметить преимущества МПЦ по безопасности и надежности:

– непрерывный автоматический контроль исправности всех узлов и элементов системы;

– выполнение алгоритмических условий обеспечения безопасности движения поездов;

- защита от перехода в опасное состояние при сбоях в работе программного обеспечения, появлении отказа аппаратных средств и воздействии электромагнитных помех;
- защищенность от климатических и механических воздействий;
- защищенность от ошибочных и несанкционированных действий обслуживающего персонала [10].

Из изложенного выше следует, что МПЦ как система нового поколения по сравнению с ЭЦ обладает более широкими функциональными возможностями и высокими техническими характеристиками. При этом принятие решения о столь масштабном переходе к новой системе управления стрелками и сигналами на промышленных железнодорожных станциях осуществлялось решительным требованием мажоритарных акционеров даже в условиях режима жесточайшей экономии средств. Экономические оценки последствий внедрения дорогостоящего оборудования и перспективы окупаемости этого процесса, глубина влияния на технологию перевозочного процесса, на технологический процесс обслуживаемого производства не определялись, что создает объективную потребность в разработке методики определения технического, организационного, управленческого, экономического, транспортного и внетранспортного эффектов от внедрения микропроцессорного управления станционными технологиями.

Список литературы

1. Сулова, О. А. Оптимизация технологического процесса промышленного железнодорожного транспорта металлургического комбината : специальность 05.22.01 «Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сулова Ольга Анатольевна ; Липецкий гос. техн. ун-т. – Липецк, 2006. – 209 с. – Текст : непосредственный.
2. Основные сведения об Управлении по обучению и развитию персонала (УОРП) Дирекции по персоналу Публичного акционерного общества «Новолипецкий металлургический комбинат» (ПАО «НЛМК») // www.nlmk.com : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://lipetsk.nlmk.com/ru/career/corporate-education/main-info/> (дата обращения: 05.12.2025).
3. Журнал «Компания НЛМК». – 2014. – № 4 // www.nlmk.com : сайт. – Текст : электронный. – URL: https://nlmk.com/ru/media-center/corporate-media/?apply_filter=Y&documents_filter%5Byear%5D=2014 (дата обращения: 10.12.2025).
4. Журнал «Компания НЛМК». – 2015. – № 3 // www.nlmk.com : сайт. – Текст : электронный. – URL: https://nlmk.com/ru/media-center/corporate-media/?apply_filter=Y&documents_filter%5Byear%5D=2015 (дата обращения: 10.12.2025).
5. Мельников, А. С. Барьеры распространения цифровых технологий в деятельности российских компаний: причины и последствия / А. С. Мельников, Е. Г. Калабина. – Текст : непосредственный // Вестник Российского экономического университета имени Г. В. Плеханова. – 2024. – Т. 21. – № 6 (138). – С. 33–45. – EDN RCPGFI.
6. Маврычев, Е. А. Спектральная эффективность беспроводной релейной сети в частотно-неселективном канале / Е. А. Маврычев, Е. Н. Приблудова, С. Б. Сидоров. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2020. – Т. 23. – № 4. – С. 25–37. – DOI 10.32603/1993-8985-2020-23-4-25-37. – EDN ERSDOT.
7. Определение современных показателей надежности устройств релейной защиты и автоматики / А. В. Виноградов, А. А. Лансберг, Ю. Д. Волчков, А. В. Виноградова. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2023. – Т. 25. – № 2. – С. 58–70. – DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-2-58-70. – EDN QNYMLE.
8. Шкуринов, В. В. Анализ работы аппаратно-программных средств микропроцессорных систем в сравнении с традиционными (релейными) системами электрической централизации / В. В. Шкуринов. – Текст : непосредственный // Вестник Белорусского государственного

университета транспорта: наука и транспорт. – 2014. – № 1 (28). – С. 24–26. – EDN SMMVFE
EDN SMMVFE.

9. Шерстюков, О. С. Преимущества микропроцессорных централизаций перед релейными системами управления движением поездов на станциях / О. С. Шерстюков. – Текст : непосредственный // Человек и общество в системе современных научных парадигм. – 2019. – № 1 (5). – С. 32–35. – EDN WILVRV.

10. Типовые материалы по проектированию. Устройства контроля свободы путевых участков методом счета осей с использованием аппаратуры ЭССО в системах железнодорожной автоматики и телемеханики 421413-01-ТМП. – Санкт-Петербург : ОАО «Росжелдорпроект», филиал «Гипротрансигнальсвязь», 2007. – С. 30–34. – Текст : непосредственный.

References

1. Suslova O.A. *Optimizacija tehnologicheskogo processa promyshlennogo zheleznodorozhnogo transporta metallurgicheskogo kombinata* (Optimization of the technological process of industrial railway transport of a metallurgical combine). Doctor's thesis, Lipetsk, Lipetsk State Technical University, 2006, 209 p. (In Russian).

2. *Upravlenie po obucheniiu i razvitiuu personala (UORP) Direktsii po personalu Publichnogo aktsionernogo obshchestva Novolipetskii metallurgicheskii kombinat (PAO NLMK)* [Personnel Training and Development Department (UORP) of the Personnel Directorate of Public Joint Stock Company Novolipetsk Metallurgical Combine (PJSC NLMK)]. Available: <https://lipetsk.nlmk.com/ru/career/corporate-education/main-info/> (accessed 05.12.2025).

3. *Zhurnal «Kompanija NLMK»*, 2014, №4 [Magazine "NLMK Company", no. 4, 2014]. Available at: https://nlmk.com/ru/media-center/corporate-media/?apply_filter=Y&documents_filter%5Byear%5D=2014 (accessed 10.12.2025).

4. *Zhurnal «Kompanija NLMK»*, 2015, №3 [Magazine "NLMK Company", no. 3, 2015]. Available at: https://nlmk.com/ru/media-center/corporate-media/?apply_filter=Y&documents_filter%5Byear%5D=2015 (accessed 10.12.2025).

5. Melnikov A.S., Kalabina E.G. Barriers in proliferating digital technologies at russian companies: causes and effects. *Vestnik Rossiiskogo ekonomicheskogo universiteta imeni G. V. Plekhanova – Vestnik of the Plekhanov Russian University of Economics*, 2024, vol. 21, no. 6(138). EDN RCPGFI. (In Russian).

6. Mavrychev E.A., Pribludova E.N., Sidorov S.B. Spectral efficiency of wireless relay network in frequency non-selective channel. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika – Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*, 2020, vol. 23, no. 4, pp. 25-37. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-4-25-37>. EDN ERSDOT. (In Russian).

7. Vinogradov A.V., Lansberg A.A., Volchkov Yu.D., Vinogradova A.V. Determination of modern reliability indicators of relay protection and automation devices. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki – Power engineering: research, equipment, technology*, 2023, vol. 25, no. 2, pp. 58-70. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-2-58-70>. EDN QNYMLE. (In Russian).

8. Shkurynau V.V. The analysis of work of hardware and software of microprocessor systems in comparison with traditional (relay) systems of electric centralization. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: nauka i transport – Bulletin of the Belarusian State University of Transport: Science and Transport*, 2014, no. 1(28), pp. 24-26. EDN SMMVFE. (In Russian).

9. Sherstyukov O.S. Advantages of microprocessor-based interlocking over relay train control systems at stations. *Chelovek i obshchestvo v sisteme sovremennykh nauchnykh paradigm – Man and society in the system of modern scientific paradigms*, 2019, no. 1(5), pp. 32-35. EDN WILVRV. (In Russian).

10. Standard design materials. Devices for monitoring the freedom of track sections by the axis counting method using ESSO equipment in railway automation and telemechanics systems 421413-01-TMP, 2010. 30-34 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Романова Диана Олеговна

Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ).

Московская ул., д. 30, г. Липецк, 398055, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Организация перевозок», ЛГТУ.

Тел.: +7 (904) 685-36-98.

E-mail: dromanova1997@mail.ru

Попов Алексей Тимофеевич

Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ).

Московская ул., д. 30, г. Липецк, 398055, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры «Организация перевозок», ЛГТУ.

Тел.: +7 910-742-90-31.

E-mail: a.t.popov1955@gmail.com

Суслова Ольга Анатольевна

Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ).

Московская ул., д. 30, г. Липецк, 398055, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Организация перевозок», ЛГТУ.

Тел.: +7 910-251-00-80.

E-mail: suslova_2003@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Романова, Д. О. Совершенствование транспортного обслуживания металлургического производства при применении микропроцессорного управления на промышленных железнодорожных станциях / Д. О. Романова, А. Т. Попов, О. А. Суслова. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 4 (64). – С. 77 – 85.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Romanova Diana Olegovna

Lipetsk State Technical University (LSTU).

30, Moskovskaya st., 398055, Lipetsk, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department “Transportation Management”, LSTU.

Phone: +7 (904) 685-36-98.

E-mail: dromanova1997@mail.ru

Popov Alexey Timofeevich

Lipetsk State Technical University (LSTU).

30, Moskovskaya st., 398055, Lipetsk, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, professor, professor of the department “Transportation Management”, LSTU.

Phone: +7 910-742-90-31.

E-mail: a.t.popov1955@gmail.com

Suslova Olga Anatolyevna

Lipetsk State Technical University (LSTU).

30, Moskovskaya st., 398055, Lipetsk, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department “Transportation Management”, LSTU.

Phone: +7 910-251-00-80.

E-mail: suslova_2003@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Romanova D.O., Popov A.T., Suslova O.A. Improving the transport services of metallurgical production in the application of microprocessor control at industrial railway stations. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 4(64), pp. 77-85. (In Russian).

УДК 629. 423.31

К. Е. Пастухов, В. В. Харламов

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

ФОРМИРОВАНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ГРАФ-МОДЕЛИ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Аннотация. Надежность и долговечность электрических машин, таких как двигатели и генераторы, в решающей степени определяются состоянием их изоляционной системы [1, 2]. В данной статье представлен комплексный анализ многофакторных процессов, приводящих к деградации изоляционных материалов обмоток [3]. Исследование раскрывает сложные и зачастую нелинейные взаимосвязи между ключевыми факторами старения: термическими перегрузками, электрическими перенапряжениями, механическими вибрациями и разрушительным воздействием окружающей среды (влажность, загрязнения) [4]. Совокупное влияние этих факторов приводит к прогрессирующему ухудшению диэлектрической прочности и, как следствие, к сокращению срока службы оборудования.

В качестве методологической основы предлагается инновационный подход к диагностике состояния изоляции, основанный на теории графов [5]. Разработанная граф-модель служит формализованным инстру-

ментом для описания причинно-следственных связей между входными параметрами (ток якоря, напряжение, режимы пуска и торможения), внешними условиями эксплуатации и внутренними диагностическими параметрами, такими как сопротивление изоляции, тангенс дельта и параметры частичных разрядов [6]. Особое внимание в модели уделено анализу петель положительной обратной связи, которые объясняют нелинейный, лавинообразный характер развития повреждений, когда один вид дефекта ускоряет развитие других.

Практическая значимость исследования заключается в переходе от традиционного планово-предупредительного обслуживания к предиктивной модели. Предложенная базовая граф-модель позволяет осуществлять раннюю диагностику признаков деградации и строить точные прогнозы остаточного ресурса изоляции. Результаты работы открывают перспективы для создания интеллектуальных систем мониторинга и диагностики, а также для оптимизации стратегий технического обслуживания силового электрооборудования, что в конечном итоге повышает его эксплуатационную надежность и экономическую эффективность.

Разработанная базовая граф-модель послужит теоретической основой для создания эффективных систем диагностики и прогнозирования остаточного ресурса изоляции. Выявление петель положительной обратной связи в процессах деградации позволяет определять критические точки контроля и разрабатывать превентивные меры для предотвращения внезапных отказов.

Результаты работы открывают перспективы для создания интеллектуальных систем мониторинга и диагностики, а также для оптимизации стратегий технического обслуживания силового электрооборудования, что в конечном итоге повышает его эксплуатационную надежность и экономическую эффективность.

Ключевые слова: диагностика изоляции обмоток, состояние изоляции, электрические машины, изоляция обмоток, граф-модель диагностики, взаимосвязи параметров изоляции.

Kirill E. Pastukhov, Viktor V. Kharlamov

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

FORMATION OF A DIAGNOSTIC GRAPH MODEL FOR THE INSULATION STATE OF ELECTRICAL MACHINE WINDINGS

Abstract. The reliability and longevity of electrical machines, such as motors and generators, are critically determined by the condition of their insulation system. This paper presents a comprehensive analysis of the multifaceted processes leading to the degradation of winding insulation materials. The study reveals the complex and often non-linear interrelationships between key aging factors thermal overloading, electrical surges, mechanical vibrations, and the detrimental impact of the environment (humidity, contaminants). The combined influence of these factors leads to a progressive deterioration of dielectric strength and, consequently, a reduction in the equipment's service life.

As a methodological foundation, an innovative approach to insulation condition diagnostics, based on graph modeling, is proposed. The developed graph model serves as a formalized tool for describing cause-and-effect relationships between input parameters (armature current, voltage, and start/stop regimes), external operating conditions, and internal diagnostic parameters, such as insulation resistance, tangent delta, and partial discharge characteristics. Particular attention in the model is paid to the analysis of positive feedback loops, which explain the non-linear, avalanche-like nature of damage development, where one type of defect accelerates the progression of others.

The practical significance of the research lies in the transition from traditional planned-preventive maintenance to a predictive model. The proposed graph model enables the early diagnosis of degradation signs and the construction of accurate forecasts for the insulation's remaining useful life. The results of the work pave the way for the development of intelligent monitoring and diagnostic systems, as well as for the optimization of maintenance strategies for power electrical equipment, ultimately enhancing its operational reliability and economic efficiency.

The developed graph model will serve as a theoretical basis for creating effective diagnostic systems and predicting the remaining useful life of insulation. Identifying positive feedback loops in degradation processes makes it possible to determine critical control points and develop preventive measures to prevent sudden failures.

Keywords: winding insulation diagnostics, insulation condition, electric machines, winding insulation, graph model of diagnostics, and relationships between insulation parameters.

Функциональная целостность и безопасность электрических машин напрямую коррелируют с характеристиками изоляционного покрытия их обмоток. В условиях повышенной эксплуатационной нагрузки, испытываемой двигателями и генераторами, изоляционный слой выступает в роли первичного защитного механизма, минимизирующего риск возникновения коротких замыканий, пробоев и других критических отказов. Тем не

менее эксплуатационные свойства изоляции подвержены прогрессирующей деградации под суммарным воздействием таких факторов, как температурные флуктуации, погодные условия, механические и электрические воздействия, воздействие агрессивных химических сред и естественное старение материала. В рамках настоящего исследования проводится анализ синергетического эффекта от взаимодействия указанных деградационных факторов и предлагается методология их формализации посредством применения граф-моделей.

В качестве инструмента для наглядной репрезентации корреляций между параметрами, детерминирующими состояние изоляции, используется граф-модель. Вершины данного графа соответствуют ключевым переменным, включая температурный режим, уровень влажности, величину механических и электрических нагрузок, интенсивность химических воздействий, продолжительность эксплуатации изоляции и применяемые диагностические процедуры. Ребра графа визуализируют причинно-следственные зависимости и взаимовлияние между этими переменными, а также их интегральное воздействие на общий показатель состояния изоляционной системы.

Диагностируемый объект рассматривается как сложная система, характеризующаяся множеством взаимосвязанных параметров (рисунок 1). Процедура его технической диагностики структурируется как двухэтапная: на первом этапе осуществляется оценка общей работоспособности объекта, на втором – идентификация и точная локализация специфических неисправностей.



Рисунок 1 – Схема сложного объекта диагностирования

Входные величины $\{k_1, k_2, \dots, k_m\}$ представляют собой внешние воздействия, которые поступают на диагностируемый объект от других систем или из окружающей среды.

Выходные величины $\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ – это изменяемые характеристики самого объекта, которые реагируют на колебания входных величин $\{k_m\}$, воздействие шумов $\{\chi_{\xi}\}$ и сдвиги внутренних параметров. Данные величины оказывают влияние на смежные системы и количественно описывают состояние объекта и процесс его функционирования.

Перечень параметров, используемых в граф-модели, и обозначения ее вершин приведены в таблице.

Список потенциальных дефектов (см. таблицу) был составлен на основе статистических данных и теоретического анализа влияния различных факторов на состояние изоляции обмоток. Совокупность этих данных формирует множество дефектов, которые подлежат идентификации [7].

Предлагаемая методика дает возможность не просто визуализировать сложные взаимосвязи, но и разрабатывать научно обоснованные методы управления техническим состоянием и планирования профилактических мер.

Моделирование изоляционной системы электрических машин, как и любой сложной технической системы, начинается с выявления основных эксплуатационных характеристик, которые затем объединяются в единую логическую схему.

Обозначение вершин граф-модели изоляции обмоток ТЭД

Обозначение вершины	Наименование параметра
	Входные параметры
I_a	Ток якоря
U_a	Напряжение на обмотке
I_b	Токи возбуждения
N_{MB}	Степень охлаждения мотор-вентилятором
	Параметры окружающей среды
C_b	Влажность
T_b	Температура
a	Вибрации
	Внутренние параметры
R_{iso}	Сопротивление изоляции
$tg \delta$	Тангенс угла диэлектрических потерь
ЧР	Частичные разряды
$C_{из}$	Емкость изоляции
$T_{об}$	Температура
q	Трещины и разрывы изоляции
h	Увлажнение изоляции
z	Нарушение технологии производства (ремонта)
	Дефекты
d_1	Снижение сопротивления изоляции
d_2	Отклонение от предельных значений $tg \delta$
d_3	Увеличение интенсивности частичных разрядов
d_4	Отклонение от допустимых параметров коэффициента абсорбции
d_5	Уменьшение поляризационного индекса

Изоляция обмоток, рассматриваемая как сложная система, преобразующая энергию, не имеет четких функциональных блоков с однозначными входами и выходами. Следовательно, для построения адекватной граф-модели требуется анализ скрытых причинно-следственных связей между параметрами и физическими свойствами системы. Точная граф-модель может быть построена на основе анализа причинно-следственных связей между параметрами и свойствами изоляции.

Изоляция обмоток электрических машин представляет собой динамическую систему, параметры которой изменяются под влиянием внешних и внутренних факторов, что приводит к постепенной деградации и выходу изоляции обмоток из строя.

Деградация изоляции обмоток электрической машины может быть описана системой нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка, учитывающей взаимосвязь между

- термическими процессами (нагрев, теплопередача, старение изоляции);
- электрическими процессами (частичные разряды, утечки тока);
- механическими и химическими воздействиями (вибрация, термоциклирование, влага, загрязнения).

На состояние изоляции воздействуют следующие параметры:

- $T(t)$ – температура изоляции;
- $U(t)$ – напряжение на изоляции;
- $\sigma(t)$ – механические воздействия (вибрация, термоусадка);
- $C(t)$ – концентрация агрессивных веществ (влаги, химических загрязнений);
- $D(t)$ – степень деградации изоляции (0 – новая, 1 – разрушенная).

Тогда система уравнений может иметь вид:

$$\begin{cases} \frac{dT}{dt} = f_1(T, U, I, a) - k_1(T - T_{\text{окр}}) + \eta D; \\ \frac{dU}{dt} = f_2(U, R_{\text{из}}, \varepsilon) - \xi PD(U, T); \\ \frac{d\sigma}{dt} = f_3(\omega, a_{\text{вибр}}, \beta) - k_2\sigma; \\ \frac{dC}{dt} = f_4(\text{влажность, загрязнение}) - k_3C; \\ \frac{dD}{dt} = f_5(T, U, \sigma, C, \gamma), \end{cases} \quad (1)$$

где $PD(U, T)$ – интенсивность частичных разрядов (зависит от напряжения и температуры);

k_1, k_2, k_3 – коэффициенты рассеивания (теплоотдача, демпфирование вибрации, выветривание влаги);

$\alpha, \beta, \gamma, \eta, \xi$ – эмпирические коэффициенты, учитывающие особенности конструкции и материалов.

Базовая модель служит основой для разработки более детализированной первичной модели (рисунок 2). Ее формируют путем добавления к исходной модели множества F – параметров функционирования изоляции обмоток. Эти параметры были выявлены в ходе анализа различных факторов (см. таблицу), которые тем или иным образом влияют на работу энергопреобразующей системы и определяют интенсивность, характер деградации, а также вероятность возникновения отказа [5].

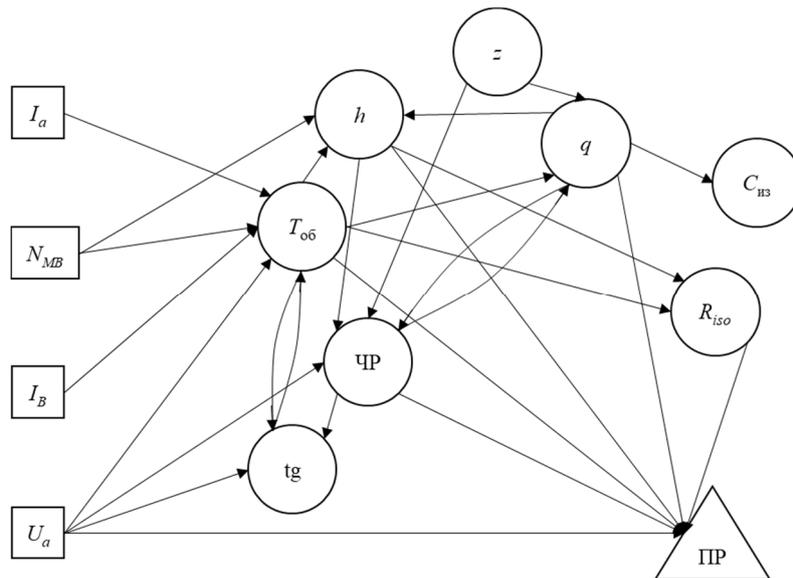


Рисунок 2 – Базовая граф-модель изоляции обмоток

Таким образом, модель эволюционирует от общего представления к формализованной системе, где каждому элементу множества F ставится в соответствие определенный физический процесс или диагностируемый параметр. К множеству F относятся такие параметры, как интенсивность частичных разрядов, скорость термического старения, коэффициент увлажнения и другие, которые количественно характеризуют текущее состояние изоляции и динамику ее изменения под воздействием внешних и внутренних факторов. Это позволяет перейти от качественного описания к построению функциональных зависимостей, связывающих входные воздействия с параметрами деградации.

Перечень потенциальных дефектов (см. таблицу) был составлен на основании статистической информации и теоретического изучения воздействия различных факторов на

состояние изоляции обмоток. Совокупность этих данных формирует множество распознаваемых дефектов $D = \{d_1, \dots, d_p\}$.

Множество D является подмножеством возможных состояний системы, выделенных из всего пространства состояний по критерию критичности. Каждый дефект $d_i \in D$ представляет собой суммарное воздействие значений параметров из множества F , которое соответствует определенному механизму отказа, например, «поверхностное перекрытие вследствие увлажнения и загрязнения» или «пробой из-за эрозии материала частичными разрядами». Задача диагностики сводится к идентификации текущего вектора состояния системы и его отнесению к одному из элементов множества D .

Параметрическое пространство изоляции обмоток представлено в виде граф-модели. Ее вершины X образуются в результате замыкания множества внутренних параметров M . Эта операция гарантирует, что модель учитывает не только внутренние характеристики, но и параметры смежных элементов, самой изоляции и внешней среды (входные параметры $k \in K$). Ключевыми входными параметрами, влияющими на процесс функционирования диагностируемого объекта, являются I_a , U_a , I_b и N_{MB} .

Данная граф-модель наглядно показывает, что отказ изоляции – это редко результат одного фактора. Это сетевое явление, где различные процессы (тепловые, электрические, механические, влажностные) усиливают друг друга, приводя к лавинообразной деградации.

Инициирование процесса: деградация начинается под воздействием входных параметров – электрических, тепловых и механических нагрузок. Ток якоря и напряжение создают первоначальные термические и электрические напряжения, а режимы работы вентилятора определяют интенсивность охлаждения и влажностные воздействия.

Развитие по цепным реакциям:

тепловая цепь: перегрев → ускоренное старение → снижение механической прочности → трещины;

электрическая цепь: высокое напряжение → частичные разряды → эрозия изоляции → трещины;

механическая цепь: вибрация → трещины → увлажнение → снижение сопротивления.

Самоускоряющийся характер: ключевая особенность процесса – наличие петель положительной обратной связи:

температура повышает диэлектрические потери ($\text{tg } \delta$), что ведет к дальнейшему росту температуры;

трещины провоцируют частичные разряды, которые расширяют существующие трещины;

увлажнение через трещины снижает сопротивление, вызывая локальный перегрев и новые повреждения.

