

научно-технический

ISSN 2220-4245
журнал

ИЗВЕСТИЯ

№ 1(53)

2023

Транссиба



РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

1. Овчаренко Сергей Михайлович – главный редактор, ректор ОмГУПС, д.т.н., доцент (Омск).
2. Галиев Ильхам Исламович – зам. главного редактора, президент ОмГУПС, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ (Омск).
3. Шантаренко Сергей Георгиевич – зам. главного редактора, проректор по научной работе 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 – заведующий кафедрой «Управление эксплуатационной работой» СГУПС, д.т.н., профессор (Новосибирск).
6. Ведрученко Виктор Родионович – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС, д.т.н., профессор (Омск).
7. Глинка ТADEUSZ доктор, профессор Силезского политехнического университета (Гливице, Польша).
8. Горюнов Владимир Николаевич – зав. кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГУТ, 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» ОмГУТ, д.ф.-м.н., профессор (Омск).
11. Исаков Александр Леонидович – зав. кафедрой «Изыскания, проектирование истройка железных и автомобильных дорог» СГУПС, д.т.н., профессор (Новосибирск).
12. Ким Константин Константинович – заведующий кафедрой «Электротехника и теплоэнергетика» ПГУПС, д.т.н., профессор (Санкт-Петербург).
13. Комяков Александр Анатольевич – профессор кафедры «Теоретическая электротехника» ОмГУПС, д.т.н., доцент (Омск).
14. Косарев Александр Борисович – первый заместитель генерального директора 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 – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС, д.т.н., профессор (Омск).
17. Никитин Александр Борисович – заведующий кафедрой «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» ОмГУТ, д.т.н., доцент (Омск).
21. Сидоров Олег Алексеевич – профессор кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПС, д.т.н., профессор (Омск).
22. Смердин Александр Николаевич – проректор по инновационному развитию ОмГУПС, д.т.н., доцент (Омск).
23. Солоненко Владимир Гельевич – профессор кафедры «Подвижной состав» АЛТ, д.т.н., профессор (Алматы, Республика Казахстан).
24. Файзибаев Шерзод Сабирович – профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» ПТрВ, 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 president 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, vice-rector by scientific work 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 – head of the department «Track Maintenance Management» of STU, D. Sc., 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 – head of the department «Power supply of industrial enterprises» of OSTU, 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 sciences» 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 «Electrical Engineering and Heat Power Engineering» of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, D. Sc., professor (St. Petersburg, Russia).
13. Komyakov Aleksandr Anatolevich – professor of the department «Theoretical electrical engineering» of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
14. Kosarev Alexander Borisovich – senior deputy of general director 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 – professor of the department «Heat-power engineering» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
17. Nikitin Aleksandr Borisovich – head of the department «Automation and telemechanics on railways» of PGUPS, D. Sc., professor (St. Petersburg, Russia).
18. Livshits Aleksandr 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 – vice-rector by innovation development of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
23. Solonenko Vladimir Gelyevich – professor of the department «Rolling stock» of ALT, D. Sc., professor (Almaty, Kazakhstan).
24. Fayzibaev Sherzod Sabirovich – professor of the department «Wagons and wagon facilities» of TSTU, D. Sc., professor (Tashkent, Uzbekistan).
25. Kharlamov Viktor Vasilyevich – head of the department «Electrical machines and common electrotechnics» 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

- Sandag G., Jamyan-Osor P., Natsag O. Definition of diagnostic parameters for locomotive diesel engines..... 2
- Жигулин Н. А., Пудовиков О. Е. Математическая модель объекта управления и модуля задачика напряжения СТПР-1000 для системы автоматического управления скоростью поезда с электровозом 2ЭС6..... 10
- Дурандин М. Г., Кузьминых И. А. Снижение тепловых нагрузок якорных обмоток тяговых электродвигателей локомотивов..... 19
- Жухин Н. О. Применение модели поезда для исследования работы системы автоведения..... 27

Управление процессами перевозок

- Азизов А. Р., Аметова Э. К. Метод математического моделирования организационно-технологической системы диагностирования микропроцессорных блоков наборной группы железнодорожной автоматики и телемеханики..... 36
- Соколов М. М., Ходкевич А. Г. Классификация состояния рельсовой цепи на основании значения ее входного сопротивления..... 45
- Бессоненко С. А., Гунбин А. А., Климов А. А., Корниенко К. И., Ольгейзер И. А., Шабельников А. Н. Исследование параметров основного удельного сопротивления движению вагонов при скатывании с сортировочной горки..... 53

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

- Абдурашитов А. Ю., Овчинников Д. В., Сычев В. П., Сычева А. В. Оценка напряженно-деформированного состояния рельсов при различных условиях эксплуатации на основе моделирования методом конечных элементов..... 62

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

- Тихонов Ю. Б. Модернизация процессов замены замедлителей и других работ на сортировочных горках..... 73
- Мухамедова З. Г., Эргашева З. В. Факторы, влияющие на использование контейнерных блок-поездов в Узбекистане..... 84
- Абдуллаев Б. А., Галимова Ф. С., Гайипов А. Б., Джаббаров Ш. Б. Инновационные основы технологии автономной перевозки скоропортящихся грузов..... 94