Критическая фаза: нарушение технологии производства и ремонта выступает катализатором, значительно ускоряя все перечисленные процессы. Когда совокупность дефектов достигает критического уровня, происходит лавинообразное нарастание повреждений, заканчивающееся пробоем изоляции.

Таким образом, деградация изоляции представляет собой каскадный процесс с положительной обратной связью, где различные факторы не просто суммируются, а усиливают друг друга, приводя к нелинейному ускорению разрушения.

Проведенное исследование позволило разработать базовую граф-модель состояния изоляции обмоток электрических машин, которая отражает сложную природу процессов деградации. Модель демонстрирует, что отказ изоляции является результатом не простого суммирования отдельных факторов, а следствием сетевого взаимодействия множества параметров, образующих сложные причинно-следственные цепи с положительными обратными связями.

Основой работы является формализация диагностической задачи через представление системы в виде множеств входных параметров (K), параметров функционирования (F) и идентифицируемых дефектов (D). Такой подход учитывает взаимное влияние термических,

электрических, механических и химических процессов в изоляции и позволяет перейти к более достоверной оценке состояния изоляции.

Применение графоаналитического метода позволило определить эффективное множество параметров диагностирования изоляции обмоток и контроля работоспособности в условиях эксплуатации.

Разработанная граф-модель послужит теоретической основой для создания эффективного метода диагностирования и прогнозирования остаточного ресурса изоляции.

Перспективой дальнейших исследований являются параметризация математической модели и ее верификация по экспериментальным данным, что позволит создать инструмент с использованием обучаемых нейронных сетей для определения возможных дефектов и формирования рекомендаций по оптимизации сроков технического обслуживания и в результате достичь повышения надежности электрических машин.

Список литературы

1. Измерительный комплекс по определению остаточного ресурса изоляции электрических машин / Г. В. Суханкин, О. К. Никольский, Н. Т. Герцен, Н. П. Воробьев. – Текст : непосредственный // Ползуновский вестник. – 2014. – № 4-1. – С. 254–259. – EDN SZJRJV.

2. Бабкин, П. А. Современные методы диагностики электрооборудования электрических станций и подстанций / П. А. Бабкин, Д. Е. Емельянов, М. Ю. Еремин. – Текст : непосредственный // Современные научно-практические решения в АПК : материалы международной студенческой научно-практической конференции / Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I. – Воронеж, 2023. – С. 31–36. – EDN JEENYY.

3. Пастухов, К. Е. Диагностика состояния изоляции обмотки электрических машин: подходы и взаимосвязи / К. Е. Пастухов. – Текст : непосредственный // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте : материалы всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2025. – С. 61–68. – EDN GLZSTH.

4. ГОСТ Р МЭК 60034-18-1–2014. Машины электрические вращающиеся. Часть 18-1. Оценка функциональных показателей систем изоляции. Общие требования. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 18 с. – Текст : непосредственный.

5. Харламов, В. В. Совершенствование методов и средств диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей подвижного состава : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Харламов Виктор Васильевич ; Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2002. – 43 с. – Текст : непосредственный.

6. Калявин, В. П. Надежность и диагностика элементов электроустановок / В. П. Калявин, Л. М. Рыбаков. – Санкт-Петербург : Элмор, 2009. – 331 с. – Текст : непосредственный.

7. Пастухов, К. Е. Диагностирование технического состояния изоляции тяговых электрических машин / К. Е. Пастухов, В. В. Харламов. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы научной конференции / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2025. – С. 383–388. – EDN LAKUIT.

References

1. Sukhankin G.V., Nikolsky O.K., Gertszen N.T., Vorobyov N.P. Measurement complex for determining the residual resource of electrical machine insulation. *Polzunovskiy vestnik*, 2014, no. 4-1, pp. 254-259. EDN SZJRJV. (In Russian).

2. Babkin P.A., Emelyanov D.E., Eremin M.Yu. [Modern methods for diagnosing electrical equipment of power stations and substations]. *Sovremennye nauchno-prakticheskie resheniya v APK: materialy mezhdunarodnoy studencheskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern scientific and practical solutions in agriculture: Materials of the International Student Scientific and Practical Conference]. Voronezh, 2023, pp. 31-36. EDN JEENYY. (In Russian).

3. Pastukhov K.E. [Diagnosis of winding insulation condition in electrical machines: approaches and interrelations]. *Pribory i metody izmereniy, kontrolia kachestva i diagnostiki v promyshlennosti i na transporte : materialy vs Rossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Instruments and methods of measurement, quality control and diagnostics in industry and transport : proceedings of the All-Russian Scientific and Technical conference with international participation]. Omsk, 2025, pp. 61-68. EDN GLZSTH. (In Russian).

4. National Standard 60034-18-1-2014. Rotating electrical machines. Part 18-1. Evaluation of insulation system performance indicators. General requirements. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 18 p. (In Russian).

5. Kharlamov V.V. *Sovershenstvovanie metodov i sredstv diagnostirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya kollektorno-shchetochного узла tyagovykh elektrodvigately podvizhnogo sostava* [Improvement of methods and means for diagnosing the technical condition of the commutator-brush unit of traction electric motors of rolling stock]. Doctor's of Sciences in Engineering thesis abstract, Omsk, OSTU, 2002, 43 p. (In Russian).

6. Kalyavin V.P., Rybakov L.M. *Nadezhnost' i diagnostika elementov elektroustanovok* [Reliability and diagnostics of electrical installation elements]. Saint Petersburg, Elmor Publ., 2009, 331 p. (In Russian).

7. Pastukhov K.E., Kharlamov V.V. [Diagnostics of the technical condition of the insulation of traction electric machines]. *Innovatsionnye proekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte : materialy nauchnoy konferentsii* [Innovative projects and technologies in education, industry and transport : proceedings of the scientific conference]. Omsk, 2025, pp. 383-388. EDN LAKUIT. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пастухов Кирилл Евгеньевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОМГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Аспирант/инженер-лаборант кафедры «Электрические машины и общая электротехника» ОМГУПС.

Тел.: +7 (923) 164-22-36.

E-mail: kirill.pastukhov.2001@mail.ru

Харламов Виктор Васильевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОМГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника», ОМГУПС.

Тел.: 8-913-606-8274.

E-mail: hvv-omgups@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pastukhov Kirill Evgenievich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Postgraduate student/laboratory engineer of the department «Electric machines and general electrical engineering», OSTU.

Phone: +7 (923) 164-22-36.

E-mail: kirill.pastukhov.2001@mail.ru

Kharlamov Viktor Vasilyevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor, head of the department «Electric machines and general electrical engineering», OSTU.

Phone: 8-913-606-8274.

E-mail: hvv-omgups@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Пастухов, К. Е. Формирование диагностической граф-модели состояния изоляции обмоток электрических машин / К. Е. Пастухов, В. В. Харламов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 4 (64). – С. 85 – 93.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Pastukhov K.E., Kharlamov V.V. Formation of a diagnostic graph model for the insulation state of electrical machine windings. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 4 (64), pp. 85-93. (In Russian).

UDC 656.225

Elmurod T. Astanaliev and Dilshod Kh. Baratov

Tashkent State Transport University (TSTU), Tashkent, the Republic of Uzbekistan

DEVELOPMENT OF MICRO-COMMANDS ACCORDING TO LOGICAL SCHEMES OF ALGORITHMIC TECHNICAL DOCUMENTATION IN RAILWAY AUTOMATION

Abstract. *In this research, a formal strategy for enhancing the electronic distribution of technical documents in railway automation and telemechanics is developed. The accounting and control of device-related documents are formalized using a graph-based model. By creating maximally compatible (non-contradictory) groupings of LSA elements, a micro-command system is created using logical scheme algorithm (LSA) A71 as a case study, illustrating how to simplify the logical scheme (LS). In order to characterize the methods for producing the subsequent micro-instruction code and to depict the parallel execution of internal and external micro-operations, matrix representations are introduced. The study thus suggests a useful formal model and graphical approaches for the analysis, synthesis, and assessment of workflows involving electronic technical documents. These methods aim to minimize the number of internal states in logical structures by forming compatible groups of LSA elements. The resulting micro-commands allow the simultaneous execution of multiple micro-operations within a single micro-cycle, thereby increasing processing efficiency. Extended logical schemes were introduced to better assess the complexity of automata used in managing electronic technical documents. A graphical model of the logical schemes is developed, offering practical tools to design and optimize automation processes. The proposed approach simplifies the control structure while maintaining the system's functionality, allowing for more efficient monitoring and real-time control in railway operations. This methodology is especially relevant for modernizing technical documentation systems used in the transport sector and integrating them with automation and control mechanisms.*

Keywords: *railway automation and telemechanics, electronic technical document management, micro-instruction generation, matrix-based minimization, formal modeling.*

Э. Т. Астаналиев, Д. Х. Баратов

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ), г. Ташкент, Республика Узбекистан

РАЗРАБОТКА МИКРОКОМАНД ПО ЛОГИЧЕСКИМ СХЕМАМ АЛГОРИТМИЧЕСКОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКЕ

Аннотация. *В данном исследовании разработана формальная стратегия повышения эффективности электронного распределения и обращения технических документов в системах железнодорожной автоматики и телемеханики. Учет и контроль документации, связанной с устройствами, формализуются на основе графовой модели. На примере алгоритмической логической схемы (ЛСА) А71 показано, что формирование максимально совместимых (непротиворечивых) групп элементов ЛСА позволяет синтезировать систему микрокоманд и тем самым упростить логическую схему (ЛС). Для описания методов формирования кода последующей микроинструкции, а также для представления параллельного выполнения внутренних и внешних микроопераций вводятся матричные представления. Тем самым предлагаются практико-ориентированная формальная модель и графические подходы для анализа, синтеза и оценки рабочих процессов электронного обращения электронных технических документов. Предложенные методы направлены на минимизацию числа внутренних состояний в логических структурах за счет построения совместимых групп элементов ЛСА. Сформированные микрокоманды обеспечивают одновременное выполнение нескольких микроопераций в рамках одного микроцикла, что повышает эффективность обработки. Для более точной оценки сложности*

автоматов, применяемых при управлении электронными техническими документами, введены расширенные логические схемы. Разработана графическая модель логических схем, предоставляющая практические средства для проектирования и оптимизации процессов автоматизации. Предложенный подход упрощает структуру управления при сохранении функциональности системы, обеспечивая более эффективный мониторинг и управление в реальном времени в железнодорожных процессах. Данная методология особенно актуальна для модернизации систем технической документации в транспортной отрасли и их интеграции с механизмами автоматизации и управления.

Ключевые слова: железнодорожная автоматика и телемеханика, электронное управление технической документацией, генерация микроинструкций, матричная минимизация, формальное моделирование.

Introduction. The development of technical tools and technologies that guarantee the ongoing availability and technical state of rolling stock and enhance the effectiveness of technologically and regulatoryly regulated transportation processes is linked to advancements in the field of high-speed railway transport security. In railway transportation systems, automation of routing and distribution of technical documents and maintaining real-time databases of the state of the equipment during various stages of the transportation process are of primary importance [1 – 4].

In various countries around the world, the current research focuses on the reliable automation of railway systems and telemechanics, the development of automatic control systems, and the modernization of technical documentation management. The priorities of this research include: developing formal methods aimed at designing, testing, analyzing, and validating electronic documents, particularly through testing; developing QR-based identification modules and devices, ensuring accurate identification of objects and components [5 – 7].

Methods of detailed investigation and analysis of technical documentation's electronic document management. The electronic model of technical documentation has served as the foundation for the development of a graph-based model of electronic document management for technical documents pertaining to devices. In the realm of automation and telemechanics devices, the accounting and control process has also been officially modeled [8 – 11].

A collection of specific algorithms was included in the formalized scheme

$$A_g, g = \overline{1, G}, \quad (1)$$

of the process. Algorithms $A_g, g = \overline{1, G}$ are synthesized based on an analysis of the state of existing modern electronic document management technologies.

Algorithms are assigned numbers in accordance with the sequence of execution $A_g, g = \overline{1, G}$.

Given the characteristics of the participants in the process, the algorithms are given indices A_g, g .

Micro-commands of technical documentation algorithms in the railway automation and telemechanics system. Each microinstruction is assessed in light of the machine's current internal state when building a logical scheme (LS) microcircuit. The reactions that take place determine the LS's degree of complexity. It is assumed that the LS operates according to a single logical scheme of algorithms (LSA). Over the course of the LSA, the LS signal is regarded as either constant or changing exclusively in line with the operators specified in the LSA.

Below are some principles for micro-instructions.

Definition 1. Incompatibility between Y_i and Y_j exists when Y_i is a logical state, whereas Y_j is an operator, and the logical position of the associated conditions of Y_j prohibits the integration of Y_i and Y_j in the same sector of the LSA.

Definition 2. A branch is defined as a sequence of LSA components obtained through a series of transitions. The $i+1$ th component is the successor of the i th component. Since a component can belong to more than one branch, the compatibility of a set of components is determined by the absence of contradictions in each branch obtained by aggregating the components of the given set.

Next, the procedure for developing LSA A71 micro-commands will be covered:

$$\begin{aligned}
 A7 &= V_0 V_{711} V_{712} V_{713} V_{714} \downarrow^{717} V_{715} V_{716}; \\
 &V_{717} \downarrow^{715} V_{718}; \\
 &\alpha_{711} \uparrow^{711} V_{7110} V_{7111}; \\
 &\downarrow^{716} \overline{\alpha_{712}} \uparrow^{712} \downarrow^{711} V_{719} \omega \uparrow^{715} \times \downarrow^{714} V_{7115} \alpha_{713} \uparrow^{713}; \\
 &V_{7116} \alpha_{714} \uparrow^{714} V_{7117} \omega \uparrow^{716}; \\
 &\downarrow^{713} V_{7118} \omega \uparrow^{717} \downarrow^{712} V_{7112} V_{7113} V_{7114} V_k.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Table 1 – Shows the concurrent execution of LSA A71 operators

V_1	X																		
V_2	X	X																	
V_3	X	X	X																
V_4	X	X	X	X															
V_5	X	X	X	X	X														
V_6	X	X	X	X	X	X													
V_7	X	X	X	X	X	X	X												
V_8	X	X	X	X	X	X	X	X											
V_9	X	V	V	V	V	V	V	V	V										
V_{10}	X	V	V	V	V	V	V	V	V	V									
V_{11}	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X								
V_{12}	X	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V							
V_{13}	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X						
V_{14}	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					
V_{15}	X	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V				
V_{16}	X	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V			
V_{17}	X	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V		
V_{18}	X	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	
V_k	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V
V_0	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7	V_8	V_9	V_{10}	V_{11}	V_{12}	V_{13}	V_{14}	V_{15}	V_{16}	V_{17}	V_{18}	

Table 1 provides information regarding the likelihood of operators being executed simultaneously. If the operations V_p and V_q may be executed concurrently in any of the possible LSA values, a sign is inserted in V in the cell of table 1 where the column V_p and V_q lines overlap; if not, an X is placed.

Let's assign shifts according to the following distribution:

$$V_0 - \{\alpha_{711}\}. \quad (3)$$

Definition 3. A combined LSA group is created by joining the components of an immediate consecutive group. Building the biggest suitable groups of LSA A71 parts. Let us denote by V_0 the element that succeeds it immediately to the right.

$$V_0 \rightarrow [\alpha_{711}]. \quad (4)$$

At the prior element V_0 , with α_{711} given in brackets, there is a distinct branch due to the association with the distribution of operator shifts for V_0 . Note that V_0 has one successor, and hence group M_{V_0} contains the single operator V_0 [5].

$$M_{V_0} = \{V_0 \rightarrow [\alpha_{711}]\}. \quad (5)$$

Creating the most optimal groups. In this case, the arrow from α_{qg} to $\left| \begin{array}{c} \rightarrow \\ \leftarrow \end{array} \right.$ shows that $\alpha_{qg} = 1$ is located $\left| \begin{array}{c} \rightarrow \\ \leftarrow \end{array} \right.$ below $\alpha_{qg} = 0$.

$$M_{V_0} = \{V_0 \rightarrow V_{711} \rightarrow V_{712} \rightarrow V_{713} \rightarrow V_{714} \rightarrow V_{715} \rightarrow V_{716} \rightarrow V_{717} \rightarrow V_{718} \rightarrow [\alpha_{711}]\};$$

$$M_{\alpha_{711}} = \left\{ \begin{array}{c} \alpha_{711} \left| \begin{array}{c} \&^{-}V_{7110} \rightarrow V_{7111} \rightarrow \alpha_{712} - \\ \&^{-}V_{7112} \rightarrow V_{7113} \rightarrow V_{7114} \rightarrow V_k \\ \&^{-}[V_{719}] \end{array} \right. \begin{array}{c} \&^{-}[V_{719}] \\ \&^{-}[V_{719}] \end{array} \end{array} \right\};$$

$$M_{V_{719}} = \{V_{719} \rightarrow \omega^{715} \rightarrow V_{718} \rightarrow [\alpha_{711}]\};$$

$$M_{\alpha_{713}} = \left\{ \begin{array}{c} V_{7115} \rightarrow \alpha_{713} \left| \begin{array}{c} \&^{-}V_{7116} \rightarrow [\alpha_{714}] \\ \rightarrow [V_{7118}] \end{array} \right. \end{array} \right\}; \quad (6)$$

$$M_{\alpha_{714}} = \left\{ \begin{array}{c} \alpha_{714} \left| \begin{array}{c} \&^{-}V_{7117} \rightarrow \omega^{716} \rightarrow \alpha_{712} - \\ \&^{-}V_{7112} \rightarrow V_{7113} \rightarrow V_{7114} \rightarrow V_k \\ \rightarrow V_{7115} \rightarrow [\alpha_{713}] \end{array} \right. \begin{array}{c} \&^{-}[V_{719}] \\ \&^{-}[V_{719}] \end{array} \end{array} \right\};$$

$$M_{V_{7118}} = \{V_{7118} \rightarrow \omega^{717} \rightarrow V_{715} \rightarrow V_{716} \rightarrow V_{717} \rightarrow V_{718} \rightarrow [\alpha_{711}]\}.$$

Consequently, six compatible groups were formed based on maximally matching elements from the LSA. The comparison was based on the maximal micro-command reference since it reflects the internal state of the LS. The left Figure 1 architecture for the LS indicates that there are repeated micro-commands due to the use of similar elements in the LSA for various micro-commands.

Definition 4. The selected micro-instruction system used in the creation of the extended LSA is equivalent to the extended LSA in the operators and conditions it contains, including the total count.

The extended LSA is transformed into the following format to guarantee a smooth transition from the algorithmic description to a workable control specification. The entire system of micro-instructions mentioned in (5) can be extracted and put together using this transformation as the foundation.

$$U^{A71} = V_0 V_{711} V_{712} V_{713} V_{714} V_{715} V_{716} V_{717} V_{718} \downarrow^{715} \downarrow^{717} \alpha_{711} \uparrow^{711} V_{7110} V_{7111} \downarrow^{716} \overline{\alpha_{712}} \uparrow^{712} \downarrow^{711} V_{719} V_{718} \omega \uparrow^{715} V_{7115} \downarrow^{714} \alpha_{713} \uparrow^{713} V_{7116} \alpha_{714} \uparrow^{714} V_{7117} \omega \uparrow^{716} \downarrow^{714} V_{7115} \omega \uparrow^{714} \downarrow^{713} V_{7118} V_{715} V_{716} V_{717} V_{718} \omega \uparrow^{717} \downarrow^{712} V_{7112} V_{7113} V_{7114} V_k. \quad (7)$$

Compared to the original LSA's 18 elements, this expanded LSA has 24 (2).

Definition 5. The LS circuit is synthesized from a set of micro-commands. Each LS realization is associated with a particular LSA U^{Alg} , but a number of different LS realizations can be described by one and the same LSA.

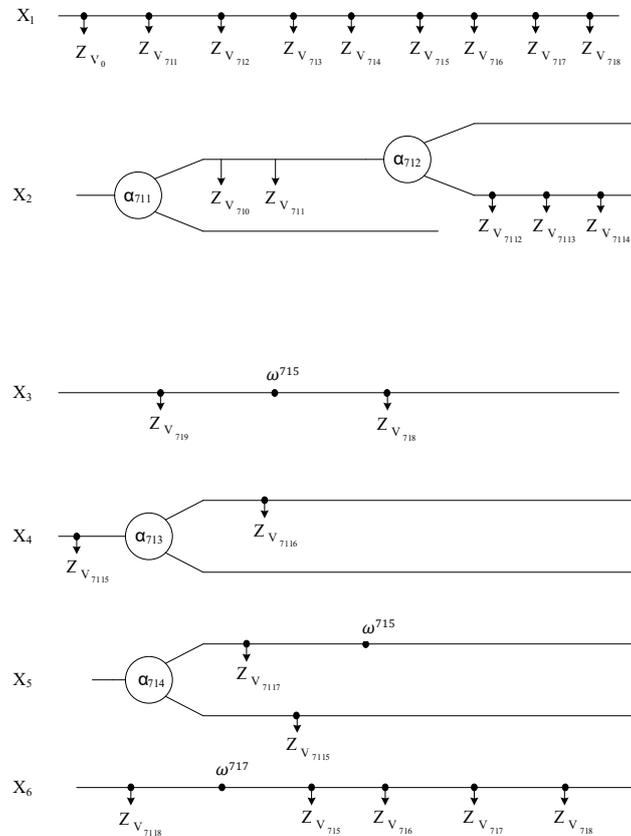


Figure 1 – The logical algorithm scheme (LSA) model's functional block diagram for A71

Implementation of these changes allows us to obtain a sequence of micro-commands. In other words, by changing the system of micro-instruction obtained from equation (6), particular elements of micro-instruction are reiteratively presented. Consequently, capable of obtaining a collection of micro-commands:

$$\begin{aligned}
 M_{V_0} &= \{V_0 \rightarrow V_{711} \rightarrow V_{712} \rightarrow V_{713} \rightarrow V_{714} \rightarrow \downarrow^3 V_{715} \rightarrow V_{716} \rightarrow V_{717} \rightarrow \downarrow^1 V_{718} \rightarrow [\alpha_{711}] \}; \\
 M_{\alpha_{711}} &= \left\{ \alpha_{711} \left| \begin{array}{l} \&^{\neg} V_{7110} \rightarrow V_{7111} \rightarrow [\alpha_{712}] \\ \&_{-}[V_{719}] \end{array} \right. \right\}; \\
 M_{\alpha_{712}} &= \left\{ \alpha_{712} \left| \begin{array}{l} \&^{\neg}[V_{719}] \\ \&_{-} V_{7112} \rightarrow V_{7113} \rightarrow V_{7114} \rightarrow V_k \end{array} \right. \right\}; \\
 M_{V_{719}} &= \{V_{719} \rightarrow 1\}; \\
 M_{\alpha_{713}} &= \left\{ \downarrow^2 V_{7115} \rightarrow \alpha_{713} \left| \begin{array}{l} \&^{\neg} V_{7116} \rightarrow [\alpha_{714}] \\ \rightarrow [V_{7118}] \end{array} \right. \right\}; \\
 M_{\alpha_{714}} &= \left\{ \alpha_{714} \left| \begin{array}{l} \&^{\neg} V_{7117} \rightarrow [\alpha_{712}] \\ \rightarrow 2 \end{array} \right. \right\}; \\
 M_{V_{7118}} &= \{V_{7118} \rightarrow 3 \}.
 \end{aligned} \tag{8}$$

In the same way as the LSA notation, numbered arrows are introduced to refer to the same parts of the fragments within the micro-instructions. The procedure for the micro-command is used to create the LS diagram shown in Figure 2. The states of the automaton can be represented as follows:

$$x_1 = 000, x_2 = 001, x_3 = 010, x_4 = 011, x_5 = 101, x_6 = 110.$$

Since the micro-operation $Z_{V_{718}}$ has three different micro-instructions, its occurrence means the machine may be in the first, third, or sixth internal state.

At the current stage, the largest compatible group of LSA elements has been mapped to a single microinstruction. In expression (7), a refined microinstruction system can be derived by isolating the shared elements of the maximal compatible groups and assigning them to a separate microinstruction.

Applying this microinstruction structure leads to a reduction in the complexity of the combinational part of the logical structure. Future micro-command generation will be based on the largest possible groupings of mutually compatible LSA elements to ensure maximal functional efficiency.

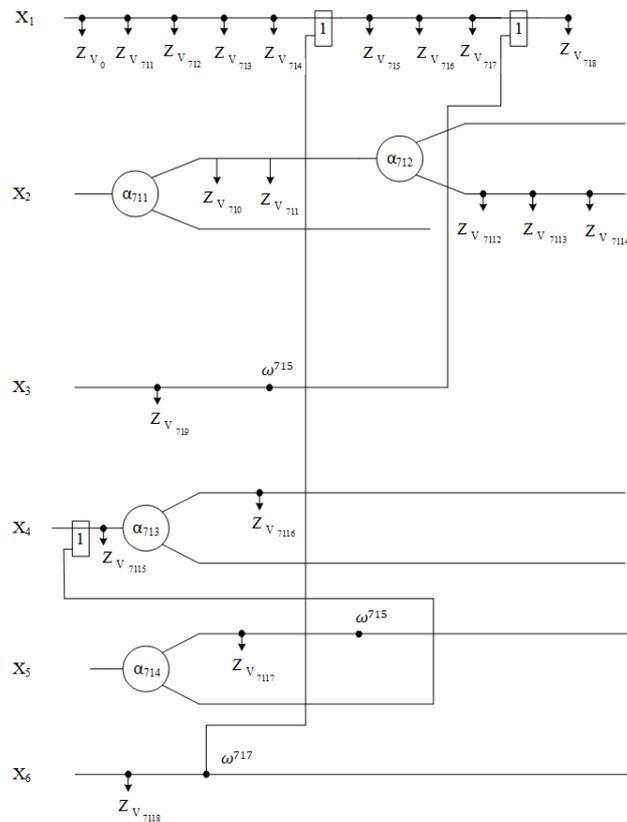


Figure 2 – Shows a logical scheme circuit composed of identical functional blocks that correspond to the LSA-A71 microinstructions

$$M_{V_0} = \{V_0 \rightarrow V_{711} \rightarrow V_{712} \rightarrow V_{713} \rightarrow V_{714} \rightarrow V_{715} \rightarrow V_{716} \rightarrow V_{717} \rightarrow V_{718} \rightarrow [\alpha_{711}] \};$$

$$M_{\alpha_{711}} = \left\{ \alpha_{711} \left| \begin{array}{l} \&^{\rightarrow} V_{7110} \rightarrow V_{7111} \rightarrow [\alpha_{712}] \\ \&_{\rightarrow} [V_{719}] \end{array} \right. \right\};$$

$$M_{\alpha_{712}} = \left\{ \alpha_{712} \left| \begin{array}{l} \&^{\rightarrow} [V_{719}] \\ \&_{\rightarrow} V_{7112} \rightarrow V_{7113} \rightarrow V_{7114} \rightarrow V_k \end{array} \right. \right\};$$

$$M_{V_{719}} = \{V_{719} \rightarrow [V_{718}] \};$$

$$M_{\alpha_{713}} = \left\{ \alpha_{713} \left| \begin{array}{l} \&^{\rightarrow} V_{7116} \rightarrow [\alpha_{714}] \\ \rightarrow [V_{7118}] \end{array} \right. \right\};$$

$$M_{\alpha_{714}} = \left\{ \alpha_{714} \left| \begin{array}{l} \&^{\rightarrow} V_{7117} \rightarrow [\alpha_{712}] \\ \rightarrow V_{7115} \rightarrow [\alpha_{713}] \end{array} \right. \right\};$$

$$M_{V_{718}} = \{V_{718} \rightarrow [V_{715}] \};$$

$$M_{V_{715}} = \{V_{715} \rightarrow V_{716} \rightarrow V_{717} \rightarrow V_{718} \rightarrow \};$$

$$M_{V_{718}} = \{V_{718} \rightarrow [\alpha_{711}] \}.$$

(9)

Although the resulting micro-commands in this case are relatively large, they are characterized by the simultaneous execution of all operations within a single micro-cycle. The approach to creating maximal groups of compatible LSA elements that is currently being considered makes this feasible.

The proposed block diagram of the formalized model of technical documentation incorporates matrix representations of external micro-operations, internal micro-operations, and the mechanisms for generating the code of the next microinstruction. The logical structure scheme can be optimized by executing internal and external micro-operations concurrently. In this model, the total number of LS microinstructions is defined by the count of simultaneously executed micro-operation groups, rather than by the total number of LSA elements.

Conclusion. In the context of railway automation and telemechanics systems, this work develops a rigorous formal framework that integrates device-level computation and control functions with electronic document workflows. By methodically mapping the steps of the document lifecycle – creation, storage, version updating, and exchange – onto control algorithms, it guarantees traceable, rule-governed coordination between operational control procedures and documentation processes.

In the framework, the simplicity of algorithmic technical documents is ensured by minimizing the number of cases in the logical schemes, and the algorithms of electronic circuits are formulated in the matrix form. All approaches were derived from a formalized model designed for the analysis, synthesis, and evaluation of electronic technical document workflows. Additionally, a graphical model representing the electronic circulation of technical documents was synthesized.

A synthesis of the model's hierarchical structure has been made. This structure uses a specific operational alphabet to define low-level matrices, while algorithmic processes are used to represent high-level matrix operators. In order to facilitate the operational study of the circulation of electronic technical documents, the hierarchy is built upon an abstract final automaton. According to this approach, the matrices related to internal and external microoperations, as well as the matrix that generates the next micro-instruction code, are analyzed.

Список литературы / References

1. Mökander, J., Axente, M., Casolari, F., & Floridi, L. (2022). Conformity assessments and post-market monitoring: a guide to the role of auditing in the proposed European AI regulation. *Minds and Machines*, 32(2), 241-268. <https://doi.org/10.1007/s11023-021-09577-4>.
2. Baratov, D., Aripov, N., Muxiddinov, O., & Jumanov, X. (2020, August). Block diagram of the automatic model of technical documentation. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1614, No. 1, p. 012032). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1614/1/012032>.
3. Ayaz, A., & Yanartaş, M. (2020). An analysis on the unified theory of acceptance and use of technology theory (UTAUT): Acceptance of electronic document management system (EDMS). *Computers in Human Behavior Reports*, 2, 100032. <https://doi.org/10.1016/j.chbr.2020.100032>.
4. Read, G. J., Naweed, A., & Salmon, P. M. (2019). Complexity on the rails: A systems-based approach to understanding safety management in rail transport. *Reliability Engineering & System Safety*, 188, 352-365. <https://doi.org/10.1016/j.res.2019.03.038>.
5. Baratov D., Aripov N. Structural scheme of the formal model of electronic document turnover of technical documentation. *Transport Shëlkovogo puti – Transport of the Silk Road*, 2019, no. 1-2, pp. 63-73. (In Russian).
6. Tretyakova, T., Barakhsanova, E., Alexeeva, T., & Bogushevich, I. (2021, November). Provision and management of educational activities in the conditions of distance education at the North-Eastern Federal University. In *XIV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2021" Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry, Volume 2* (pp. 869-880). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80946-1_79.
7. Baratov, D. K., Aripov, N. M., & Ruziev, D. K. (2019, September). Formalized methods of analysis and synthesis of electronic document management of technical documentation. In *2019 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)* (pp. 1-9). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EWDTS.2019.8884415>.

8. Baratov, D., & Astanaliev, E. (2023). Improvement of the scientific bases of creating means of automation of documentation of devices of railway automation and telemechanics. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 402, p. 06005). EDP Sciences.

9. Śnieżyński, B., Szymacha, R., & Michalski, R. S. (2005). Knowledge visualization using optimized general logic diagrams. In *Intelligent Information Processing and Web Mining: Proceedings of the International IIS: IIPWM'05 Conference held in Gdansk, Poland, June 13–16, 2005* (pp. 137-145). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-32392-9_15.

10. Baratov, D. (2022). Control technology of technical documentation of automation and telemechanics on transport. *Transportation Research Procedia*, 63, 214-222. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.007>.

11. Baratov, D., & Astanaliev, E. (2021). Developing a new monitoring mechanism of electronic document management of technical documentation for railway automation. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 264, p. 05018). EDP Sciences.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Астаналиев Элмурод Турсунали угли

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

Темирийўлчилар ул., д. 1, г. Ташкент, 100060, Республика Узбекистан.

Докторант кафедры «Автоматика и телемеханика», ТГТрУ.

Тел.: +998 (99) 408-41-97.

E-mail: edward.elmurod1246@mail.ru

Баратов Дилшод Хамидуллаевич

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

Темирийўлчилар ул., д. 1, г. Ташкент, 100060, Республика Узбекистан.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика», ТГТрУ.

Тел.: +998 (90) 919-50-99.

E-mail: baratovdx@yandex.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Astanaliev Elmurod Tursunali ugli

Tashkent State of Transport Universitet (TSTU).

1st House of Temiryulchilar street of Tashkent City, 100060, Republic of Uzbekistan.

Doctoral student of the department «Automation and remote control», TSTU.

Phone: +998 (99) 408-41-97.

E-mail: edward.elmurod1246@mail.ru

Baratov Dilshod Khamidullaevich

Tashkent State Transport University (TSTU).

1st House of Temiryulchilar street of Tashkent City, 100060, Republic of Uzbekistan.

Doctor of Sciences in Engineering, professor of the department «Automation and remote control», TSTU.

Phone: +998 (90) 919-50-99.

E-mail: baratovdx@yandex.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Астаналиев, Э. Т. Разработка микрокоманд по логическим схемам алгоритмической технической документации в железнодорожной автоматике / Э. Т. Астаналиев, Д. Х. Баратов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 4 (64). – С. 93 – 100.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Astanaliev E.T., Baratov D.Kh. Development of micro-commands according to logical schemes of algorithmic technical documentation in railway automation. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 4 (64), pp. 93-100. (In Russian).

УДК 629.47

И. И. Лакин

АО «Инжиниринговый центр железнодорожного транспорта» (АО «ИЦ ЖТ»), г. Москва, Российская Федерация

ГАРМОНИЗАЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ ОБСЛУЖИВАНИЕМ И РЕМОНТОМ ЛОКОМОТИВОВ СО СТАНДАРТАМИ ЕВРОСОЮЗА

Аннотация. Предметом статьи является система технического обслуживания и ремонта (ТОиР) отечественных локомотивов в сравнении с требованиями европейских стандартов с целью гармонизации отечественного ТОиР с международными требованиями. В ОАО «РЖД» (РЖД) создана комплексная автоматизированная система управления (АСУ), включая системы мониторинга и управления надежностью локомотивов. АСУ технического обслуживания и ремонта тягового подвижного состава создаются на стороне

сервисных компаний. В ТМХ разработана АСУ сервисным ТООР тягового подвижного состава, которая обеспечивает учет выполненных цикловых и сверхцикловых работ, израсходованные материалы, выполненный монтаж и демонтаж оборудования. Создан электронный паспорт локомотива. Дополнительно создана АСУ управления надежностью локомотивов, в которой базовыми являются процессы управления инцидентами и отказами, а также управления проблемами. АСУ ТООР ТМХ можно считать уникальной разработкой по своей функциональности и охвату. Ведется работа по интеграции АСУ РЖД и АСУ сервисных компаний. Одновременно в Европейском союзе (ЕС) последние десятилетия активно ведется работа по гармонизации национальных стандартов с межгосударственными. Поэтапно создается единое техническое, экономическое и юридическое пространство. Разработана серия стандартов для управления железнодорожным транспортом, подвижным составом и его обслуживанием. Стандарты обобщают накопленный опыт и содержат ряд положений, которые полезны и для российских железных дорог, их тягового подвижного состава и организации ТООР. Выполнен анализ стандартов ЕС с позиций повышения качества обслуживания отечественных локомотивов, который показал, что в целом технологические подходы на отечественном транспорте соответствуют требованиям европейских стандартов. Но есть принципиальные отличия – отсутствие конкурентной среды и прозрачности информации. Необходимо исправить эти недостатки, что позволит существенно увеличить интеллектуальный потенциал отечественного инжиниринга. Полученные результаты целесообразно учесть при организации отечественного ТООР.

Ключевые слова: тяговый подвижной состав, ремонт и обслуживание, стандарты, гармонизация.

Igor I. Lakin

JSC "Railway Transport Engineering Center" (JSC "IC ZhT"), Moscow, the Russian Federation

REPAIR AUTOMATED CONTROL SYSTEMS & EU STANDARDS HARMONIZATION

Abstract. The article subject is the maintenance and repair system (MRO) of domestic locomotives in comparison with the European standards requirements in order to harmonize domestic MRO with international requirements. Russian Railways has created an integrated automated control system (ACS), including monitoring and reliability management systems for locomotives. Automated control systems for maintenance and repair of traction rolling stock are created on the service side of locomotive construction. TMH has developed automated control systems for maintenance and repair of traction rolling stock automated control systems for MRO. This system provides accounting for completed cyclic and super-cyclic work, consumed materials, completed installation and dismantling of equipment. An electronic passport of the locomotive has been created. Additionally, an automated control system for locomotive reliability has been created, in which the basic processes are incident and failure management, as well as problem management. The MRO TMX automated control system can be considered a unique development in terms of its functionality and scope. Work is underway to integrate the automated control systems of Russian Railways and automated control systems of service companies. At the same time, the European Union (EU) has been actively working over the past decades to harmonize national standards with interstate ones. A unified technical, economic and legal space is being created gradually. A series of standards has been developed for the management of railway transport, rolling stock and its maintenance. The standards summarize the accumulated experience and contain a number of provisions that could be useful for Russian railways, their traction rolling stock and maintenance organization. The EU standards analysis from the standpoint of improving the quality of domestic locomotives service has been carried out. The analysis showed that, in general, technological approaches in domestic transport comply with the requirements of European standards. But there are fundamental differences – the lack of a competitive environment and transparency of information. It is necessary to correct these shortcomings, which will significantly increase the intellectual potential of engineering. It is advisable to take the results obtained into account when organizing the domestic locomotives MRO.

Keywords: traction rolling stock, repair and maintenance, standards, harmonization.

Современный этап развития систем управления часто называют цифровой трансформацией, имея в виду повсеместное внедрение ИТ-систем, в т. ч. автоматизированных систем управления (АСУ), объединяющих в себе отдельные микропроцессорные системы управления, другие АСУ, входящие в состав более большой АСУ или обменивающиеся с ней информацией по принципам интероперабельности. В рамках четвертой промышленной революции (Индустрия 4.0) чаще говорят о создании киберфизических производственных систем (Cyber Physical Production Systems – CPPS) [1].

В ОАО «Российские железные дороги» (РЖД) создана комплексная автоматизированная CPPS-система управления (АСУ) – АСУЖТ [2], включая системы мониторинга и управления надежностью локомотивов: ГИД «Урал» (регистрация отказов перевозочного процесса),

КАСАНТ и КАСАТ (системы управления надежностью технических средств РЖД, включая локомотивы), АСОУП и АСУТ (мониторинг работы локомотивов, эксплуатируемого и неэксплуатируемого парка). АСУ ТОиР создаются на стороне сервисных локомотивостроительных компаний – групп компаний «Трансмашхолдинг» (ТМХ) и «Синара – Транспортные машины» (СТМ), во взаимодействии с АСУЖТ.

В ТМХ на платформе 1С разработана АСУ сервисным ТОиР – прежде всего локомотивов (АСУ ТОиР «Сетевой график») [3]. Эта уникальная система обеспечивает учет выполненных цикловых и сверхцикловых работ, израсходованных материалов, выполненный монтаж и демонтаж линейного оборудования, для чего создан электронный паспорт локомотива. Дополнительно создана АСУ управления надежностью локомотивов (АСУНТ), в которой базовыми являются процессы управления инцидентами и отказами на базе автоматизированных рабочих мест (АРМов) АРМ-И и АРМ ИБД, а также управления проблемами на базе АРМ ДК. АСУ ТОиР ТМХ можно считать уникальной разработкой по своей функциональности и охвату. Идет работа по CPPS-интеграции сервисных АСУ ТОиР и АСУЖТ, в т. ч. по электронному паспорту локомотива (АС ЭП) и КАСАНТ [1, 3, 4].

Параллельно в Европейском союзе (ЕС) последние десятилетия активно ведется работа по гармонизации национальных стандартов с межгосударственными [5 – 10]. Поэтапно создается единое техническое, экономическое и юридическое пространство. Разработана серия стандартов и для управления железнодорожным (далее – ж. д.) транспортом, подвижным составом и его ТОиР. Стандарты обобщают накопленный опыт и содержат ряд положений, которые могли бы быть полезны и для российских железных дорог, их тягового подвижного состава и организации ТОиР. Выполнен анализ стандартов ЕС с позиций повышения качества ТОиР отечественных локомотивов. Предлагается гармонизировать АСУЖТ, АСУ ТОиР, АСУ ДККЭПС и АСУНТ с основными положениями стандартов ЕС.

Отечественная АСУ ТОиР. В 2014 г. РЖД перешло на договорную сервисную форму обслуживания локомотивов, при которой на территории ремонтных локомотивных депо (принадлежат РЖД) созданы сервисные локомотивные депо (СЛД), входящие в состав компаний СТМ-Сервис, ТМХ-Сервис и др. За более чем 11 лет сложилось информационное автоматизированное взаимодействие в процессе выполнения ТОиР [3, 4]. Взаимодействие подсистем строится как интероперабельное по принципам CPPS [1, 2] (рисунок 1). Источником информации о нарушении перевозочного процесса являются Дорожные центры управления перевозками (ДЦУП), где поездной диспетчер в АСУ «ГИД Урал» на «нитке графика» соответствующего поезда делает отметку об отказе. Информация автоматически передается в систему управления надежностью технических средств РЖД «КАСАНТ», в которой и производится расследование причин отказа с определением ответственной стороны. Вторым автоматизированным источником информации о работе и ТОиР локомотивов является автоматизированная система управления перевозками АСОУП, в которой регистрируется пробег локомотивов, их тонно-километровая работа, текущее местоположение и статус: в голове поезда, подталкивание, ожидание работы, ожидание планового или непланового ремонта, ремонт, пересылка и др. – всего более 100 статусов. Данные АСОУП доступны сервисным компаниям через АСУ локомотивного хозяйства РЖД – АСУТ, на базе которой создан ряд отчетов, в т. ч. формы ТУ-32 о простое локомотивов в неэксплуатируемом парке.

Для управления жизненным циклом локомотивов и их оборудования в ПКБ ЦТ создана АСУ «Электронный паспорт локомотивов» (АС ЭП), в которой хранятся паспортные данные основных узлов локомотивов («линейного оборудования»), а также история их монтажа, демонтажа, ремонтов и выполненная работа (миллионов километров пробега). Информация АС ЭП используется в АСУ финансами и ресурсами РЖД – ЕК АСУФР. Заводы-изготовители, локомотиворемонтные заводы и депо вводят информацию через АРМ Паспортиста, который заменяют на интероперабельный обмен информацией по принципу АСУ – АСУ.

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

Сервисные компании со своей стороны создают АСУ ТОиР по принципам ERP- и MES-систем, как правило, на платформе 1С. Решается задача автоматизированного взаимодействия с АСУ РЖД (АСУЖТ) [2, 3]. В систему входят как «классические» задачи планирования, управления бухгалтерией, кадрами, складом, другими ресурсами, так и специфические управления технологическими процессами ТОиР, мониторинга отказов и простоя на ТОиР, разбора причин отказов и перепростоев. Как правило, имеется подсистема управления проблемами: выявление системных отказов и причин их возникновения, разработка технических решений и их реализация с контролем эффективности мероприятий.

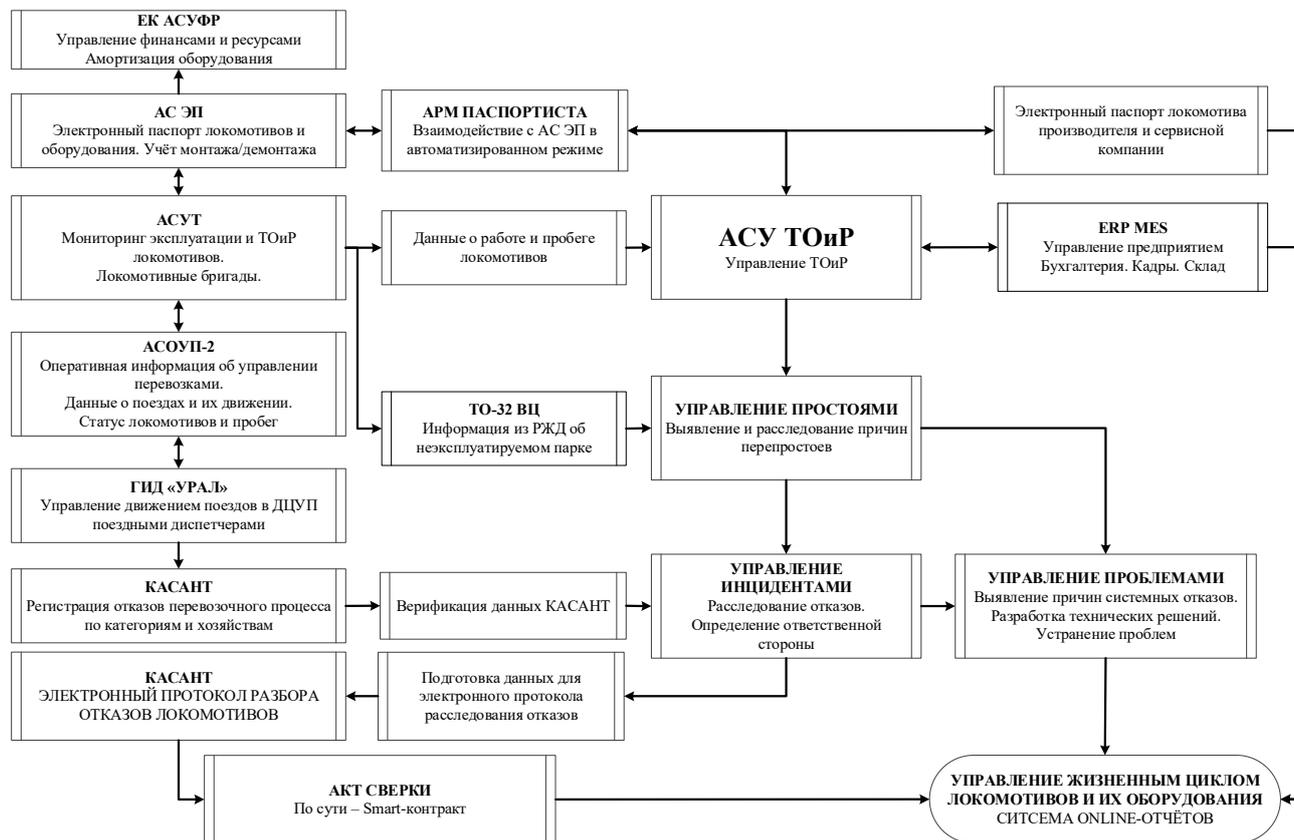


Рисунок 1 – Принципиальная схема управления ТОиР локомотивов в РЖД

Таким образом, на отечественном железнодорожном транспорте имеются информационные предпосылки создания комплексной автоматизированной системы управления надежностью локомотивов и их жизненным циклом.

Единая европейская железнодорожная зона. Созданный в 1992 г. Европейский союз является экономическим и политическим объединением 27 европейских государств. На основании Договора о функционировании ЕС разработан Регламент Европейского парламента и Совета ЕС (№ 1025/2012 от 25.10.2025) «О европейской стандартизации» [5], носящий экономический и производственный характер. Стандарты разрабатывают Международная организация по стандартизации (ИСО, ISO), Международная электротехническая комиссия (МЭК) и Международный союз электросвязи (МСЭ), Европейский комитет по стандартизации (CEN), Европейский комитет электротехнической стандартизации (CENELEC), Европейский институт стандартизации телекоммуникаций (ETSI) и др.

Большое внимание уделяется гармонизации стандартов – процессу сближения и согласования правовых норм различных государств и систем права [9]. Предусматривается широкое использование информационно-коммуникационных технологий (ИКТ). Для железнодорожного подвижного состава и его системы ТОиР также разработаны нормативные документы, целесообразность применения которых в РЖД будет рассмотрена далее.

Железнодорожный транспорт ЕС – это совокупность его подсистем: инфраструктура, энергоснабжение, путевое управление, контроль и сигнализация, бортовой контрольно-управляющий и сигнализирующий аппарат (все бортовое оборудование, необходимое для обеспечения безопасности, а также управления и контроля движения поездов, допущенных к движению по сети), подвижной состав и его система ТОиР. Железнодорожное предприятие (далее – предприятие) – любое предприятие, связанное с движением поездов.

Директива ЕС 2012/34/ЕС от 21.10.2012 [6] нужна для создания единой европейской железнодорожной зоны с целью повышения ее эффективности, унификации принципов выдачи лицензий предприятиям и координация механизмов регулирования распределения пропускной способности инфраструктуры и взимаемых сборов. Введено понятие «тяжелое техническое обслуживание» как требующее вывода транспортного средства из эксплуатации – это идентично термину «техническое обслуживание и ремонт» (ТОиР).

Важным для ЕС является принцип свободы предоставления услуг с учетом наличия общей инфраструктуры: необходимо обеспечить договорной доступ к ней единообразно, свободно и недискриминированно для всех участников рынка, исключив возможный конфликт интересов с одновременным обеспечением конкуренции. Заключаются трансграничные соглашения с оформлением «имплементационных актов». Доступ к инфраструктуре предоставляется только предприятиям, имеющим единый сертификат безопасности.

Примером обеспечения конкуренции с национальным перевозчиком SNCF Voyageurs может служить создаваемый на юго-западе Франции центр ТОиР электропоездов и локомотивов частного оператора инфраструктуры LISEA высокоскоростной магистрали (ВСМ) Sud Europe Atlantique [11]. Центр может обслуживать подвижной состав всех перевозчиков. В результате на полигоне Тур – Бордо загрузка линии увеличиться с 50 % до 100 %. Центр создается компанией за свои средства в 20 км от Бордо и рассчитан на ТОиР до 40 поездов ВСМ, междугородных и региональных, а также грузовых локомотивов. Выход на железнодорожную инфраструктуру обеспечивает национальный оператор SNCF Réseau. Открытие депо планируется в 2028 г. и начнется с ТОиР 12 двухэтажных поездов ВСМ семейства Avelia Horizon (Alstom), принадлежащих частной компании Proxima (бренд Velvet).

Применительно к отечественным железным дорогам задача создания конкурентной среды предоставления услуг тяги и ТОиР является противоречивой, вызывает много споров и в этой статье не обсуждается. Но концептуально представляется актуальным создание реальной конкурентной среды, в том числе в предоставлении услуг ТОиР: фактическая монополия на производственные помещения, технологическое оборудование и сам ТОиР не способствуют повышению его качества.

ТОиР в системе безопасности движения поездов ЕС. За мониторинг безопасности движения поездов в ЕС отвечает Агентство Европейского союза по железным дорогам (далее – Агентство) согласно Регламенту ЕС 2016/796 от 11.05.2016 [8]. Задачей Агентства является сертификация связанных с перевозками предприятий, мониторинг их деятельности, а также всемерное содействие внедрению Европейской системы управления движением поездов ERTMS (European Rail Traffic Management System) [12] (на базе перспективной Европейской системы управления движением поездов ETCS и GSM-R) для интероперабельности трансъевропейской транспортной сети. Агентство отвечает за внутреннюю безопасность (safety), а не внешнюю (security).

Основополагающий документ по безопасности движения поездов в ЕС – Директива 2016/798 от 11.05.2016 [7] (не касается метро, трамваев и легкорельсового транспорта). Основа управления – выдача Агентством предприятиям сертификатов безопасности. Основными ответственными за управление безопасностью движения являются владельцы инфраструктуры, которые несут ответственность за весь жизненный цикл: проектирование, обслуживание и эксплуатация железных дорог. Сертификация предприятий ЕС основана на формировании базовых документов: техническая спецификация по взаимодействию (TSI), общие цели безопасности (CST), общие методы обеспечения безопасности (CSM).

В РФ владельцами инфраструктуры являются РЖД и дороги (филиалы). В ТОиР главными предприятиями являются частные сервисные компании (СТМ-Сервис, ЛокоТех-Сервис (ЛокоТех) и др.), сами сервисные локомотивные депо, заводы, выполняющие средний и капитальный ремонт подвижного состава (Желдорреммаш (ЖДРМ), Милорем и др.). Сами локомотивные депо и их основные фонды являются собственностью РЖД как представителя государства, что позволяет сохранить управление тяговыми ресурсами, но создает трудности как для создания конкурентной среды, так и для развития ТОиР СЛД.

Большое внимание в ЕС уделяется порядку совместного открытого с участием всех причастных расследования аварий и инцидентов для предотвращения аналогичных событий, что соответствует принципу постоянного улучшения (циклу PDCA Эдварда Деминга) [13]. В ЕС определен классификатор случаев нарушения безопасности движения поездов (событий): несчастный случай, серьезная авария (столкновение и сход со смертельным исходом или травмой, значительным ущербом, авария, пожар и др.), инцидент, события с опасными грузами, самоубийства, предвестники аварий (сломанные рельс, колесная пара, отказ СЦБ и др.), ущерб окружающей среде и инфраструктуре, задержка поездов. В РФ имеется свой классификатор случаев нарушения безопасности движения поездов (событий) [14], но удельные показатели также вычисляются на 1 млн км пробега, в т. ч. интенсивность отказов. В КАСАНТ определены три категории отказов по степени влияния на перевозочный процесс. Для локомотивов определены виды отказов по степени повреждения локомотива.

ТОиР в ЕС полностью отнесен к системе обеспечения безопасности движения поездов, что не совсем так в РЖД. Каждое транспортное средство (подвижной состав (ПС) должно иметь назначенную ему «Организацию, ответственную за ТОиР» (далее – организацию ТОиР), которая регистрируется в реестре транспортных средств и гарантирует безопасное техническое состояние подвижного состава в соответствии с TSI, CST и CSM.

Важным отличием стандартов ЕС в области ТОиР является требование четырех уровней управления, на каждом из которых используются свои принципы построения АСУ.

1. Координация и надзор функций ТОиР: верхний уровень управления предполагает разработку нормативных документов и меньше всего поддается автоматизации. В РФ это уровень правительства и высшего руководства РЖД, заводов-изготовителей и сервисных компаний.

2. Подготовка ТОиР: разработка технической и технологической документации в специальных пакетах программ САПР. В ТМХ, например, для этих целей используется пакет программ IPS в сочетании с САПР «Компас». Пакеты программ являются общепромышленными и используются не только на железнодорожном транспорте.

3. Управление ТОиР: постановка на ТОиР и выпуск с ТОиР – это уже достаточно специализированное программное обеспечение, хотя в его основе по-прежнему универсальные ERP- и MES-системы. В ЕС – это пакет программ MS Dynamics, в РЖД – SAP R/3, в сервисных компаниях – пакет 1С. Для управления пробегами подвижного состава, планирования постановки на ремонт и других логистических функций в ЕС используется пакет программ BOOM, в РЖД – пакеты программ АСОУП, АСУТ и др. Сервисные компании создают свое обеспечение на базе пакета программ 1С.

4. Предоставление услуг ТОиР, включая документирование – это самые специализированные пакеты программ, включающие в себя программы бортового и деповского диагностирования, управления технологическим оборудованием депо, ведение технологической документации.

Таким образом, для управления ТОиР в ЕС создается многоуровневая АСУ. Далее рассмотрен самый специализированный уровень – четвертый.

Требования к подвижному составу. Конструкция подвижного состава в стандартах ЕС разделяется на кузов, систему управления и контроля для всего оборудования поезда, силовые электрические аппараты, тяговые и энергетические преобразователи, бортовое оборудование для измерения и зарядки электроэнергии, тормозную систему, сцепку и ходовую часть

(тележки, оси и т. д.), подвеску, двери, человеко-машинные интерфейсы (машинист и бортовой персонал), пассивные или активные устройства безопасности и охраны здоровья пассажиров и бортового персонала. Согласно другому европейскому стандарту MS ZEN 15380-2 имеется другая классификация: кузов, оснащение и монтаж, экипажная часть, привод, аппаратура управления, вспомогательное силовое оборудование, приборы безопасности, освещение, кондиционирование, дополнительное оборудование, входные двери, средства информирования, пневматическое и гидравлическое оборудование, тормоза, устройства для навески, несущие системы и корпуса, электропроводка.

На отечественном транспорте нет единого классификатора оборудования подвижного состава, но в КАСАНТ принят трехуровневый классификатор оборудования локомотивов, первый уровень которого состоит из девяти элементов: дизель и дизельное оборудование, электрооборудование силовой цепи, вспомогательных цепей и цепей управления, экипажная часть и механическое оборудование, системы автоматического управления режимами тяги и торможения, электронное оборудование, устройства безопасности и радиосвязь, Вспомогательные электрические машины, тяговые электрические машины, тормозное и пневматическое оборудование, система вентиляции. Всего классификатор содержит 20 тысяч позиций. Различия в классификаторах оборудования могут создать трудности как при формировании единого подхода и программного обеспечения (в ЕС де факто принято единое программное обеспечение BOOM).

Область использования ПС в ЕС разделено на специально построенные ВСМ (более 250 км/ч), специально модернизированные (более 200 км/ч), соединительные, обычные, обычные для смешанного движения, пассажирские и грузовые узлы. В РЖД по скорости поезда выделяют высокоскоростные (более 200 км/ч), скоростные (маршрутная скорость 91 – 200 км/ч), скорые (50 – 91 км/ч), пассажирские (50 км/ч). В компании СТМ строится высокоскоростной электропоезд (до 400 км/ч). Имеются пассажирские локомотивы, рассчитанные на скорость до 200 км/ч, но чаще – до 160 км/ч. Грузовые локомотивы рассчитаны на скорость 120 км/ч, хотя реально она не превышает 90 км/ч. Единственная в РФ линия Санкт-Петербург – Москва рассчитана на скорость до 250 км/ч. Вновь строящаяся линия ВСМ позволит достигать скорости до 360 км/ч. Разница в классификаторах может затруднить продвижение отечественного ПС за рубежом.

ПС допускается к эксплуатации после получения разрешения на размещение, выданного Агентством с присвоением уникального номера (EVN) в европейском реестре транспортных средств. В случаях обновления или модернизации ПС, расширения области использования требуется новое разрешение. Допускается получение разрешения как на серию, так и на группу однотипных серий. В РЖД имеется аналогичная система, определенная в ГОСТ 15.902–2014 «Порядок разработки и постановки на производство железнодорожного подвижного состава». Главное отличие этой системы – отсутствие должного внимания системе ТОиР.

Требования к функциональности ТОиР. Производитель ПС в ЕС при проектировании определяет критичность функций и компонентов ПС через анализ рисков. Организация ТОиР уточняет риски по статистике эксплуатации и ТОиР и готовит предложения производителю. В результате появляются инструкции по ТОиР. Вся информация ТОиР, в т.ч. случаи выхода за рамки износа, фиксируется в АСУ Агентства «Safety Alert IT» [15]. Регламент ЕС 2019/779 от 16.05.2025 [10] устанавливает подробные положения о единой системе сертификации организаций ТОиР, приведены требования и критерии оценки. Следует отметить, что в ЕС уделяется большее внимание ТОиР как ключевому элементу безопасности движения поездов.

Система постоянного улучшения – первое и подробно описанное требование к системе ТОиР ЕС. По сути это цикл PDCA (Plan, Do, Check, Act) Эдварда Деминга [13]: необходимо наличие мониторинга всех параметров ТОиР и надежности ПС, внутреннего аудита с дальнейшей разработкой мероприятий по совершенствованию системы ТОиР и самого ПС с целью повышения надежности и, как следствие, безопасности. Этот принцип проходит

красной линией через все стандарты менеджмента качества – ISO 9000, ISO 9001, ISO 9004, IRIS (ISO 22163:2017), RAMS и др. – и является обязательным и в РЖД: например, при допуске подрядчиков к конкурсным процедурам. Однако следует отметить, что реальное исполнение требований систем менеджмента качества (СМК) нуждается в совершенствовании. Автоматизация мониторинга показателей качества, надежности и безопасности с ликвидацией субъективного фактора, наглядный контроль трендов и реальное принятие мер могли бы изменить ситуацию к лучшему. Эдвард Деминг считал цикл PDCA основополагающим – известна его крылатая фраза: «Вы можете не развиваться – выживание не является обязанностью».

Роли. На предприятиях имеется штатное расписание с должностными инструкциями. Роли – это что надо делать в процессе управления качеством ТОиР. Один работник может выполнять несколько ролей, одну роль могут выполнять несколько человек (например, при круглосуточном режиме работы). Разницу между ролями и должностями Э. Деминг в своих 14 принципах управления предприятием сформулировал как «ломайте барьеры». При этом опыт показывает целесообразность записи ролей в должностные инструкции. Необходимость ролей подчеркивается и в технологии Lean Production.

Управление компетенциями. Каждая роль требует соответствующих компетенций, поэтому важны как обучение, учет способностей, личных качеств, так и контроль уровня знаний. В РЖД сертификация работников налажена на ответственных ролях: машинисты, сварщики, диагносты и др. Для контроля знаний необходимо внедрять системы тестирования, что дополняет проверку практических навыков.

Доступность информации. Именно внедрение АСУ, наглядных электронных форм, систем поисковиков, web-сервисов делает выполнимым этот пункт требований. Целостность информации, ее защищенность от неавторизованных и доступность авторизованным пользователям – безопасные принципы построения АСУ: конфиденциальность, целостность, доступность.

Документирование. Все действия ТОиР должны быть последовательно задокументированы, но возникают проблемы с вводом в режиме online исходной информации о выполненных операциях, используемых деталях и материалах (ЗИП), реально затраченном времени и других ресурсах, обнаруженных в процессе работ дефектах и др. Документирование при ТОиР гораздо сложнее, чем на заводах-изготовителях из-за большой вариативности процессов. Обеспечить требования доступности информации, документирования и регистрации всех событий возможно только с внедрением АСУ, в т. ч. с использованием мобильных средств связи (smart-телефонов и др.). Стандарты ЕС требуют регистрации всех объектов ТОиР и работ с ним, используемого технологического оборудования и инструмента, используемых запасных частей и материалов, участников процесса, выполненных измерительных и диагностических операций. Достаточно удачным примером может служить АСУ ТОиР «Сетевой график» сервисной компании ЛокоТех [3]. Следует отметить, что на высоком уровне налажена периодическая поверка средств измерения на базе лабораторий ОАО «РЖД».

Аудит. Отдельно в ЕС предъявляются требования к проведению аудитов. Но при внедрении АСУ «классические» аудиты становятся не так актуальны: при правильно организованном сборе информации в АСУ правильность процесса можно отследить по ее данным. Следует активней использовать видеонаблюдение и промышленное зрение. Вмешательство в процесс нужно только при несоответствии надежности и безопасности установленным нормативам. Как видно из стандартов, в ЕС планируется аудит без учета возможностей АСУ, в т.ч. функций встроенного качества – защит от неправильных действий по принципу «правильно или никак» («пока-ёке»). Аналогичные проблемы есть и в РЖД.

Предусмотрен аудит юридических документов, договорных отношений, управления компетенциями и др. Опыт перехода РЖД в 2014 г. на сервисный ТОиР показал наличие в договорах большого числа ошибок и неточностей, мешавших организовать качественный

ТООР. Постоянная работа над «правилами игры» через заключение дополнительных соглашений по циклу PDCA улучшает ситуацию.

Гарантированная прослеживаемость. Это требование опять касается качества документирования ТООР. По каждому оборудованию должны быть история его монтажа и демонтажа с подвижного состава, зафиксированы выявленные дефекты, затраченные ресурсы на восстановление работоспособности. Должна быть объективная информация о корректирующих мероприятиях и их эффективности. Это опять требования к АСУ. Наличие ИТ-систем в стандартах ЕС уделяется большое внимание, но конкретных требований мало. АСУ в РЖД – одна из сильных сторон компании, в т. ч. создана АСУ «Электронный паспорт локомотива (АС ЭП)», связанная с ЕК АСУФР.

Контрактная деятельность. В ЕС (особенно в Германии) уделяется большое внимание работе с поставщиками продукции, в т. ч. для подвижного состава. Налаженная субподрядная деятельность с качественным документированием, проверкой компетенции и даже хорошей репутации – требование к ТООР. В РЖД работа с субподрядчиками налажена аналогично.

Управление технологией ТООР. В стандартах ЕС разработка технологии ТООР выделена в отдельное направление работ (второе из четырех). Но все по тому же принципу постоянного улучшения: предъявляется требование постоянной обработки статистики с последующим улучшением технологических процессов ТООР. В РЖД аналогичные требования, к сожалению, дали и отрицательный результат: неоправданное упрощение технологии ТООР, увеличение межремонтных пробегов, сокращение объема запасных частей с одновременным ростом весовых норм поездов и увеличением полигонов эксплуатации привели к снижению надежности локомотивов. РЖД совместно с сервисными компаниями работает над созданием научно обоснованной системы ТООР через создание «новой модели сервиса».

Управление ТООР. Эти требования в целом соответствуют требованиям ERP- и MES-систем управления промышленными предприятиями. Главное отличие – повышенные требования к **планированию ТООР** с отцепкой подвижного состава (переводом в неэксплуатируемый парк) и порядку выдачи подвижного состава с ТООР с возобновлением эксплуатации. При этом особое внимание уделяется оборудованию, признанному влияющим на безопасность движения поездов. Вся информация также должна регистрироваться, включая возникающие штрафы. Аналогичная работа налажена и в РЖД.

Измерительное оборудование должно калиброваться в соответствии с национальными и международными требованиями. Отдельно выделяется контроль сварных и склеенных швов, неразрушающий контроль, окончательные испытания перед выпуском в эксплуатацию, диагностика и обслуживание тормозов, колесных пар, тяговых устройств, систем управления, контроля и сигнализации, управления дверьми и др. В РЖД метрологии уделяется большое внимание, хотя реальная оснащенность ТООР оборудованием и инструментом еще не соответствует современным требованиям.

АСУ. В стандартах ЕС декларируется, что поставленные задачи должны решаться с использованием АСУ, но практических рекомендаций достаточно мало. Однако указано, что соответствие функциональности АСУ ТООР подтверждается до первоначального использования и повторно подтверждается по мере необходимости. При всем внимании к АСУ в РЖД к АСУ ТООР внимание недостаточно и больше развивается за счет АСУ сервисных компаний. Необходима интеграция АСУ ТООР сервиса в АСУЖТ по европейским принципам.

Следует отметить, что соответствие международным стандартам особенно полезно в связи с продвижением отечественного подвижного состава за рубеж: локомотивов – в Монголию, Казахстан и Узбекистан, электропоездов – в Индию, вагонов метро – в Азербайджан, вагонов – в Египет и др.

Существующая в РЖД функциональность АСУ ТООР локомотивов на базе АСУЖТ (ГИД «Урал», КАСАНТ, КАСАТ, АСОУП, АСУТ) [2] во взаимодействии с АСУ сервисных компаний (в ТМХ – АСУ СГ, АРМ-И, АРМ ИБД, АРМ ДК [3]) соответствует требованиям стандартов ЕС, но требует повышения эффективности, для чего необходимо соблюдать уже

существующие требованиям технологических процессов согласно рисунку 1, после чего станет возможным оценить недостатки существующей модели АСУ ТОиР [4]. Для этого требуется разработка отраслевых стандартов с требованиями к системе ТОиР и сертификация ремонтных предприятий аналогично ЕС. Необходимо сформулировать и постепенно выполнить требования по логистике, оснащению технологическим оборудованием и инструментом, средствами диагностики и измерения, квалификации работников ремонтных предприятий.

Есть два важных взаимосвязанных отличия АСУ ЕС и РЖД: отсутствие реальной конкуренции, а также прозрачности и доступности информации по безопасности движения поездов, надежности подвижного состава. Гриф секретности, конфиденциальности и коммерческой тайны при наличии монополии приводит к отрицательным результатам, защите коммерческих интересов отдельных групп компаний, как следствие, – к снижению эффективности перевозочного процесса. В результате на железнодорожный рынок ограничен доступ прогрессивным техническим решениям, нет как реальной конкуренции, так и поступления альтернативных технических решений. Нарушение принципов свободной конкуренции и доступности, прозрачности и целостности информации аналогично ЕС мешает повышению надежности подвижного состава.

В транспортных вузах – ДВГУПСе, ИрГУПСе, СГУПСе, ОмГУПСе, ПГУПСе, РУТе (МИИТе), ПривГУПСе, РГУПСе и ряде других технических вузов есть научный потенциал, в т. ч. в виде заинтересованных в разработках аспирантов и докторантов. К сожалению, наблюдается разрыв между наукой и практикой, работой вузов и РЖД. Во многом это связано с недоступностью исходной информации: эксплуатационная работа локомотивов, конструкция и состав оборудования локомотивов, отказы оборудования, затраты ресурсов на восстановление работоспособности и др. Закрывание этой информации не всегда соответствует интересам транспорта. Необходимо дополнить систему управления по рисунку 1 системой по рисунку 2: открытое обсуждение проблем с надежностью подвижного состава – важный элемент системы управления надежностью. Для этого можно создать копию доступных данных ТОиР «База знаний ТОиР» с исключением закрытых данных как в сети Интернет, так и в СПД РЖД.



Рисунок 2 – Необходимые доработки системы постоянного улучшения АСУ ТОиР

В процессе эксплуатации и ТОиР тягового подвижного состава формируется комплексная база данных. При подготовке информации для открытого доступа из этой базы данных следует исключить возможные инсайдерские данные, в т. ч. представляющие государственную тайну, личные данные работников и др. Существующий сейчас объем закрытой информации явно завышен. В результате всю научную деятельность вузов и даже НИИ можно будет перевести в практическое русло. Следующим шагом станет как разработка новых технических решений, так и модернизация существующих устройств с привлечением как существующих, так и новых изготовителей. Надо менять роль научно-технических советов РЖД (НТС), делая их независимыми экспертами для реальной критической научной оценки инновационных проектов отрасли. Такое изменение ТОиР позволит существенно повысить надежность

тягового подвижного состава, конкурентоспособность железнодорожного транспорта в целом, как это и требуется согласно стандартам ЕС, в т. ч. по ТООР подвижного состава.

Следует отметить, что в ЕС уделяется серьезное внимание таким элементам систем менеджмента качества, как «документирование» и «обучение». Необходимо издание стандартов отрасли с требованиями к сервисным локомотивным депо и уровню компетенции их работников. Необходима периодическая сертификация предприятий и специалистов на их соответствие этим стандартам.

Список литературы

1. Киберфизические производственные системы (CPPS) // janberg.by : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://janberg.by/kiberfizicheskie-proizvodstvennye-sistemy-cpps/> (дата обращения: 28.11.2025).

2. Комплексная автоматизированная система управления железнодорожным транспортом (АСУЖТ) / под ред. А. П. Петрова. – Москва : Транспорт, 1977. – 599 с. – Текст : непосредственный.

3. Пустовой, И. В. Автоматизированная система управления производственными процессами сервисных предприятий / И. В. Пустовой, А. А. Аболмасов, И. К. Лакин. – Текст : непосредственный // Техническое обслуживание и ремонт подвижного состава (ТООР) : труды всероссийской научно-практической конференции с международным участием / Дорожный центр внедрения Красноярской железной дороги. – Красноярск, 2025. – С. 260–270. – EDN ВВУАКД.

4. Лакин, И. И. Комплексная модель управления техническим обслуживанием и ремонтом подвижного состава / И. И. Лакин. – Текст : непосредственный // Техническое обслуживание и ремонт подвижного состава (ТООР) : труды всероссийской научно-практической конференции с международным участием / Дорожный центр внедрения Красноярской железной дороги. – Красноярск, 2025. – С. 198–207. – EDN PXGCXH.

5. Regulation (EU) No 1025/2012 of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on European standardisation // eur-lex.europa.eu : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2012/1025/oj/eng> (дата обращения: 28.11.2025).

6. Directive 2012/34/EU of the European Parliament and of the Council of 21 November 2012 establishing a single European railway area (recast) // eur-lex.europa.eu : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2012/34/oj/eng> (дата обращения: 28.11.2025).

7. Directive (EU) 2016/798 of the European Parliament and of the Council of 11 May 2016 on railway safety (recast) // eur-lex.europa.eu : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2016/798/oj/eng> (дата обращения: 28.11.2025).

8. Regulation (EU) 2016/796 of the European Parliament and of the Council of 11 May 2016 on the European Union Agency for Railways and repealing Regulation (EC) No 881/2004 // eur-lex.europa.eu : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2016/796/oj/> (дата обращения: 28.11.2025).

9. Directive (EU) 2016/797 of the European Parliament and of the Council of 11 May 2016 on the interoperability of the rail system within the European Union (recast) // eur-lex.europa.eu : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2016/797/oj/eng> (дата обращения: 28.11.2025).

10. Commission Implementing Regulation (EU) 2019/779 of 16 May 2019 laying down detailed provisions on a system of certification of entities in charge of maintenance of vehicles pursuant to Directive (EU) 2016/798 of the European Parliament and of the Council and repealing Commission Regulation (EU) No 445/2011 // eur-lex.europa.eu : сайт. – Текст : электронный. – URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2019/779/oj/eng (дата обращения: 28.11.2025).

11. Во Франции начато строительство первого частного депо для подвижного состава // [zdmira.com](https://zdmira.com/news/vo-frantsii-nachato-stroitelstvo-pervogo-chastnogo-depo-dlya-podvizhnogo-sostava) : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://zdmira.com/news/vo-frantsii-nachato-stroitelstvo-pervogo-chastnogo-depo-dlya-podvizhnogo-sostava> (дата обращения: 28.11.2025).

12. European Rail Traffic Management System (ERTMS) // era.europa.eu : сайт. – Текст : электронный. – URL: https://www.era.europa.eu/domains/infrastructure/european-rail-traffic-management-system-ertms_en (дата обращения: 28.11.2025).

13. Цикл Шухарта-Деминга: что это, этапы PDCA и примеры // kaiten.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://kaiten.ru/blog/tsikl-shukharta-diemingha-uchimsia/> (дата обращения: 28.11.2025).

14. Федеральный закон № 16-ФЗ от 09.02.2007 «О транспортной безопасности» // rossafety.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://rossafety.ru/zakonodatelstvo/tb/fz-16/> (дата обращения: 28.11.2025).

15. Safety Alert IT tool Safety Alert IT tool // www.cer.be : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://www.cer.be/cer-positions/safety-alert-it-tool-safety-alert-it-tool> (дата обращения: 28.11.2025).

16. Положение об учете, расследовании и анализе отказов в работе технических средств на инфраструктуре ОАО «РЖД» с использованием автоматизированной системы КАС АНТ № 775/р от 08.04.2025. – Москва : ОАО «РЖД», 2025. – 57 с. – Текст : непосредственный.

References

1. *Kiberfizicheskie proizvodstvennyye sistemy (CPPS)* [Cyber-Physical Production Systems (CPPS)]. Available at: <https://janberg.by/kiberfizicheskie-proizvodstvennyye-sistemy-cpps/> (accessed 28.11.2025).

2. Petrov A.P. ed. *Kompleksnaia avtomatizirovannaia sistema upravleniia zheleznodorozhnym transportom (ASUZHT)* [Integrated automated railway transport management system]. Moscow, Transport Publ., 1977, 599 p. (In Russian).

3. Pustovoy I.V., Abolmasov A.A., Lakin I.K. [Automated production process management system for service enterprises]. *Tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont podvizhnogo sostava (TOiR) : trudy vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Maintenance and repair of rolling stock (MR) : proceedings of the All-Russian Scientific and practical conference with international participation]. Krasnoyarsk, 2025, pp. 260-270. EDN VBYAKD. (In Russian).

4. Lakin I.I. [Rolling stock maintenance and repair comprehensive management model]. *Tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont podvizhnogo sostava (TOiR) : trudy vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Maintenance and repair of rolling stock (MR) : proceedings of the All-Russian Scientific and practical conference with international participation]. Krasnoyarsk, 2025, pp. 198-207. EDN PXGCXH. (In Russian).

5. Regulation (EU) No 1025/2012 of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on European standardisation. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2012/1025/oj/eng> (accessed 28.11.2025).

6. Directive 2012/34/EU of the European Parliament and of the Council of 21 November 2012 establishing a single European railway area (recast). Available at: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2012/34/oj/eng> (accessed 28.11.2025).

7. Directive (EU) 2016/798 of the European Parliament and of the Council of 11 May 2016 on railway safety (recast). Available at: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2016/798/oj/eng> (accessed 28.11.2025).

8. Regulation (EU) 2016/796 of the European Parliament and of the Council of 11 May 2016 on the European Union Agency for Railways and repealing Regulation (EC) No 881/2004. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2016/796/oj/> (accessed 28.11.2025).

9. Directive (EU) 2016/797 of the European Parliament and of the Council of 11 May 2016 on the interoperability of the rail system within the European Union (recast). Available at: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2016/797/oj/eng> (accessed 28.11.2025).

10. Commission Implementing Regulation (EU) 2019/779 of 16 May 2019 laying down detailed provisions on a system of certification of entities in charge of maintenance of vehicles pursuant to

Directive (EU) 2016/798 of the European Parliament and of the Council and repealing Commission Regulation (EU) No 445/2011. Available at: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2019/779/oj/eng (accessed 28.11.2025).

11. *Vo Frantsii nachato stroitel'stvo pervogo chastnogo depo dlia podvizhnogo sostava* [Construction of the first private depot for rolling stock has begun in France]. Available at: <https://zdmira.com/news/vo-frantsii-nachato-stroitelstvo-pervogo-chastnogo-depo-dlya-podvizhnogo-sostava> (accessed 28.11.2025).

12. European Rail Traffic Management System (ERTMS). Available at: https://www.era.europa.eu/domains/infrastructure/european-rail-traffic-management-system-ertms_en (accessed 28.11.2025).

13. *Tsikl Shukharta-Deminga: chto éto, étapu PDCA i primery* [The Schuhart-Deming cycle: what it is, the stages of PDCA and examples]. Available at: <https://kaiten.ru/blog/tsikl-shukharta-diemingha-uchimsia/> (accessed 28.11.2025).

14. *Federal'nyĭ zakon 16-FZ ot 09.02.2007 O transportnoĭ bezopasnosti* [Federal Law No. 16-FZ dated 09.02.2007. "On Transport Safety"]. Available at: <https://rossafety.ru/zakonodatelstvo/tb/fz-16/> (accessed 28.11.2025).

15. Safety Alert IT tool Safety Alert IT tool. Available at: <https://www.cer.be/cer-positions/safety-alert-it-tool-safety-alert-it-tool> (accessed 28.11.2025).

16. Regulations on accounting, investigation and analysis of failures in the operation of technical facilities on the infrastructure of JSC "Russian Railways" using the automated KAS ANT system № 775/p от 08.04.2025. Moscow, JSC «RZD» Publ., 2025. 57 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Лакин Игорь Игоревич

АО «Инжиниринговый центр железнодорожного транспорта» (АО «ИЦ ЖТ»).

Большой б-р ул., дом 40, г. Москва, Территория Сколково Инновационного Центра, 121205, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, ведущий эксперт, АО «ИЦ ЖТ».

Тел.: +7 (916) 383-64-43.

E-mail: Lakini@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Lakin Igor Igorevich

JSC "Engineering center of railway transport" (ECRT).

40, Bolshoy b-r st., Moscow, The Skolkovo Innovation Center Territory, 121205, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, leading expert, ECRT.

Phone: +7 (916) 383-64-43.

E-mail: Lakini@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Лакин, И. И. Гармонизация автоматизированной системы управления техническим обслуживанием и ремонтом локомотивов со стандартами Евросоюза / И. И. Лакин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 4 (64). – С. 100 – 112.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Lakin I.I. Repair automated control systems & EU standards harmonization. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 4(64), pp. 100-112. (In Russian).

УДК 656.259.9

И. В. Сударев, М. Э. Скоробогатов

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), г. Иркутск, Российская Федерация

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ И УЧЕТА АППАРАТУРЫ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ NFC

Аннотация. Статья посвящена разработке и обоснованию эффективности системы контроля и учета аппаратуры железнодорожной автоматики и телемеханики с применением технологии NFC. Основная цель работы – развитие технических систем обслуживания, ремонта и хранения значительного количества аппаратуры в ремонтно-технологических участках. Для выбора оптимального технического решения был проведен анализ существующих технологий, включая штрихкод, QR-код, RFID и NFC. Выбор сделан в пользу последней, поскольку она обеспечивает высокую безопасность и скорость обмена данными, низкое

энергопотребление и устойчивость к внешним воздействиям, что критически важно для целостности и достоверности учетной информации.

Методология исследования включала в себя создание концептуальной модели склада и использование фотографии рабочего времени процесса ТОиР приборов для формализации временных затрат. Анализ позволил выявить наиболее неэффективные элементы – процессы приемки (Оч2) и отгрузки (Оч4), где ручное оформление документации занимает до 20 минут на прибор. Предлагаемая система представляет собой комплексное решение, включающее в себя центральный узел (сервер базы данных phpMyAdmin), специализированное информационное и алгоритмическое обеспечение для системы управления складом и NFC-метки, являющиеся источником основной и справочной информации о приборах. Внедрение системы включает в себя интеграцию считывающих устройств и плановое нанесение меток непосредственно на приборы ЖАТ.

Оценка эффективности проводилась путем имитационного моделирования системы управления складом с использованием агентно-дискретного подхода в платформе Anylogic. Моделирование показало, что внедрение системы в рамках одного РТУ, обрабатывающего 3020 приборов в месяц, позволит сократить общие годовые трудозатраты на этапах «Оч2» и «Оч4» с 416 до 52 человеко-часов. Высвобожденные 364 человеко-часа способствуют перераспределению нагрузки электромехаников, росту общей производительности труда и увеличению перерабатывающей способности РТУ.

Ключевые слова: NFC, РТУ, Anylogic, моделирование, аппаратура ЖАТ, оптимизация, склад, реляционные базы данных.

Igor V. Sudarev, Maxim E. Skorobogatov

Irkutsk State Transport University (ISTU), Irkutsk, the Russian Federation

SYSTEM FOR MONITORING AND ACCOUNTING OF AUTOMATION AND TELEMECHANICS APPLIANCES USING NFC TECHNOLOGY

Abstract. This article is devoted to the development and validation of a system for monitoring and accounting of railway automation and telemetry equipment using NFC technology. The primary objective of the study is to develop technical systems for the maintenance, repair, and storage of a significant amount of equipment in repair and maintenance areas. To select the optimal technical solution, an analysis of existing technologies was conducted, including barcode, QR code, RFID, and NFC. NFC was chosen because it provides high security and data exchange speed, low power consumption, and resistance to external influences, which is critical for the integrity and reliability of accounting information.

The research methodology included creating a conceptual warehouse model and using photographs of the equipment maintenance and repair process to formalize time costs. The analysis identified the most inefficient elements—the receiving (Och2) and shipping (Och4) processes, where manual documentation takes up to 20 minutes per device. The proposed system is a comprehensive solution comprising a central node (a phpMyAdmin database server), specialized information and algorithmic support for the warehouse management system, and NFC tags, which serve as a source of basic and reference information about the equipment. Implementation of the system includes the integration of reader devices and the scheduled application of tags directly to the railway automation equipment.

The efficiency assessment was conducted through simulation modeling of the warehouse management system using an agent-based approach in the Anylogic platform. The simulation showed that implementing the system within a single RTU processing 3,020 devices per month will reduce the total annual labor costs at the "Och2" and "Och4" stages from 416 to 52 man-hours. The 364 man-hours saved facilitate the redistribution of the electricians' workload, increase overall labor productivity, and enhance the RTU's processing capacity.

Keywords: NFC, RTS, Anylogic, modeling, RAT equipment, optimization, warehouse, relational databases.

Повышение автоматизации систем обеспечения движения поездов является одним из приоритетных направлений на отечественном железнодорожном транспорте [1, 2]. При этом особое внимание уделяется развитию ремонтно-технологических участков (РТУ). Основными задачами деятельности РТУ дистанций автоматики и телемеханики являются организация и проведение работ по регламентному техническому обслуживанию, проверке на соответствие техническим требованиям (входной, периодический контроль) эксплуатируемой или вводимой в эксплуатацию аппаратуры железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) с применением специального технологического, испытательного оборудования, инструмента и средств измерений.

В РТУ поступают значительное количество аппаратуры, требующей ремонта, а также новые изделия и запасные части. Эффективное управление этими ресурсами требует

внедрения современных информационных технологий, способных обеспечить оперативный доступ к необходимым данным и ресурсам.

Техническая эксплуатация устройств и систем ЖАТ, играющая важную роль в обеспечении безопасности и бесперебойности движения поездов, помимо прочего также включает в себя техническое обслуживание, ремонт и хранение аппаратуры ЖАТ. Данные операции выполняются с использованием соответствующих технических средств непосредственно в РТУ.

С целью оптимизации производственных процессов в РТУ внедряются автоматизированные системы контроля и учета аппаратуры ЖАТ, заменяя бумажные носители электронными, тем самым ускоряя процесс приемки и отгрузки аппаратуры в РТУ. Вследствие этого повышается производительность труда всего участка [3].

В настоящее время существует ряд передовых технологий, которые могут быть эффективно интегрированы в системы контроля и учета аппаратуры автоматики и телемеханики. Среди них наиболее распространены методы штрих- и QR-кодирования, а также технологии, основанные на радиочастотной идентификации (RFID) и ближней бесконтактной связи (NFC) [4 – 6]. Для наглядного представления сравнительных характеристик всех рассмотренных технологий в таблице 1 приведен их анализ по основным параметрам.

Таблица 1 – Анализ технологий для организации работы склада

№ п/п	Система	Параметр			
		объем кодируемой информации	устойчивость к внешним воздействиям	скорость обмена информацией	защищенность кодируемой информации
1	Штрихкод	Низкий	Низкая	Низкая	Низкая
2	QR-код	Средний	Низкая	Низкая	Низкая
3	RFID	Высокий	Высокая	Средняя	Средняя
4	NFC	Высокий	Высокая	Средняя	Высокая

При этом эффективность систем контроля и учета аппаратуры автоматики и телемеханики в условиях РТУ определяется вероятностью успешной идентификации метки $P_{сч. усп}$ и математическим ожиданием времени на одну операцию идентификации $E[T]$.

Вероятность успешной идентификации $P_{сч. усп}$ для одной учетной единицы описывается формулой:

$$P_{сч. усп} = P_{надеж. сч} \cdot k_{ВВС} \cdot k_{чел. ф}, \quad (1)$$

где $P_{надеж. сч}$ – базовая техническая надежность считывателя;

$k_{ВВС}$ – коэффициент влияния внешней среды (загрязнение, наличие электромагнитного поля, металлической пыли, экранирующих металлических стеллажей), $0 < k_{ВВС} < 1$;

$k_{чел. ф}$ – коэффициент человеческого фактора (ошибки позиционирования считывателя).

Технологии штрих-/QR-кодирования наиболее чувствительны к загрязнениям поверхности (масло, пыль). При загрязнении более 15 % площади кода $k_{ВВС}^{QR} \approx 0,2$, что делает $P_{сч. усп}^{QR}$ критически низкой без предварительной очистки поверхности.

Ввиду подверженности технологии RFID влиянию металлических поверхностей (переотражение сигнала, «мертвые зоны» на стеллажах) коэффициент помех $k_{ВВС}^{RFID} \approx 0,7$, что требует дублирующих проверок.

Так как технология NFC использует индуктивную связь на малом расстоянии, то она не зависит от оптической прозрачности и в отличие от технологии RFID требует явного поднесения устройства, что исключает ложные срабатывания от соседних приборов, что обеспечивает $k_{ВВС}^{NFC} \approx 1$.

Таким образом, математическое ожидание времени на одну операцию идентификации $E[T]$ с учетом повторных попыток при ошибке:

$$E[T] = t_{\text{скан}} + \frac{1 - P_{\text{сч. усп}}}{P_{\text{сч. усп}}} \cdot t_{\text{руч. в}}, \quad (2)$$

где $t_{\text{скан}}$ – время сканирования;

$t_{\text{руч. в}}$ – время на ручной ввод номера при сбое.

Для NFC при $P_{\text{сч. усп}} = 1$ второе слагаемое стремится к нулю, что минимизирует дисперсию времени операции.

Основываясь на анализе недостатков существующих технологий для контроля и учета аппаратуры, было принято решение использовать технологию NFC в качестве базиса для разработки новой системы. Выбор NFC обусловлен рядом существенных преимуществ, таких как повышенная безопасность передачи данных, поскольку контроль оборота приборов, технического обслуживания и ремонта должен обеспечивать целостность и достоверность данных, связанных с их эксплуатацией. Учитывая критическое значение этих приборов для безопасности движения, любая ошибка или несанкционированное изменение в учетной документации или статусе прибора может иметь серьезные последствия. Возможность многократного использования меток с увеличенным объемом хранимых данных является важной составляющей. Кроме того, преимуществом использования данной технологии является низкое энергопотребление в сравнении с системами, реализованными на основе RFID со считывающими рамками, которые работают непрерывно и потребляют большое количество электроэнергии [7, 8]. В контексте железнодорожной отрасли, в частности, отсутствуют аналогичные системы для автоматизации процессов контроля и учета оборудования на складах РТУ.

В РТУ, как правило, применяют типовой цикл движения аппаратуры. Снятые с объекта приборы доставляют в РТУ на специально оборудованном автомобиле или мотовозе (с дополнительной амортизацией: ящики с ячейками для приборов покрывают изнутри войлоком, устанавливают на стеллажах с пружинами).

Доставленные с линии приборы выгружают и направляют в специальное помещение приема для очистки сжатым воздухом, после чего их регистрируют и отправляют в кладовую для хранения. При этом определяют внешнее состояние приборов, степень износа контактов. Такая проверка позволяет выявить случаи несоответствия режимов эксплуатации нормам и предупредить возможные отказы в аппаратуре.

Приборы в здании РТУ перемещают с помощью тележки, лифта или подъемника. Аппаратуру, предназначенную для ремонта, доставляют в комнату первичной обработки, где приборы вскрывают, очищают сжатым воздухом, заменяют неисправные стекла и катушки, чистят гайки и шайбы, окрашивают наружные части кожухов. После этого приборы доставляют в комнату регулировки механических и электрических параметров.

Рабочее место электромеханика-регулировщика организуется в соответствии с типовыми проектами, предусматривающими выбор последовательности и способы выполнения операций, определение норм затрат труда, обеспечение необходимых санитарно-гигиенических условий.

Для выявления основных этапов, на которых происходят временные задержки, и определения наиболее качественных методов внесения изменений для эффективной работы участка была создана концептуальная модель склада РТУ (рисунок 1). Она необходима для формализации технологического процесса, установления взаимосвязей между этапами и последующего построения имитационной модели в среде AnyLogic, которая позволяет проводить количественную оценку временных затрат и прогнозировать эффект от внедрения новой системы.

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

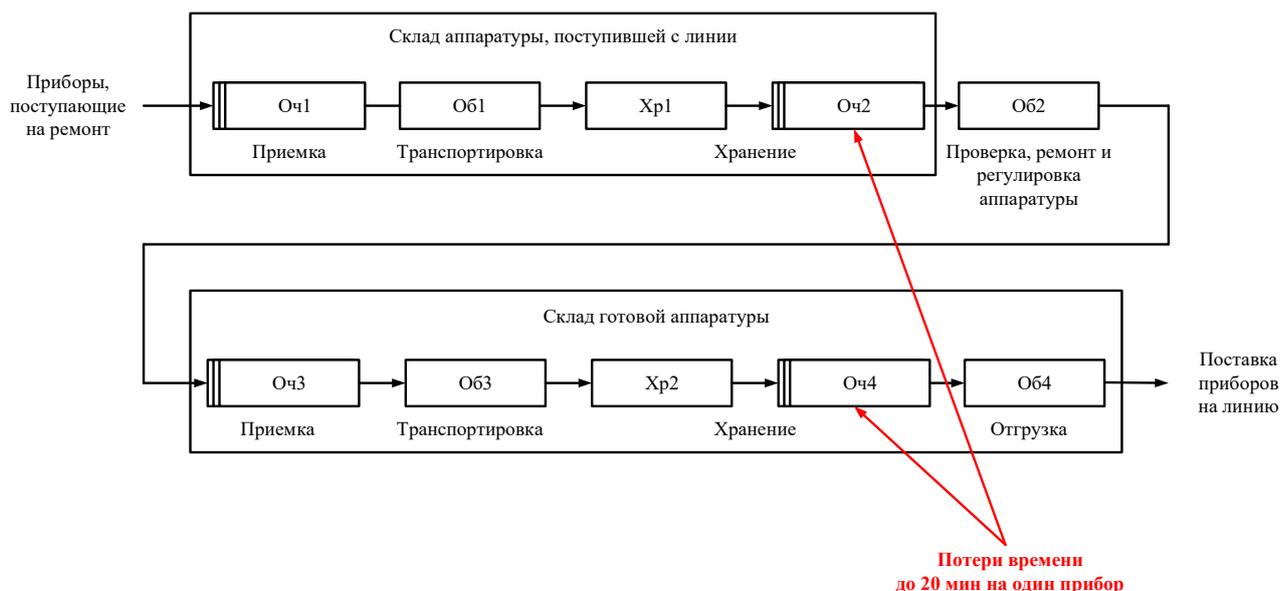


Рисунок 1 – Концептуальная модель РТУ

Для анализа временных затрат на каждый этап представленной концептуальной модели была составлена фотография рабочего времени процесса ТОиР приборов от момента их поступления на ремонт и до поставки на линию:

1. Склад аппаратуры, поступившей с линии (входной контроль), приемка новых приборов для их поверки и приборов, отработавших свой срок службы:

1.1. Оч1 (приемка) – 10 – 15 мин. Включает в себя разгрузку, визуальный осмотр, сверку номеров.

1.2. Об1 (транспортировка) – 5 – 10 мин. Перемещение аппаратуры на полку стеллажа входного контроля.

1.3. Хр1 (хранение) – от 1 ч до нескольких дней. Это пассивное время, пока прибор находится в очереди на ремонт.

1.4. Оч2 (выдача в ремонт) – 10 – 15 мин. Электромеханику нужно найти прибор на складе, ответственному за учет приборов работнику – найти карточку этого прибора и записать в журнал выдачи.

2. Процесс ремонта:

2.1. Об2 (проверка, ремонт и регулировка) – от 40 мин до 4 ч в зависимости от прибора. Сюда входят затраты времени на заполнение журнала ШУ-2 и дублирование данных в журнал проверки.

3. Склад готовой аппаратуры. Отремонтированный прибор подготавливается для отправки на линию:

3.1. Оч3 (приемка) – 10 – 15 мин. Электромеханик сдает прибор на склад. Ответственный за учет приборов повторно открывает журнал/карточку, проставляет отметку о том, что прибор исправен, дату проверки и фамилию проверяющего.

3.2. Об3 (транспортировка) – 3 – 5 мин. Размещение на стеллаж готовой аппаратуры.

3.3. Хр2 (хранение) – время зависит от потребности в конкретном приборе.

3.4. Оч4 (подготовка к выдаче) – 10 – 15 мин. Поиск нужного прибора, заполнение сопроводительной ведомости для отправки на линию.

3.5. Об4 (отгрузка) – 5 – 10 мин. Упаковка, погрузка в автомобиль.

Согласно проведенному анализу неэффективные временные затраты на обработку одного прибора на этапах Оч2 (приемка/регистрация) и Оч4 (отгрузка/списание) составляют до 20 мин в среднем на один прибор. Это включает в себя ручное заполнение бумажной документации и последующее внесение данных в электронную базу. Задержки возникают при оформлении отгрузки (Оч4) из-за особенностей циркуляции бумажной документации. После

отправки отремонтированного прибора на линию вместе с ним отправляется бумажная карточка прибора. Эта карточка должна быть отписана (заполнена) электромехаником на перегоне/станции, который произвел замену, и только после этого возвращается обратно в РТУ для списания и окончательного электронного учета. Из-за указанной длительной ручной цепочки передачи и заполнения документов процесс списания может затянуться на продолжительное время, что приводит к ситуации, когда прибор может быть уже переустановлен на другое место на линии, а его первичная карточка о замене только возвращается в РТУ. Эта значительная разница во времени между фактической заменой прибора и его корректным отражением в учете создает логистические и учетные проблемы.

Исходя из рассмотренной концептуальной модели можно сделать вывод о том, что элементы Оч2 и Оч4 являются наиболее неэффективными с точки зрения потери времени. Таким образом, разрабатываемые решения в первую очередь должны способствовать автоматизации процессов именно на указанных элементах, что позволит увеличить общую производительность труда, а сотрудники смогут сосредоточиться на более сложных и важных задачах, требующих профессиональных навыков.

Для исключения неэффективного использования времени при работе РТУ разработана система контроля и учета приборов автоматики (рисунок 2).

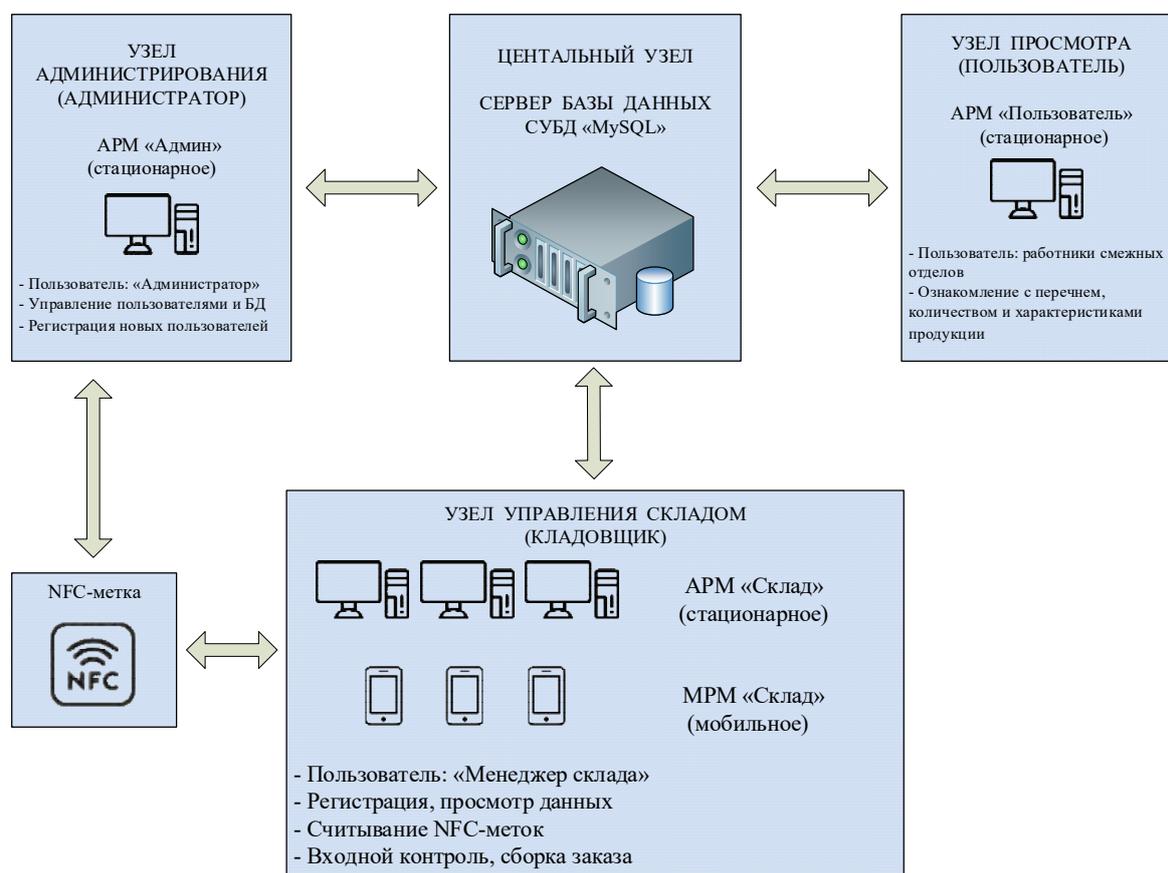


Рисунок 2 – Структура системы учета и хранения

Данная система разработана с учетом специфики РТУ и позволяет создавать структурированное информационное пространство, где каждый элемент имеет уникальное идентификационное обозначение и местоположение. Это обеспечивает возможность оперативного поиска и выдачи необходимых компонентов, минимизируя временные затраты и повышая общую производительность участка [9, 10]. Разработка системы подразумевает создание и настройку центрального узла (сервера базы данных phpMyAdmin), разработку

программного обеспечения для АРМ/МРМ «Склад», а также интеграцию считывающих устройств и NFC-меток. Процессы нанесения NFC-меток и их программирования должны быть включены в план внедрения системы. Метки наносятся непосредственно на приборы ЖАТ, поступающие на обслуживание, либо на их индивидуальную упаковку/тару.

Центральный узел представляет собой сервер базы данных, в качестве которой используется веб-интерфейс phpMyAdmin, так как он легко настраивается для связи с другими программами, обладает нужным функционалом и имеет открытый программный код, что позволяет подстроить его под специфику работы РТУ. База данных содержит необходимую информацию, которая позволяет следить за передвижением приборов на складе, автоматически загружать и удалять данные о прибывших/убывших приборах, а также вести электронную документацию для отчетности работы РТУ.

Узел управления складом строится на базе АРМ «Склад» и МРМ «Склад». Основными функциями данного узла являются считывание NFC-меток, отображение соответствующей информации на дисплее, передача считанной информации на сервер и осуществление входного контроля.

Узел администрирования решает задачи планового обновления программного обеспечения системы, оперативного вмешательства для отладки возникающих сбоев в системе и внесения изменений в пользовательские аккаунты. Узел реализуется на базе стационарного АРМа «Админ».

Узел просмотра, реализованный с помощью АРМа «Пользователь», прежде всего предназначен для работников смежных отделов и руководящего аппарата.

Метки NFC в составе системы являются ключевым элементом, с помощью которого осуществляется контроль перемещения объектов складирования, а также они являются источником основной (наименование прибора, дата поступления, место поступления и т. д.) и справочной (техкарта, нормативные параметры, срок службы и т. д.) информации.

Для записи информации на NFC-метку используется формат данных NDEF (NFC Data Exchange Format), при этом сообщение, записываемое на метку, имеет стандартизированную структуру (таблица 2), тип записи – text.

Таблица 2 – Структура записываемой информации на NFC-метку

№ п/п	Поле	Описание	Размер
1	MB	Message Begin (Начало сообщения)	1 бит
2	ME	Message End (Конец сообщения)	1 бит
3	CF	Chunk Flag (Флаг фрагментации)	1 бит
4	SR	Short Record (Короткая запись)	1 бит
5	IL	ID Length (Длина идентификатора)	1 бит
6	TNF	Type Name Format (Формат имени типа)	3 бита
7	TYPE LENGTH	Длина поля TYPE	1 байт
8	ID LENGTH	Длина поля ID (если IL=1)	1, 2, 4 байта
9	PAYLOAD LENGTH	Длина полезной нагрузки	1, 2, 4 байта
10	TYPE	Тип записи (например, URI, Text, MIME)	Определяется TNF
11	ID	Идентификатор записи	Определяется ID LENGTH
12	PAYLOAD	Полезная нагрузка	Определяется PAYLOAD
13	Общий размер записи (консервативная оценка)		до 512 байт

В качестве протокола связи между NFC-метками и узлами управления складом и администрирования применяется Reader/Writer, который подразумевает использование активного устройства (считывателя) для генерации магнитного поля, питающего пассивную NFC-метку, которая изменяет данное поле для передачи данных.

Важным параметром для работы системы является скорость передачи данных при ее считывании и записи с помощью метки. Технология NFC поддерживает запись на трех скоростях: 106, 212 или 424 кбит/с, время передачи сообщения объемом 512 байт

(консервативная оценка) при этом составляет 38.6 мс, 19.3 мс и 9.6 мс соответственно. С точки зрения оператора, который тратит от 100 до 500 мс на физическое поднесение и удержание считывателя у метки, разница во времени считывания не влияет на общую производительность работ. Однако меньшая скорость передачи сигнала обеспечивает более высокое отношение «сигнал/шум», что повышает надежность считывания меток при неидеальном контакте или при воздействии электромагнитных шумов различной природы. Исходя из этого разработанная система осуществляет запись/чтение меток со скоростью 106 кбит/с.

Алгоритм, согласно которому работает система контроля и учета аппаратуры автоматики и телемеханики, представлен на рисунке 3.

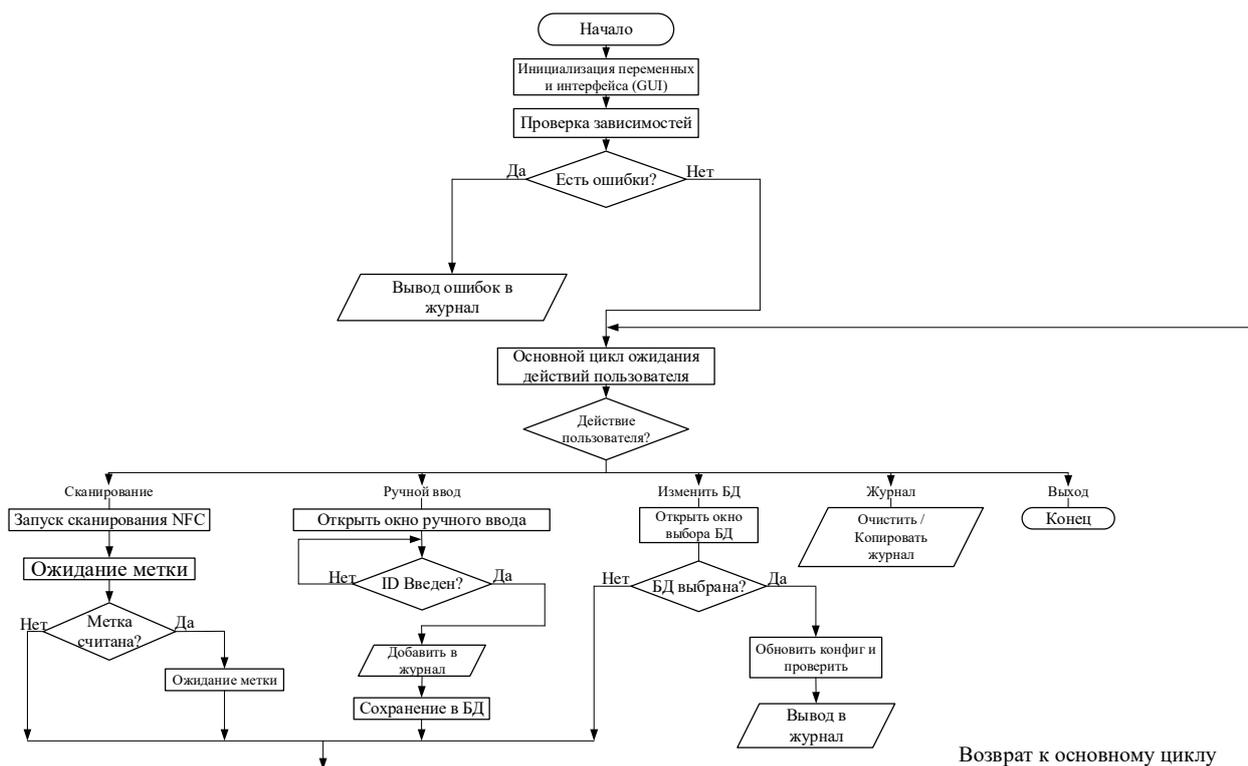


Рисунок 3 – Блок-схема работы программы

Графический интерфейс программы реализован с использованием стандартной библиотеки Python – tkinter, что обеспечивает кроссплатформенность и простоту управления для пользователя. Взаимодействие с NFC-устройствами осуществляется через библиотеки nfcru и ruscards для использования различных считывателей. Взаимодействие с базой данных происходит через подключение к MySQL, управление данными реализовано с помощью библиотеки mysql.connector.

Архитектура приложения фундаментально основана на разделении ответственности между потоком пользовательского интерфейса (главный поток) и рабочими потоками (фоновый поток): главный поток отвечает за взаимодействие с пользователем и интерфейсом программы, а также обрабатывает все полученные данные, фоновый – отвечает за выполнение длительных операций, чтобы не останавливать главный поток и сохранять отзывчивость пользовательского интерфейса, т. е. его основная задача – обработка процесса сканирования NFC-меток и проверка дубликатов.

Последовательность действий при запуске приложения состоит из следующих этапов.

1. Система последовательно импортирует все необходимые библиотеки: dotenv, nfcru, mysql.connector и ruscards. В случае, если считыватель не обнаружен или нужный модуль не

найден, пользователь может выполнять ручной ввод данных и просматривать журнал, что обеспечивает работоспособность программы в любых условиях.

2. Приложение загружает параметры для подключения к базе данных (хост, пользователь, пароль) из файла .env.

3. На этапе создания графического интерфейса инициализируются и размещаются на главном окне все визуальные элементы: фрейм статуса, кнопки управления, поле выбора базы данных (БД) и область журнала.

4. Сразу после запуска интерфейса в область журнала записываются сообщения о статусе доступности модулей. Это дает пользователю информацию о готовности системы и возможных проблемах с зависимостями.

После успешного завершения этих шагов приложение переходит в основной цикл ожидания, который является ядром его архитектуры и обрабатывает все дальнейшие действия пользователя. Приложение будет находиться в пассивном состоянии, пока пользователь не выполнит одно из следующих действий:

- сканирование: запуск или остановка процесса чтения NFC-меток;
- ручной ввод: открытие окна для ручного добавления ID-метки;
- изменение БД: выбор или создание новой базы данных для сохранения информации;
- работа с журналом: очистка или копирование содержимого лога событий;
- выход: завершение работы приложения.

Процесс сканирования NFC-меток инициируется нажатием кнопки «Начать сканирование» и выполняется в несколько этапов:

1. Запуск: в главном интерфейсе обновляется статус на «Сканирование активировано» и запускается отдельный фоновый поток.

2. Работа потока: фоновый поток входит в цикл, где ожидает поднесения NFC-метки к считывателю. Для предотвращения многократной регистрации одной и той же метки реализован механизм проверки на дубликаты: идентификатор каждой считанной метки временно сохраняется, и повторная запись блокируется в течение 5 с.

3. Сохранение данных: при обнаружении новой, уникальной метки ее данные помещаются в очередь сообщений для последующей обработки главным потоком, который извлекает эти данные, записывает их в журнал и сохраняет в базу данных.

4. Остановка: нажатие кнопки «Остановить сканирование» соответственно отключает процесс поиска меток.

Ручной ввод ID-метки представляет собой альтернативный способ добавления данных, когда автоматическое сканирование невозможно. После ввода ID-метки в окне ручного ввода выполняется два действия: запись ID-метки в локальный журнал событий и вставка записи в таблицу БД.

Все операции в рамках указанных сценариев сопровождаются обратной связью через систему ведения журнала (лог). Лог является базовым компонентом интерфейса, который в реальном времени информирует пользователя о состоянии системы, результатах операций и возникших ошибках. Процесс логирования сообщений стандартизирован и включает в себя следующие шаги.

1. Каждое сообщение, добавляемое в журнал, автоматически снабжается точной временной меткой и префиксом-тегом, который указывает на тип события: ИНФО, УСПЕХ или ОШИБКА.

2. Для быстрой визуальной идентификации типа события используются цветовые теги. Информационные сообщения помечаются синим цветом, успешные операции – зеленым, а ошибки – красным.

3. Источник сообщений: записи в журнал могут поступать из разных частей системы напрямую от действий пользователя (например, нажатие кнопок) или асинхронно из очереди сообщений, куда их помещает фоновый поток сканирования или функции работы с БД.

Для удобства пользователя реализованы функции управления журналом: очистить журнал (позволяет полностью удалить все содержимое текстового поля журнала) и копировать журнал (копирует весь текст из журнала в системный буфер обмена для дальнейшего анализа или сохранения).

Имитационное моделирование системы управления складом. Оценка эффективности предложенной системы осуществлялась с помощью применения имитационного моделирования в программной платформе Anylogic. Данная платформа поддерживает возможность агентно-дискретного моделирования, что является наиболее подходящим для оценки эффективности работы склада РТУ. В AnyLogic есть возможность моделирования систем с четкими этапами обработки заявок. При этом агенты представляют собой объекты, взаимодействующие через дискретные этапы, а их действия формируют глобальное поведение системы. Благодаря применению имитационной модели, разработанной с использованием платформы AnyLogic, предоставляется возможность детального анализа всех процессов, происходящих на реальном складе РТУ. Это позволяет не только визуализировать временные затраты, но и идентифицировать ключевые узлы, где возникают наибольшие задержки и потери времени. Основная логика работы разработанной модели представлена на рисунке 4.

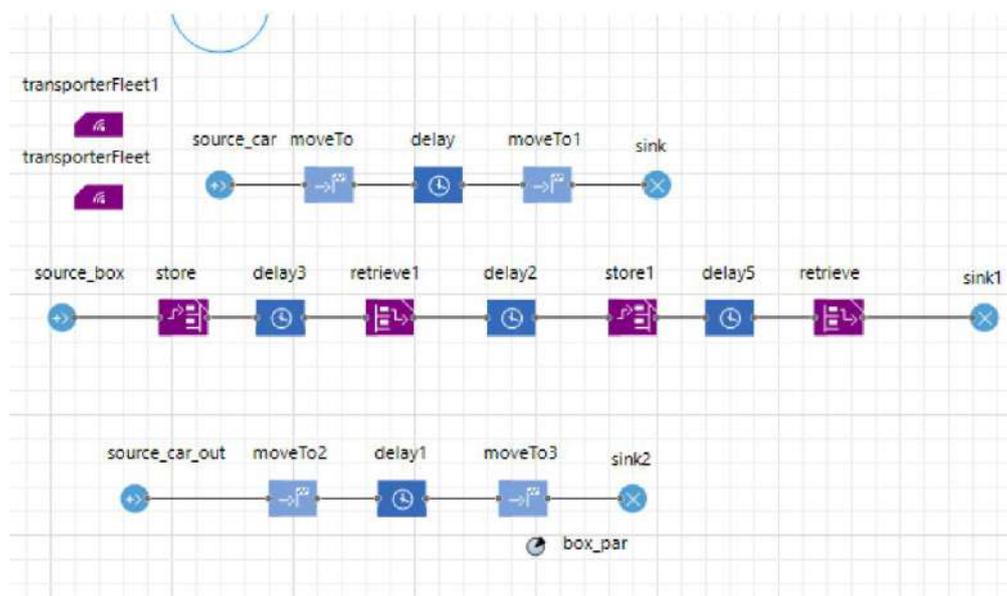


Рисунок 4 – Логика работы процессной модели РТУ

На рисунке 4 представлены следующие виды процессов:

- поступление аппаратуры с линии на склад;
- движение аппаратуры по складу: на ремонт, с ремонта и т. д.;
- отгрузка аппаратуры со склада и обратное ее движение на линию.

Логика работы представляет собой последовательное соединение различных блоков из библиотек Anylogic «Моделирование процессов» и «Производственные системы». Основными выступают следующие блоки:

- «source» – создает агентов;
- «moveTo» – перемещает агента в новое место;
- «delay» – задерживает агентов на заданный период времени или действия, которые они выполняют;
- «sink» – удаляет агента;
- «store» – размещает агента (материальный объект) на указанном складе;
- «retrieve» – извлекает агента (материальный объект) из склада;
- «transporterFleet» – задает парк транспортеров, задействованных в производственной системе транспортировки материальных объектов, в нашем случае таким транспортером является работник РТУ, созданный в виде агента.

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

Исходными данными при разработке имитационной модели являлась концептуальная модель, определение агентов и ресурсов, а также план здания РТУ и передвижение объектов в процессе ТОиР. Для моделирования использовался РТУ, находящийся в границах Восточного полигона, обрабатывающий 3020 приборов в месяц, спецификация приборов представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Спецификация приборов, поступивших на ТОиР в РТУ

№ п/п	Группа приборов	Количество, шт.	№ п/п	Группа приборов	Количество, шт.	№ п/п	Группа приборов	Количество, шт.
1	1Н, 2Н	46	18	ВОЦН	9	35	ПМПУШ	4
2	2ОЛ	2	19	ВУС	2	36	ПН	62
3	2С	4	20	ГП	37	37	ПП	15
4	АВМ	275	21	ГП-САУТ	4	38	ПрБ	427
5	АНШ	29	22	ДЗ	2	39	ПРД	73
6	АОШ	2	23	ДСШ	103	40	ПРМ	145
7	АПШ	20	24	ЖС	152	41	ПРЦ	4
8	АШ	2	25	К	2	42	РВНШ	13
9	БВ	2	26	КБМШ	13	43	РН	2
10	БВМШ	9	27	КД	35	44	РНП	2
11	БДШ	37	28	КМШ	106	45	РЭЛ	56
12	БК-ДА	7	29	КПТШ	57	46	РЭС	7
13	БКР	46	30	КШ	51	47	С2	11
14	БП	2	31	МТ	2	48	ТП	2
15	БС-ДА	29	32	НМ1	29	49	ТШ	121
16	Блоки МРЦН	147	33	НМШ	456	50	УЗП	297
17	ВАК	2	34	ОМШ	37	51	ЭМСУ	18
							Итого	3020

Целью имитационного моделирования является сравнение эффективности разработанной системы контроля и учета приборов автоматики и телемеханики и существующей технологии технического обслуживания и ремонта по временным затратам на обслуживание одного прибора. Оптимизация сосредоточена на процессах Оч2 (внесение данных о приборе в учетную документацию при приемке) и Оч4 (процедура списания аппаратуры из учетных документов при отгрузке). В рамках имитационного моделирования принято, что аппаратуру с линии привозят один раз в неделю, т. е. 755 приборов за один раз.

Первоначально при каждой итерации моделирования осуществлялась доставка аппаратуры с линии на склад (рисунок 5). После этого агенты (электромеханики) приступают к разгрузочным работам.

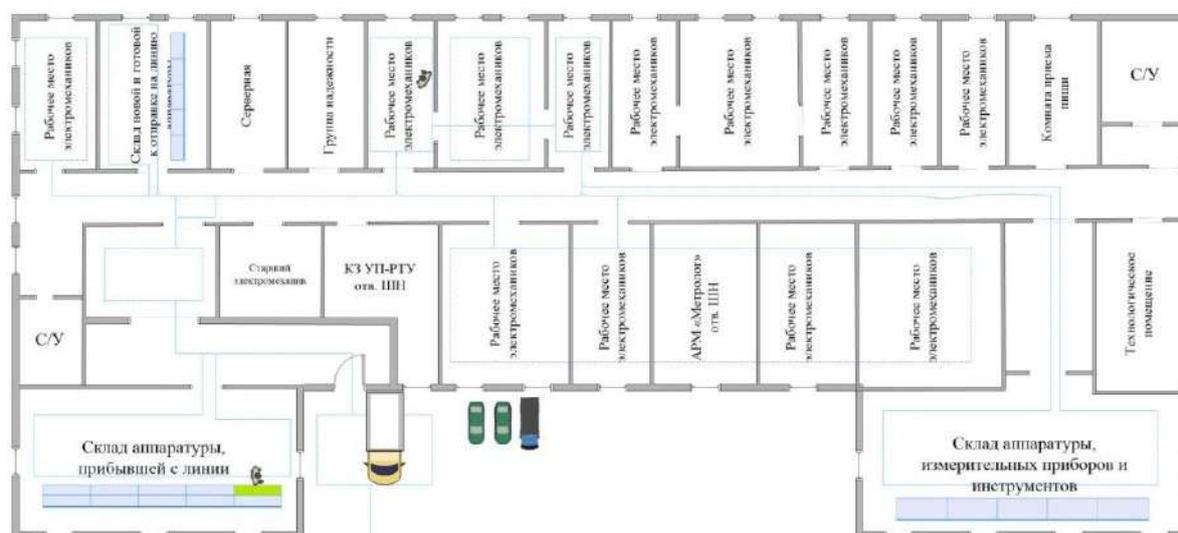


Рисунок 5 – Имитационная модель РТУ

Все приборы размещаются в специальной зоне склада для оборудования, поступившего с производственной линии. В этом же месте осуществляется внесение данных о каждом приборе в учетную документацию, что соответствует процессу «Оч2», изображенному на рисунке 1. Именно на данном этапе возникает существенное время простоя сотрудников и происходит основная задержка в рабочих операциях.

Приборы хранятся на складе аппаратуры, прибывшей с линии до момента начала ремонтных работ. Электромеханик, используя тележку, перемещает аппаратуру в свой рабочий кабинет. Ремонт производится на специализированных стендах. После завершения восстановительных работ оборудование перемещается на склад готовой продукции, откуда оно ожидает дальнейшей отправки на производственную линию.

Процесс завершается загрузкой электромеханиками готовой аппаратуры со склада в грузовик для последующей транспортировки на производственную линию. После загрузки оборудования производится процедура списания аппаратуры из учетных документов, что соответствует процессу «Оч4», изображенному на рисунке 1.

При отсутствии в РТУ автоматизированной системы складирования на запись одного прибора на бумажный носитель у электромеханика уходит 10 мин, т. е. 7550 мин или около 126 ч на все приборы. При этом примерно каждый 16-й прибор является повторяющимся, и его регистрация осуществляется указанием количества в соответствующей колонке. То есть время заполнения журнала на одну партию уменьшается до 8 ч. Таким образом, результаты моделирования указывают на то, что электромеханик вынужден отлучаться от своих прямых обязанностей на целую смену в неделю, чтобы принять аппаратуру и произвести ее учет, что напрямую влияет на производительность труда всего цеха и приводит к значительным временным задержкам. Всего за год на учет аппаратуры затрачивается 416 ч, что эквивалентно 52 сменам.

Внедрение системы учета и контроля аппаратуры автоматики и телемеханики значительно сократит время, необходимое для учета прибывшей аппаратуры. Для сканирования меток и ввода данных в таблицу потребуется около 0,5 мин – в 20 раз быстрее, чем при ручной записи. Таким образом, при тех же исходных данных, каждую неделю электромеханик будет тратить около часа на учет аппаратуры или 52 ч в год, что в восемь раз ускоряет процедуру ТОиР аппаратуры.

Такой подход способствует повышению производительности труда как электромехаников, так и всего РТУ в целом. Это, в свою очередь, приводит к повышению эффективности работы участка, выполнению плана и более быстрому возвращению аппаратуры на станции и перегоны.

Таким образом, высвободившиеся 364 человеко-часа способствуют перераспределению нагрузки электромехаников, что обеспечивает более высокую перерабатывающую способность РТУ.

Необходимо отметить, что реализация данной меры не окажет негативного влияния на выполнение производственных планов и задач. Ремонтно-технологический участок продолжит функционировать в штатном режиме, обеспечивая своевременное и качественное выполнение возложенных на него обязанностей.

На основе анализа временных затрат, полученных методом фотографии рабочего времени процесса ТОиР приборов, были выявлены элементы, являющиеся наиболее неэффективными с точки зрения потери времени: процессы приемки/регистрации аппаратуры (Оч2) и списания аппаратуры при отгрузке (Оч4).

Разработанная система с использованием централизованной реляционной базы данных (phpMyAdmin) и NFC-меток, интегрированная с АРМ/МРМ «Склад», способствует созданию структурированного информационного пространства. Это обеспечивает оперативность поиска и выдачи компонентов, а также исключает длительную ручную цепочку передачи и заполнения бумажных документов, которая ранее создавала логистические и учетные проблемы при списании аппаратуры.

Список литературы

1. Пультяков, А. В. Управление инцидентами в системе технической эксплуатации микропроцессорных устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / А. В. Пультяков, Р. В. Лихота, В. А. Алексеенко. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2020. – № 1 (64). – С. 43–47. – EDN MCMSDC.
2. Скоробогатов, М. Э. Автоматизация определения длин зон дополнительного шунтирования тональных рельсовых цепей / М. Э. Скоробогатов, В. А. Целищев. – Текст : непосредственный // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 12. – С. 9–13. – EDN DPJTIB.
3. Большаков, Р. С. Перспективы развития информационных технологий в сфере взаимодействия железнодорожного транспорта в международном сообщении / Р. С. Большаков, Н. В. Давыдова. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2025. – № 1 (85). – С. 58–67. – EDN JAMBEE.
4. Исайчева, А. Г. Применение QR-кодов для учета приборов в РТУ / А. Г. Исайчева, М. В. Башаркин, Д. А. Елистратова. – Текст : непосредственный // Автоматика, связь, информатика. – 2023. – № 11. – С. 15–17. – EDN BEAIWW.
5. Чистяков, Е. А. Повышение безопасности устройств RFID в информационных сетях / Е. А. Чистяков, Т. Н. Легкий. – Текст : непосредственный // Вестник связи. – 2024. – № 10. – С. 5–11. – EDN BCTVQL.
6. Ivanov, D. V., Moskvina, D. A., Myasnikov, A. V., & Suprun, A. F. (2017). Applying NFC for automated replication of user data. *Automatic Control and Computer Sciences*, 51(8), 855-859. <https://doi.org/10.3103/S0146411617080090>. EDN UYCDFR.
7. Islam, W., Habib, A., Umair, M. Y., & Zahid, Z. (2023). Fully printable eco-friendly chipless RFID sensor. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48(11), 14697-14706. <https://doi.org/10.1007/s13369-023-07848-z>. EDN VUCJMR.
8. Lasantha, L., Ray, B., & Karmakar, N. (2025). Trade-off analysis for array configurations of chipless RFID sensor tag designs. *Sensors*, 25(6), 1653. <https://doi.org/10.3390/s25061653>. EDN IXLRAU.
9. Сударев, И. В. Система контроля учета и хранения приборов автоматики / И. В. Сударев, И. Р. Магдиев, М. Э. Скоробогатов. – Текст : непосредственный // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами. – 2023. – № 4 (20). – С. 8–16. – EDN BRHJGI.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025662405 Российская Федерация. Расчет временных затрат технологического процесса проверки и ремонта устройств сигнализации, централизации и блокировки : заявлено 30.04.2025 : опубликовано 20.05.2025 / Скоробогатов М. Э., Сударев И. В., Магдиев И. Р. ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения». – EDN TLSYGY.

References

1. Pulyakov A.V., Likhota R.V., Alekseenko V.A. Incident management in system of technical operation of microprocessor devices of railway automation and telemechanics. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2020, no. 1(64), pp. 43-47. EDN MCMSDC. (In Russian).
2. Skorobogatov M.E., Tselishchev V.A. Automation of determination of zone lengths additional shunting of tonal track circuit. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki – Izvestiia of Tula State University. Technical sciences*, 2023, no. 12, pp. 9-13. EDN DPJTIB. (In Russian).
3. Bol'shakov R.S., Davydova N.V. Prospects for the development of information technologies in the field of interaction of railway transport in international traffic. *Sovremennye tekhnologii*.

Sistemnyi analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Modeling, 2025, no. 1(85), pp. 58-67. EDN JAMBEE. (In Russian).

4. Isaicheva A.G., Basharkin M.V., Elistratova D.A. Applying QR-codes to account for devices in the repair and technological section. *Avtomatika, sviaz', informatika – Automation, communications, informatics*, 2023, no. 11, pp. 15-17. EDN BEAIWW. (In Russian).

5. Chistiakov E.A., Legkiy T.N. Safety enhancement of RFID devices in information networks. *Vestnik svyazi – Communications Herald*, 2024, no. 10, pp. 5-11. EDN BCTVQL. (In Russian).

6. Ivanov, D. V., Moskvina, D. A., Myasnikov, A. V., & Suprun, A. F. (2017). Applying NFC for automated replication of user data. *Automatic Control and Computer Sciences*, 51(8), 855-859. <https://doi.org/10.3103/S0146411617080090>. EDN UYCDFR.

7. Islam, W., Habib, A., Umair, M. Y., & Zahid, Z. (2023). Fully printable eco-friendly chipless RFID sensor. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48(11), 14697-14706. <https://doi.org/10.1007/s13369-023-07848-z>. EDN VUCJMR.

8. Lasantha, L., Ray, B., & Karmakar, N. (2025). Trade-off analysis for array configurations of chipless RFID sensor tag designs. *Sensors*, 25(6), 1653. <https://doi.org/10.3390/s25061653>. EDN IXLRAU.

9. Sudarev I.V., Magdiev I.R., Skorobogatov M.E. Accounting and storage control system for automation devices. *Informatsionnye tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnyimi sistemami – Information technology and mathematical modeling in the management of complex systems*, 2023, no. 4(20), pp. 8-16. EDN BRHJGI. (In Russian).

10. Skorobogatov M. É., Sudarev I. V., Magdiev I. R. *Certificate of state registration of a computer program RU 2025662405*, 20.05.2025. EDN TLSYGY.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сударев Игорь Владимирович

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Автоматика, телемеханика и связь», ИрГУПС.

Тел.: +7 (3952) 63-83-99.

E-mail: sudarev.iv@irgups.ru

Скоробогатов Максим Эдуардович

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь», ИрГУПС.

Тел.: +7 (3952) 63-83-99.

E-mail: Skorobogatov_ME@irgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Сударев, И. В. Система контроля и учета аппаратуры автоматизации и телемеханики с применением технологии NFC / И. В. Сударев, М. Э. Скоробогатов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 4 (64). – С. 112 – 125.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sudarev Igor Vladimirovich

Irkutsk State Transport University (ISTU).

Chernyshevsky str., 15, Irkutsk, 664074, Russian Federation.

Postgraduate student of the department of Automation, Telemechanics, and Communications, ISTU.

Phone: +7 (3952) 63-83-99.

E-mail: sudarev.iv@irgups.ru

Skorobogatov Maxim Eduardovich

Irkutsk State Transport University (ISTU).

Chernyshevsky str., 15, Irkutsk, 664074, Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department of Automation, Telemechanics and Communications, ISTU.

Phone: +7 (3952) 63-83-99.

E-mail: Skorobogatov_ME@irgups.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Sudarev I.V., Skorobogatov M.E. System for monitoring and accounting of automation and telemechanics appliances using NFC technology. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 4 (64), pp. 112-125. (In Russian).

И. К. Лакин

АО «Трансмашхолдинг», г. Москва, Российская Федерация

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ КИБЕРФИЗИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТЬЮ ЛОКОМОТИВОВ СЕРВИСНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Аннотация. От надежной работы локомотивов во многом зависит качество перевозочного процесса. Поэтому в современных автоматизированных системах управления (АСУ) железнодорожным транспортом необходимо закладывать подсистемы управления надежностью тягового подвижного состава. Информация для управления надежностью появляется и используется различными АСУ, взаимодействие между которыми обеспечивается интероперабельной связью. В результате создается киберфизическая производственная система по принципам четвертой промышленной революции «Индустрия 4.0». Влияние технического состояния локомотивов на качество перевозочного процесса определяется в АСУ «График исполненного движения» (ГИД). Отказы, зафиксированные на нитке графика, поступают в систему управления надежностью технических средств РЖД КАСАНТ, откуда передаются в систему управления инцидентами и отказами сервисной компании. Аналогично в сервисную компанию поступают информация о работе локомотивов (прежде всего – пробег) и диагностические данные бортовых микропроцессорных систем локомотивов. На основании этих данных, а также данных депо автоматизированных систем технической диагностики определяется объем и проводятся техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) – плано-предупредительный и unplanned восстановительный. В АСУ назначаются работы, выписываются материалы со склада, планируются ресурсы на последующие ТОиР. Данные о ТОиР используются при проведении первичного расследования причин отказов, определяется ответственная за отказ сторона, данные передаются в КАСАНТ в виде электронного протокола разбора отказов. Информация о потоке отказов является исходной для устранения первопричин системных отказов после вторичного расследования и определения коренной причины. Модель реализует принцип постоянного улучшения (цикл PDCA). Дополнительно в системе управления необходима инкапсуляция математических методов управления.

Ключевые слова: локомотивы, техническое обслуживание и ремонт, автоматизированная система управления, киберфизическая модель.

Igor K. Lakin

JSC "Transmashholding", Moscow, the Russian Federation

AUTOMATED CYBER-PHYSICAL RELIABILITY MANAGEMENT SYSTEM FOR LOCOMOTIVES SERVICE

Abstract. The quality of the transportation process largely depends on the locomotives reliable operation. Therefore, in modern railway transport automated control systems (ACS), it is necessary to establish subsystems for managing the traction rolling stock reliability. Information for reliability management appears and is used by various automated control systems, the interaction between which is provided by an interoperable connection. As a result, a cyber-physical production system (CPPS) is being created based on the fourth industrial revolution «Industry 4.0» principles. The influence of the locomotives technical condition on the quality of the transportation process is determined in the automated Control System "Schedule of completed movement" (GID). Failures recorded on the schedule thread are sent to the reliability management system of Russian Railways KASANT hardware, from where they are transmitted to the service company incident and failure management system. Similarly, the service company receives information about the locomotives operation (mileage) and diagnostic data from on-board locomotives microprocessor systems. Based on these data, as well as data from depot automated technical diagnostics systems, the volume is determined and maintenance and repair (MRO) is carried out – scheduled preventive and unplanned restoration. Work is being assigned, materials are being discharged from the warehouse, and resources are being planned for subsequent MRO. MRO data is used during the initial investigation of the causes of failures, the party responsible for the failure is determined, and the data is transmitted to KASANT in the form of an electronic protocol for analyzing failures. Information about the failure stream is the initial source for eliminating the root causes of system failures after a secondary investigation and determining the root cause. The model implements the principle of continuous improvement (PDCA cycle). Additionally, the control system requires the encapsulation of mathematical control methods.

Keywords: locomotives, maintenance and repair, automated control system, cyber physical model.

В литературе про современные принципы построения автоматизированных систем управления (АСУ) промышленными предприятиями часто говорят как о создании киберфизических производственных систем (CPPS – Cyber Physical Production Systems) [1] в рамках четвертой промышленной революции «Индустрия 4.0». Полагают, что первые три революции связаны с началом использования паровых машин, электричества и электроники. Применительно к локомотиву – это механические и пневматические системы управления паровозом, локомотивы с электроприводом (электровозы и тепловозы), современные локомотивы с микропроцессорными системами управления (МСУ). Применительно к железнодорожному транспорту в целом – это механические системы блокировок и управления движением поездов, электрические схемы блокировки и электрические пульта управления станциями, микропроцессорные системы централизованного диспетчерского контроля и управления. Следующий, четвертый этап – это объединение различных АСУ и МСУ в единую CPPS-модель. Применительно к локомотивам это взаимодействие с локомотивом в режиме online по радиоканалу для получения диагностических данных с борта (скорость, ток, показания светофора АЛСН, наличие отказов, состояние бригады, др.) и передача управляющей информации на борт (график движения, ограничения скорости и остановки, расстояние до впереди идущего поезда и др.).

Развитию IT-систем на базе ПК способствовала параллельная работа большого числа авторских коллективов. Но это привело и к несовместимости отдельных АРМ и АСУ – эта проблема на этапе четвертой промышленной революции характерна во всем мире. Создать единую АСУ практически невозможно: разработка, отладка и внедрение единой АСУ занимают пять лет, а смена IT-поколений происходит каждые 18 месяцев (закон Мора) – АСУ всегда будет устаревшей. Создание отдельных взаимодействующих по заданным правилам IT-систем частично снимает проблему. Именно поэтому мир идет по пути создание CPPS-моделей.

Быстрое развитие информационных технологий, трудоемкость сопровождения информационной сети в условиях депо привели к тому, что АСУ депо как таковой на отечественных железных дорогах не было и нет: сервер депо сразу устанавливался в ИВЦ дорог. АСУ локомотивного комплекса (АСУТ) сразу возникла как сетевая и сразу как интероперабельная, т. е. как киберфизическая, взаимодействующая со смежными АСУ.

Аналогичные процессы создания CPPS касаются и АСУ системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР) локомотивов: происходит переход от отдельных автоматизированных рабочих мест (АРМов) к единой АСУ ТОиР, взаимодействующей со смежными АСУ (прежде всего АСУЖТ [2]), а также с бортовыми МСУ локомотивов для определения отказов и предотказных состояний, нарушений режимов работы локомотива, наработки с целью планирования объема ТОиР и необходимых ресурсов.

Разработка АСУ ТОиР началась с самого «узкого» места – определения технического состояния пришедшего на ТОиР локомотива. К сожалению, основным источником информации остается бортовой журнал замечаний машиниста формы ТУ-152. Автоматизация этого журнала происходит медленно (есть наработки у компании СТМ), хотя в кабине машиниста есть бортовой компьютер, на котором можно реализовать соответствующее программное обеспечение. По-прежнему в ремонтном депо приходится диагностировать отказ по трудно расшифровываемым замечаниям машиниста: «Броски тока», «Нет мощности дизеля», «Срабатывает защита», «Не собирается схема» и др. Выходом следует считать использование диагностических данных бортовых микропроцессорных систем управления, которые появились на локомотивах в самом конце XX в.

МСУ для управления используют данные с пульта машиниста и датчиков: скорости, частоты вращения, напряжения, тока, давления, температуры и др. Диагностическая информация выводится на экран бортового компьютера («блока индикации», БИ). Почти сразу появилось техническое решение для сохранения этих данных на жестком диске БИ. Стало возможным перед ТОиР с помощью flash-накопителя считать данные МСУ для поиска отказов

и предотказных состояний с планированием сверхцикловых работ по восстановлению работоспособности локомотива. Дополнительно выявляются случаи нарушения режимов эксплуатации (НРЭ) для определения ответственной за отказ стороны и для проведения дополнительных профилактических работ. В настоящее время ведутся работы по передаче данных по радиосвязи в режиме online, в т.ч. при помощи системы «Ковчег» ОАО «РЖД». Эта работа была развернута в компании «Трансмашхолдинг» (ТМХ) с 2012 г. [4 – 8].

Вначале для диагностирования по данным МСУ использовались доработанные в части автоматического диагностирования программы тестирования производителей МСУ – компании ЛЭС и ВНИКТИ: программы позволяли просмотреть данные в виде осциллограммы (рисунок 1). По опыту сервисных компаний добавлены алгоритмы диагностики [5, 6]. Первые программы были привязаны к типу МСУ. В ТМХ разработан АРМ «Умный локомотив» для диагностирования по данным всех видов МСУ: МСУД и МПСУ электровозов, МСУ-ТП и МСУ-ТА тепловозов, УСТА, УСАВП, БОРТ и др. АРМ позволяет как эргономично с настройкой под решаемую задачу просматривать данные, так и автоматически производить диагностирование с дальнейшей автоматической передачей данных в АСУ ТОиР [7].

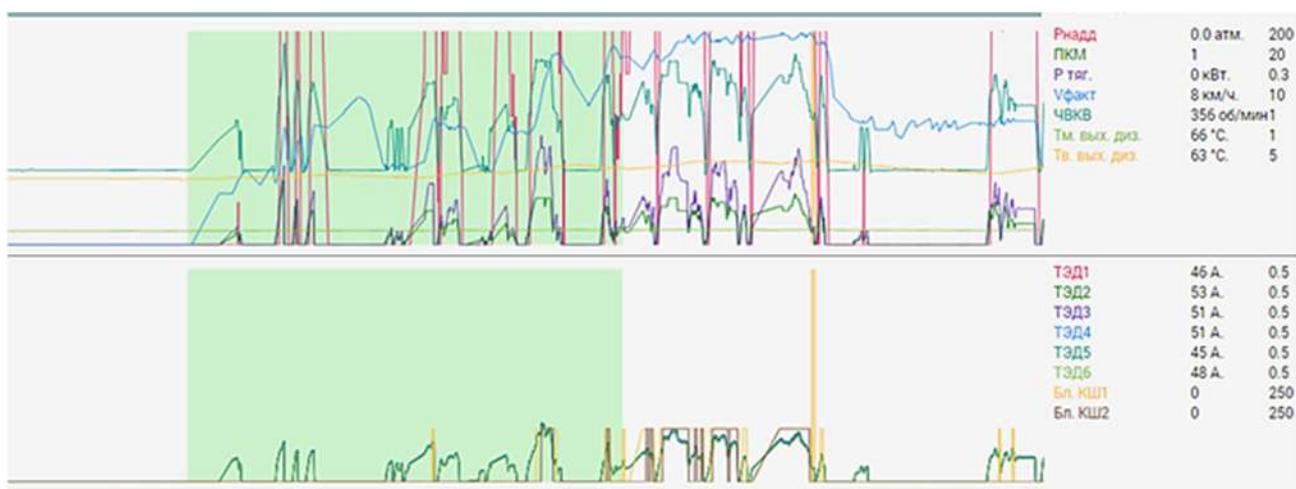


Рисунок 1 – Скриншот осциллограммы расшифровки данных МСУ в АРМ «Умный локомотив»

Типовые нарушения режимов эксплуатации определялись эмпирически, для чего в сервисных локомотивных депо (СЛД) сервисной компании ЛокоТех (вначале – ТМХ-Сервис) сверх штата созданы группы диагностики. По накопленному опыту в ОАО «РЖД» издано распоряжение с каталогом типовых НРЭ и отказов, к которым они могут приводить. Первым обнаруженным и теперь устраненным НРЭ стал запуск на БАМ тепловозов серий ТЭ10 без прокачки масла (на новых тепловозах стоит защита в МСУ). Самым массовым и опасным НРЭ на сегодня можно считать нарушение скоростного режима (медленная езда) с тяжеловесным поездом на руководящем подъеме, приводящем к перегреву тяговых электродвигателей (ТЭД) с дальнейшим пробоем изоляции. Часто встречаются следующие НРЭ: многократное восстановление защиты при срабатывании быстродействующего выключателя, проезд нейтральной ставки с включенной аппаратурой, продолжительная работа дизеля на холостых оборотах (свыше 30 мин), боксование, отсутствие продувки при отрицательных температурах, отключение мотор-вентиляторов на выбеге и др.

Отказы как потеря работоспособности определяются в МСУ относительно легко: отключенные ТЭД, неправильный сбор схемы, отсутствие реакции системы управления на действия машиниста, выход температуры выхлопа цилиндров дизеля за допуски, несоответствие мощности на позиции дизеля нормативу, давление за пределами допуска и др. Дополнительно применены методы распознавания образов искусственного интеллекта (ИИ), но первые результаты оказались отрицательными: сообщение типа «ПСН откажет с вероятностью 70 %» мало информативно, не понятны действия при ТОиР. Безусловно, ИИ даст результаты по мере накопления статистики и совершенствования алгоритмов.

Предотказные состояния определяются обычно по тренду значений параметров в сторону границ допуска. Яркий пример – тренд времени срабатывания электрических аппаратов от допустимых 200 мс к недопустимым 500 мс, по которым в СЛД «Барабинск» научились диагностировать разрушение резиновой прокладки электропневматического контактора. Другие характерные тренды: температура выхлопа цилиндра или охлаждающей жидкости дизеля, разброс токов параллельно работающих ТЭД и т. п.

Вторым объективным источником диагностической информации о техническом состоянии оборудования локомотивов являются деповские переносные и стационарные АСТД [3], главными из которых на сегодня являются станции реостатных испытаний дизель-генераторных установок, вибродиагностика экипажной части локомотива, измерение профиля бандажа и его толщины, измерение сопротивления изоляции и др. Кроме диагностирования на локомотиве используются стационарные стенды в специализированных цехах.

Основным источником данных об отказах локомотивов является АСУ «КАСАНТ» ОАО «РЖД». Поездной диспетчер, работая в АСУ «График исполненного движения» (ГИД Урал), в случае необходимости на «нитке» графика исполненного движения поезда делает отметку об отказе перевозочного процесса (остановка или задержка поезда), причиной которого может быть отказ технических средств: локомотивное или вагонное хозяйство, СЦБ, путевое хозяйство, электроснабжение и др. Информация автоматически поступает в КАСАНТ. В ТМХ налажено периодическое считывание информации КАСАНТ в АСУ ТОиР через интер-оперательное взаимодействие.

Первая и одна из главных ИТ-систем ОАО «РЖД» АСОУП лежит в основе работы ГИД Урал. В АСОУП фиксируется хронология движения поездов, состоящих из состава и локомотива. Таким образом, в системе имеется информация о статусе каждого локомотива – предусмотрено более 100 статусов. Для ТОиР важным является перевод локомотива из эксплуатируемого парка (ЭП) в неэксплуатируемый (НЭП): в статус ожидания планового или непланового (НР) ремонта с последующим переводом в статус собственно ремонта. Регистрация НР в АСОУП – важный источник информации об отказе. АСОУП также является источником информации о пробеге локомотивов, хотя использование данных бортовой системы КЛУБ-У было бы точнее, так как были бы учтены маневровые передвижения по станции и локомотивным депо.

Таким образом, главными автоматизированными источниками информации об отказах локомотивов являются бортовые МСУ, деповские АСТД, системы «КАСАНТ» и «АСОУП». Поэтому первой задачей АСУ ТОиР является принять эту информацию и отследить выполнение ТОиР согласно плану цикловых работ, а также дополнительных сверхцикловых работ для устранения выявленных отказов и восстановления работоспособности оборудования и локомотива в целом.

Для практического использования данных бортовых МСУ и деповских АСТД в ремонтных локомотивных депо должна быть ИТ-система поддержки принятия решений и контроля выполнения ТОиР. Такой АРМ «Диагностическая карта» создан в ТМХ и стал единой точкой входа всех замечаний: как ручных из бортового журнала ТУ-152, из акта приемки локомотива на ремонт формы ТУ-162, от мастера в процессе ТОиР, так и автоматически поступающих с бортовых МСУ и деповских АСТД. Во взаимодействии с АРМами Мастера, Склада, Кадры (ОТиЗ) и др. в ТМХ создана АСУ ТОиР, получившая название «Сетевой график» (АСУ СГ). По международной классификации это ERP- и MES-система. Поэтому АСУ СГ создана на платформе 1С для стыковки АСУ СГ с другими подсистемами АСУ СЛД. Все 85 СЛД ЛокоТех работают на единой базе данных общего сервера. 1С-платформа ЛокоТех – самая крупная инсталляция 1С в стране.

Результатом работы АСУ СГ является не только регистрация всех израсходованных в процессе ТОиР ресурсов, но и регистрация всех отказов локомотива, первичный анализ которых выполняется в АРМ инженера по безопасности движения (АРМ ИБД), который в настоящее время является самым полным и достоверным источником информации от отказов

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

локомотивов производства ТМХ: Новочеркасский электровозостроительный завод НЭВЗ (группы серий ВЛ80, ВЛ85, ВЛ65, ЭП1, ЭС4К, ЭС5К и др.), Коломенский завод КЗ (серии ТЭП70, ТЭП70БС, ЭП2К), Брянский машиностроительный завод БМЗ (группы серий тепловозов ТЭМ18, ТЭ25КМ, ТЭ25К2М, ТЭ28 и др.). Информация доступна как в виде реестра отказов (рисунок 2), карточки расследования (рисунок 3), так и через специально разрабатываемые online-отчеты по технологии дашбордов MS Power BI (рисунок 4).

Тип расследования	Код расследования	ИД отказа	Статус расследования	Серия	Локомотив	Место ремонта	Место расследования	Дело приписки	Вина	Ответственное предприятие	
●	НР	A02930254		Расследование НР 06...	ЗЭС5К	0639	Чита-1	Чита-1	Чита	ЖДРМ	Улан-Удзский ПВ...
●	НР	A02930257	13 911 286	Расследование НР 12...	ЗЭС5К	1280	Чита-1	Чита-1	Улан-Удз	ЛТС	Нижеудинское
●	НР	A02930258		Расследование НР 01...	ВЛ85	0110	Чита-1	Чита-1	Нижеудинск	РЖД	Чита
●	НР	A02930350		Расследование НР 02...	ВЛ85	0241	Нижеудинское	Нижеудинское	Нижеудинск	ЛТС	Нижеудинское
●	НР	A02930689		Расследование НР 00...	ЗЭС5К	0045	Нижеудинское	Нижеудинское	Иркутск	ЖДРМ	Улан-Удзский ПВ...
●	НР	A02930721		Расследование НР 33...	ТЭ210МК	3330	Новый Ургал	Новый Ургал	Новый Ургал	ЛТС	Новый Ургал
●	НР	A02930725		Расследование НР 16...	ТЭМ18ДМ	1662	Новый Ургал	Новый Ургал	Новый Ургал	ЛТС	Новый Ургал
●	НР	A02930772		Расследование НР 02...	ТЭ25КМ	0293	Комсомольск-С...	Комсомольск-Сорти...	Комсомольск-на-Ам...	ЛТС	Амурское
●	НР	A02930793		Расследование НР 26...	ТЭ210М	2680	Сольвычегодск	Сольвычегодск	Котлас	ЛТС	Сольвычегодск
●	НР	A02930796		Расследование НР 03...	ТЭ211ВУ	0302	Астраханское С...	Астраханское СПД	Астрахань-2	ЛТС	Ершовское СПД
●	НР	A02930853		Расследование НР 02...	ТЭП70БС	0204	Краснодар	Краснодар	Гудермес	ЛТС	Краснодар

Рисунок 2 – Реестр отказов АРМ ИБД

Переопричная заезда на НР: по причине разжижения масла на секции «А».

1. Место отказа 2. Отказавшее оборудование 3. Виновое оборудование 5. ТУ-283 6. Расследование с заказчиком 7. Определение технической причины 8. Проверка ТМХ 9. Данные из АРМ ДК 10. Гарантия 11. Актрия Дополнительно Оборудование АС ЭП

Группа оборудования: Двигель и дизельное оборудование локомотивов Узел: Узел по серии: Феррунка

Вид оборудования: Феррунка топливной системы Модель: Деталь по серии: Наконечник растопителя сопловой

Оборудование по серии: Дизель ДГУ 18-9ДГ Порядковый заводской №: 1566

Положительное обозначение: 9 Положительное обозначение: 16

Заводской изготовитель: Коломенский завод Заводской изготовитель: Коломенский завод

Поставщик: Поставщик: Поставщик: Поставщик:

Номер чертежа: 18-9ДГ.000 Номер чертежа: Д49 Б50Л-1-15

Дата изготовления: 19.03.2019 Дата изготовления: 19.03.2019

Дата изготовления: 19.03.2019

Характер неисправности: неисправен С заменой оборудования: Сведения о последнем ремонте: Дата последнего ремонта: Место последнего ремонта: Последний вид ремонта: Пробег с последнего ремонта, км(ч):

Рисунок 3 – Карточка расследования отказа АРМ ИБД

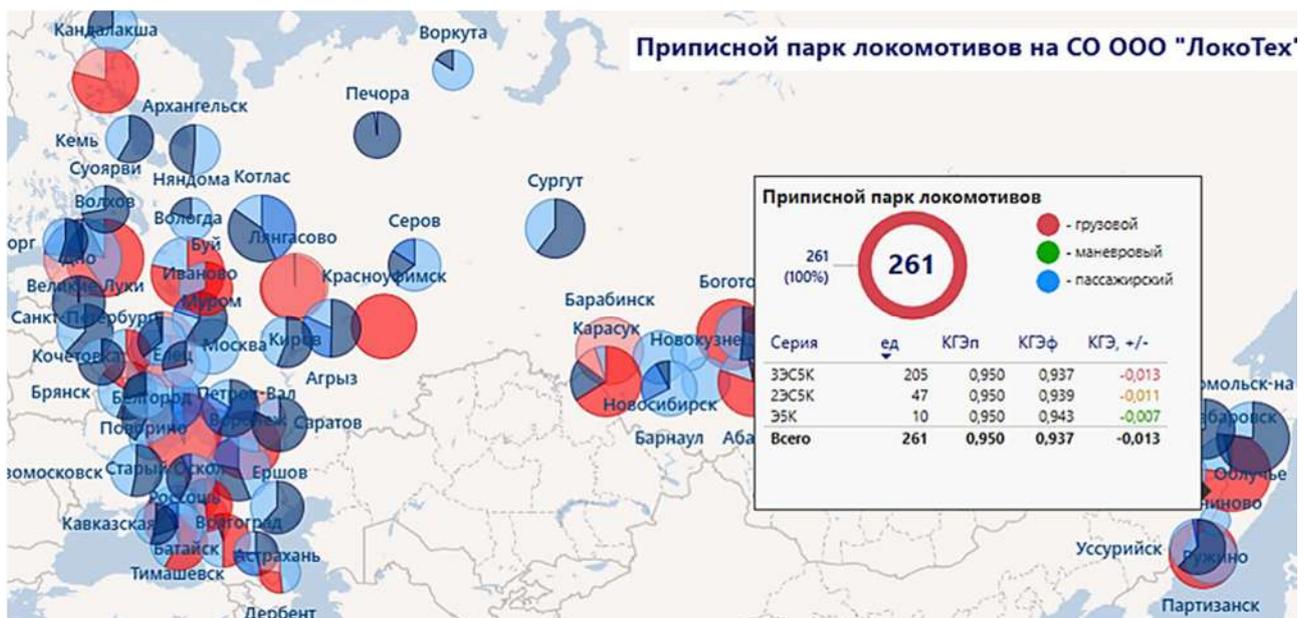


Рисунок 4 – Пример online-отчета АРМ ИБД

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

По окончании первичного расследования в АРМ ИБД информация автоматически поступает в систему управления проблемами АРМ «Дорожные карты» (АРМ ДК), где по каждому отказавшему оборудованию автоматически создается запись и идет накопление числа отказов этого оборудования. Если отказ определенного типа признан системным (автоматически, если отказов 10 и более за последние 12 месяцев) или критическим (вручную из-за резонансных последствий, высокой стоимости ремонта, др.), то начинается устранение проблемы в несколько последовательных этапов: определение корневой причины проблемы, разработка технического решения устранения проблемы, разработка плана первоочередных и корректирующих мероприятий (дорожных карт) для устранения проблемы, контроль эффективности дорожной карты.

Аналогичное расследованию в АРМ ИБД ТМХ выполняется расследование в КАСАНТ ОАО «РЖД». На совместных совещаниях ТМХ, НИИАС, ПКБ ЦТ, Дирекции тяги и Департамента технической политики ОАО «РЖД» принято решение создать интегрированную систему АРМ ИБД и КАСАНТ, суть которой заключается в следующем: по данным АСУЖТ в АРМ ИБД фиксируются все отказы локомотивов с последующим проведением первичного расследования и вторичного с последующим устранением проблемы в АРМ ДК. Информация из АРМ ИБД передается в КАСАНТ в Электронный протокол разбора причин отказа и определения виновной стороны. Передаются данные об отказавшем оборудовании, описание ТОиР, а также мнение сервисной компании об обстоятельствах инцидента и ответственной стороне. В эксплуатационном депо вводится дополнительная информация, описание обстоятельств инцидента по мнению депо, а также указывается ответственная сторона по мнению депо. После утверждения расследования электронной подписью со стороны эксплуатационного локомотивного депо вся информация поступает в КАСАНТ и расследование заканчивается. В случае наличия системных разногласий по обстоятельствам отказа и ответственной стороне создается комиссия с участием независимых экспертов для определения истинной причины отказов и прекращению разногласий.

Таким образом, автоматизированная CPPS-система управления надежностью должна функционировать следующим образом (рисунок 5).



Рисунок 5 – Киберфизическая модель управления надежностью локомотивов

Влияние технического состояния локомотивов на качество перевозочного процесса определяется в АСУ «График исполненного движения». Отказы, зафиксированные на нитке графика, поступают в систему управления надежностью технических средств РЖД КАСАНТ, откуда интероперабельной связью передаются в систему управления инцидентами и отказами

сервисной компании (в ТМХ это АРМ ИБД). Аналогично в сервисную компанию поступают информация о работе локомотивов (прежде всего – пробеги) и данные МСУ. На основании этих данных, а также данных деповских АСТД определяется объем и проводятся ТОиР – планово-предупредительный и неплановый восстановительный. Назначаются работы, выписываются материалы со склада, планируются ресурсы на последующие ТОиР. Данные о ТОиР используются при проведении первичного расследования причин отказов, определяется ответственная за отказ сторона, данные передаются в КАСАНТ через эксплуатационное депо в виде электронного протокола разбора отказов. Информация о потоке отказов является исходной для устранения первопричин отказов после вторичного расследования и определения корневой причины. Модель реализует принцип постоянного улучшения Эдварда Деминга (цикл PDCA) [9]. Созданная система взаимодействия КАСАНТ и АСУ сервисной компании является первым опытом киберфизического взаимодействия АСУ ОАО «РЖД» и АСУ сторонних организаций.

Инкапсуляция математических методов требует прежде всего внедрения вероятностно-статистических методов управления с проверкой достоверности исходных данных на их унимодальность, исключения использования средних данных при отсутствии подчинения их одному из законов распределения случайной величины. Например, при заказе запасных частей (тормозных колодок, электрических щеток, форсунок и др.) для ТОиР правилом «трех сигм» [9] пользоваться только при нормальном законе распределения исходных данных. Расчет трендов, прогнозирование надежности, потребных запасных частей, ремонтных позиций, персонала и технологического оборудования – все должно быть статистически достоверным и использовать методы управления теории массового обслуживания (теории очередей). Следует отметить, что вероятностно-статистические методы в практическую работу можно внедрить только через их инкапсуляцию – конечный пользователь должен видеть просто выделение цветом недостоверных данных или через простые рекомендации.

Важным представляется внедрение методов теории нечетких множеств. По-прежнему при принятии решений используются жесткие правила: поезд массой 7200 т является тяжеловесным, а 7199 т – нет. Интенсивность отказов в 10 отказов на миллион километров считается нормой, а 10,1 – нет. Езда с часовым током 61 мин, превышение скорости на 0,1 км/ч, перепростой на 1 мин – все это подпадает под термин «нарушение». Автор многократно сталкивался с принятием некачественных управленческих решений из-за терминологии. Использование нечетких понятий, в т. ч. функций принадлежности параметров ремонта к различным множествам и автоматическим расчетам рисков в АСУ – важное направление инкапсуляции.

Методы искусственного интеллекта, в т. ч. распознавания образов являются очень важными для автоматизации технологических процессов. Это отдельное направление работ должно стать одним из основных в дальнейшем развитии. Однако надо отметить, что сейчас наблюдается явная переоценка возможностей ИИ. Надо взвешенно подходить к их внедрению. С задачами диагностики по данным МСУ ИИ пока справляется плохо, в т. ч. из-за требования накопления тысяч примеров статистических данных. Отказы локомотивов часто не имеют такого объема данных, а вот распознавание текста в pdf-файлах (особенно созданных в Word), проверка соответствия приложенного материала рассматриваемой теме (например, по поиску названия депо, серии и номера локомотива, дат) – уже под силу.

Перспективным направлением работ должно стать дальнейшее объединение АСУ и АРМов в единую CPPS-систему. Направление требует кропотливой работы по гармонизации классификаторов и нормативно-справочной информации, соблюдения требований информационной безопасности, обеспечения целостности, доступности и защищенности данных.

Список литературы

1. Киберфизические производственные системы (CPPS) // janberg.by : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://janberg.by/kiberfizicheskie-proizvodstvennye-sistemy-cpps/> (дата обращения: 28.11.2025).

2. Комплексная автоматизированная система управления железнодорожным транспортом (АСУЖТ) / под ред. А. П. Петрова. – Москва : Транспорт, 1977. – 599 с. – Текст : непосредственный.

3. Лакин, И. К. Разработка теории и программно-технических средств комплексной автоматизированной справочно-информационной и управляющей системы локомотивного депо : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Лакин Игорь Капитонович ; Московский гос. ун-т путей сообщения. – Москва, 1997. – 377 с. – Текст : непосредственный. – EDN NLKJKL.

4. Лакин, И. И. Математические методы проверки достоверности данных о надежности локомотивов, их эксплуатации и техническом обслуживании / И. И. Лакин, В. А. Мельников. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 2 (50). – С. 66–73. – EDN LLSVCF.

5. Аболмасов, А. А. Управление техническим состоянием тягового подвижного состава в условиях сервисного обслуживания : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Аболмасов Алексей Александрович ; Российский ун-т транспорта. – Москва, 2017. – 180 с. – Текст : непосредственный. – EDN TUNARW.

6. Мельников, В. А. Совершенствование методов диагностирования тепловозов 2ТЭ116У с применением данных бортовых систем управления : специальность 2.9.3 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Мельников Виктор Александрович ; Российский ун-т транспорта. – Москва, 2022. – 210 с. – EDN CFRVMO.

7. Патент № 2569216 С2 Российская Федерация, МПК В61К 11/00. Способ управления обслуживанием и ремонтом тягового подвижного состава железнодорожного транспорта и система для его осуществления : № 2013147471/11 : заявлено 24.10.2013 : опубликовано 20.11.2015 / Липа К. В., Гриненко А. В., Лянгасов С. Л., Лакин И. К., Аболмасов А. А., Мельников В. А. ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «ТМХ-Сервис». – 14 с. – Текст : непосредственный. – EDN LXIPSB.

8. Семченко, В. В. Диагностирование систем управления электровозов переменного тока с тиристорными преобразователями : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Семченко Виктор Васильевич ; Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения. – Хабаровск, 2010. – 199 с. – Текст : непосредственный. – EDN QEZWCF.

9. Деминг, Э. Выход из кризиса: Новая парадигма управления людьми, системами и процессами / Э. Деминг ; пер. с англ. – Москва : Альпина Бизнес Букс, 2007. – 370 с. – Текст : непосредственный.

References

1. *Kiberfizicheskie proizvodstvennye sistemy (CPPS)* [Cyber-Physical Production Systems (CPPS)]. Available at: <https://janberg.by/kiberfizicheskie-proizvodstvennye-sistemy-cpps/> (accessed 28.11.2025).

2. Petrov A.P. ed. *Kompleksnaia avtomatizirovannaia sistema upravleniia zheleznodorozhnym transportom (ASUZHT)* [Integrated automated railway transport management system]. Moscow, Transport Publ., 1977, 599 p. (In Russian).

3. Lakin I.K. *Razrabotka teorii i programmno-tekhnicheskikh sredstv kompleksnoi avtomatizirovannoi spravochno-informatsionnoi i upravliaiushchei sistemy lokomotivnogo depo* (Development of theory and software and hardware of an integrated automated reference, information and control system of a locomotive depo). Doctor's of Sciences in Engineering thesis, Moscow, Moscow State University of Railway Engineering, 1997, 377 p. EDN NLKJKL. (In Russian).

4. Lakin I.I., Melnikov V.A. Mathematical methods for reliability verification of data on reliability of locomotives, their operation and maintenance. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2022, no. 2 (50), pp. 66-73. EDN LLSVCF. (In Russian).

5. Abolmasov A.A. *Upravlenie tekhnicheskim sostoianiem tiagovogo podvizhnogo sostava v usloviakh servisnogo obsluzhivaniia* (Management of the technical condition of traction rolling stock under maintenance conditions). Doctor's thesis, Moscow, RUT (MIIT), 2017, 180 p. EDN TUNARW. (In Russian).

6. Melnikov V.A. *Sovershenstvovanie metodov diagnostirovaniia teplovozov 2TE116U s primeneniem dannykh bortovykh sistem upravleniia* (Improvement of methods for diagnosing 2TE116u diesel locomotives using data from on-board control systems). Doctor's thesis, Moscow, RUT (MIIT), 2022, 210 p. EDN CFRVMO. (In Russian).

7. Lipa K.V., Grinenko A.V., Lyangasov S.L., Lakin I.K., Abolmasov A.A., Melnikov V.A. *Patent RU 2569216 C2*, 20.11.2015.

8. Semchenko V.V. *Diagnostirovanie sistem upravleniia élektrovozov peremennogo toka s tiristornymi preobrazovateliami* (Diagnostics of control systems of alternating current electric locomotives with thyristor converters). Doctor's thesis, Khabarovsk, FESTU, 2010, 199 p. EDN QEZWCF. (In Russian).

9. Deming E. *Vykhod iz krizisa: Novaia paradigma upravleniia liud'mi, sistemami i protsessami* [Overcoming the crisis: A new paradigm for managing people, systems, and processes]. Moscow, Alpina Business Books Publ., 2007, 370 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Лакин Игорь Капитонович

АО «Трансмашхолдинг».

Ефремова ул., д. 10, г. Москва, 119048, Российская Федерация.

Доктор технических наук, начальник ситуационно-аналитического центра мониторинга и реагирования.

Тел.: +7 (985) 340-01-21.

E-mail: ik.lakin@tmholding.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Lakin Igor Kapitonovich

JSC "Transmashholding".

10, Efremova st., Moscow, 119048, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, head of the Situational Analysis Center for Monitoring and Response.

Phone: +7 (985) 340-01-21.

E-mail: ik.lakin@tmholding.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Лакин, И. К. Автоматизированная киберфизическая система управления надежностью локомотивов сервисного обслуживания / И. К. Лакин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 4 (64). – С. 126 – 134.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Lakin I.K. Automated cyber-physical reliability management system for locomotives service. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 4(64), pp. 126-134. (In Russian).

Уважаемые коллеги!

Редакция научно-технического журнала «Известия Транссиба» приглашает Вас публиковать результаты научных исследований по тематическим направлениям журнала, соответствующим специальностям Номенклатуры научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени, утвержденной приказом Минобрнауки России от 24 февраля 2021 г. № 118:

2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация;

2.9.4. Управление процессами перевозок;

2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог;

2.9.1. Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте;

2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника;

2.4.5. Энергетические системы и комплексы;

2.4.3. Электроэнергетика;

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы;

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Материалы просим высылать ответственному секретарю редакционного совета журнала Иванченко Владимиру Ивановичу по электронной почте: izvestia_transsiba@mail.ru.

Правила представления материалов научных статей в научно-технический журнал «Известия Транссиба»

В редакцию журнала представляются:

1. Текст статьи на бумаге формата А4.

2. Текст статьи в электронном виде (на любом носителе или по e-mail), имя файла определяется по фамилии первого автора: фамилия.doc или фамилия.docx.

3. Экспертное заключение о возможности публикации статьи в открытой печати (по форме, принятой в организации авторов).

4. Отчет о проверке на заимствования в системе «Антиплагиат» (<https://www.antiplagiat.ru/>). Оригинальность должна составлять не менее 80 %.

5. Гарантийное письмо о передаче авторского права с подписями всех соавторов статьи (образец прилагается).

6. Согласие на обработку персональных данных от каждого автора (соавтора) статьи (образец прилагается).

В тексте статьи обязательно указываются тематический раздел журнала, в который подается статья, и научная специальность, которой эта статья соответствует.

Текст статьи включает в себя УДК, ФИО авторов, аффилиацию авторов (место работы или учебы), заглавие статьи, аннотацию, ключевые слова на русском и английском языках, текст статьи, список литературы в русском и латинском алфавитах, сведения об авторах и библиографическое описание статьи на русском и английском языках.

Текст статьи оформляется в соответствии с установленным образцом.

Сведения об авторах включают в себя фамилию, имя, отчество, ученую степень, ученое звание, место работы с указанием почтового адреса, должность, контактные телефоны, e-mail для обратной связи.

Требования к аннотации статьи:

аннотация должна быть кратким точным изложением содержания статьи, включающим в себя основные фактические сведения и выводы описываемой работы;

текст аннотации должен быть лаконичен и четок, свободен от второстепенной информации, должен отличаться убедительностью формулировок;

сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте аннотации;

объем аннотации на русском и английском языках должен содержать от 200 до 250 слов;

аннотация на русском и английском языках должна включать в себя следующие аспекты содержания статьи: предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы;

дополнительно англоязычная аннотация должна быть: оригинальной (не быть калькой русскоязычной аннотации); содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье); «англоязычной» (написанной качественным английским языком); необходимо использовать активный, а не пассивный залог.

Требования к рукописи статьи:

рукопись статьи должна содержать УДК (в левом верхнем углу, обычный, 12 пт), инициалы и фамилию на русском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на русском языке (по центру, 10 пт), название статьи на русском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), инициалы и фамилию на английском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на английском языке (по центру, 10 пт), название статьи на английском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт);

текст статьи должен быть набран в редакторе Word, размер страницы – формат А4 (210 × 297 мм);

размер полей – 20 мм (все четыре поля), размер и тип шрифта основного текста – Times New Roman, 12 пт;

размеры символов в формулах (выполняются только в редакторе MathType): обычный – 12 пт, крупный индекс – 7, мелкий – 5, крупный символ – 15, мелкий – 12 пт; начертание и размер символов в расшифровке формул по тексту должны в точности совпадать с начертанием и размером символов в самой формуле; при записи формул следует использовать значок градуса (°), а не цифру «ноль» (0); следует использовать знак умножения (×), а не букву «х»; в качестве знаков препинания между словами используются тире (–), а не дефисы (·);

буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавитов, математические символы, такие как cos, sin, max, min, – прямым шрифтом;

текст в таблицах, подрисовочные подписи и названия таблиц набираются шрифтом Times New Roman, 10 пт; необходимо использовать французские кавычки («ёлочки»); межстрочный интервал одинарный, абзацный отступ – 0,75 см; автоматическую нумерацию необходимо полностью исключить; инициалы и фамилии всегда должны находиться на одной и той же строке; каждый рисунок дополнительно должен быть представлен в отдельном (исходном) файле в редактируемом виде; рисунки и таблицы должны иметь только книжную ориентацию;

после текста статьи следует список использованной литературы на русском языке и в латинском алфавите; ссылки на литературу в тексте статьи указываются арабскими цифрами в квадратных скобках; список использованной литературы на русском языке имеет заголовок *Список литературы* и оформляется по требованиям ГОСТ Р 7.0.100–2018; список использованной литературы в латинском алфавите имеет заголовок *References* и оформляется в соответствии с установленным образцом; при публикации научной статьи на русском или английском языке обязательным является наличие ключевых слов и аннотации на русском и английском языках.

Материалы статей, опубликованных ранее или переданных в другие издания, не принимаются.

Число авторов статьи не должно превышать трех человек, в ином случае необходимо отдельное согласование с редакцией. Рекомендуемый объем статьи – не менее пяти и не более 10 страниц без учета аннотации и списка литературы. В ином случае вопрос по объему статьи также необходимо согласовывать с редакцией. Иллюстрации, схемы и таблицы, включаемые в текст статьи, учитываются в общем объеме текста.

Авторы должны избегать повторения одних и тех же данных в таблицах, на графиках и в тексте статьи.

В случае представления двух или более статей одновременно необходимо указывать желательную очередность их публикации в разных выпусках журнала.

В случае возвращения статьи автору для устранения замечаний или для ее сокращения датой представления считается день получения редакцией окончательного текста.

Принятые к публикации материалы статей не возвращаются авторам.

Материалы, оформленные с нарушением указанных выше требований, не принимаются к публикации и не возвращаются.

Редакционный совет оставляет за собой право литературного редактирования статьи без согласования с авторами.

По всем вопросам, связанным с подготовкой, представлением и публикацией материалов статей, необходимо обращаться в редакцию журнала.

Научное издание

Научно-технический журнал «Известия Транссиба / Journal of Transsib Railway Studies»

№ 4 (64) 2025

Научно-технический журнал «Известия Транссиба / Journal of Transsib Railway Studies» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзором), регистрационный номер ПИ № ФС77-75780 от 23 мая 2019 г.

Номер ISSN – 2220-4245.

Подписной индекс в интернет-каталоге «Пресса по подписке» (www.akc.ru) – E28002.

Издание обрабатывается в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦа).

С июля 2011 г. журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Издание выходит с периодичностью 4 выпуска в год.

Цена свободная.

Редактор – Майорова Н. А.

Технический редактор – Иванченко В. И.

Адрес редакции (издательства) и типографии:
644046, Омская область, г. Омск, пр. Маркса, д. 35;
тел.: +7 (3812) 31-05-54;
e-mail: izvestia_transsiba@mail.ru

Подписано в печать 05.03.2026.

Формат 60 × 90/8.

Тираж 250 экз.

Дата выпуска: 11.03.2026.