Теоретическая и прикладная теплотехника

- Слободина Е. Н., Михайлов А. Г., Гасс Е. А. Экспериментальные и расчетные исследования процесса кипения наножидкости..... 103

Энергетические системы и комплексы

- Гужов С. В. Развитие моделей и методов предиктивного анализа энергопотребления региональных объектов в условиях недостатка информации..... 110

Электротехнические комплексы и системы

- Малышев А. В. Моделирование системы векторного управления электродвигателем с аксиальным магнитным потоком..... 121
- Москалев Ю. В. Анализ схем соединения трехфазных вентильных обмоток выпрямительного трансформатора..... 130

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

- Петров В. В., Окишев А. С., Петров К. С. Автоматизация настройки системы магнитоиндукционных датчиков осей для диагностирования технического состояния подвижного состава на основе стохастического подхода..... 140

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»
Учредитель и издатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС (ОмИИТ))»
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35

Sandag Galbadrakh¹, Jamyan-Osor Purevsuren², Natsag Odgerel¹

¹ Ulaanbaatar Railway Institute, Ulaanbaatar, Mongolia;

² Mongolian University of science and technology, Ulaanbaatar, Mongolia

DEFINITION OF DIAGNOSTIC PARAMETERS FOR LOCOMOTIVE DIESEL ENGINES

Abstract. The paper aims to determine the diagnostic parameters for monitoring the technical condition of diesel engine 16ChN26/26 of diesel locomotive 2TE116Um used in the transportation of UB Railway JVC in Mongolia by the concentration (g/ton) of wear elements in used oil. The study and experiments were analyzed based on the results of measurements in used oil of 20 diesel engines during a period of maintenance within 5 – 6 years. The study was carried out in three main directions: to identify the concentration of wear elements and contaminants in used oil by spectral analysis, to study the wear degree of engine components in one period of maintenance, and to determine the diagnostic parameters of wear based on the concentration of wear elements and contaminants using the non-parametric statistical method. By using the diagnostic parameters determined as a result of the above study, it can be possible to perform the diesel engine maintenance based on the actual technical condition rather than the maintenance interval recommended by the manufacturer and increase the efficiency of the diesel engine maintenance system.

The diagnostic evaluation parameters established as a result of this study will enable technicians to perform diesel engine maintenance based on the actual technical condition of the engine, rather than relying solely on the manufacturer's recommended maintenance schedule. This approach has the potential to increase the efficiency of diesel engine maintenance and reduce the cost of repairs by addressing issues before they become significant. Ultimately, the proposed methodology could help to extend the lifespan of engines and improve their overall performance, resulting in significant benefits for the transportation and heavy-machinery industries.

Keywords: spectral analysis, maintenance interval, wear elements, diagnostic parameters, diesel engine.

Сандаг Г.¹, Жамъян-Осор П.², Нацаг О.¹

¹Улан-Баторский железнодорожный институт (УБЖ/ДИ), г. Улан-Батор, Монголия;

²Монгольский государственный университет науки и технологии (МГУНТ), г. Улан-Батор, Монголия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛОКОМОТИВОВ

Аннотация. В данной работе представлены результаты исследования для определения параметров технического состояния дизеля 16ЧН26/26 тепловоза 2ТЭ116Ум, эксплуатируемого на перевозках АО «Улан-Баторская железная дорога (УБЖД)», по концентрации элементов износа (г/т) в отработанном масле. Исследования и соответствующие тесты проводились в течение одного полного периода периодичности ремонта 20 дизелей, т. е. на протяжении пяти – шести лет. При проведении исследования рассматривались три основных аспекта: определение статистических показателей износа и концентрации загрязняющих элементов в отработанном масле методом спектрального анализа; анализ износа деталей двигателя за один период межремонтного цикла; использование статистического, а не параметрического метода для определения показателей диагностики износа. Использование вновь установленных диагностических критериев позволит поддержать пересмотр графика технического обслуживания дизельных двигателей исходя из их реального технического состояния.

Параметры диагностической оценки, установленные в результате этого исследования, позволят специалистам выполнять техническое обслуживание дизельного двигателя на основе фактического технического состояния двигателя, а не полагаться исключительно на рекомендованный производителем график технического обслуживания. Такой подход сможет повысить эффективность технического обслуживания дизельных двигателей и снизить затраты на ремонт путем решения проблем до того, как они станут значительными. В конечном счете предлагаемая методология сможет помочь продлить срок службы двигателей и улучшить их общую производительность, что приведет к значительным выгодам для транспортной и тяжелой промышленности.

Ключевые слова: спектральный анализ, периодичность ремонта, критерий диагностики, дизельный двигатель, отработанное масло, элементы износа.

Introduction. The intervals /frequencies/ of routine maintenance of planned preventive maintenance system is recommended by the manufacturer, taking into account the standard parameters /values/ for the reliable operation of a diesel engine and the conditions for performing the maintenance at the lowest cost [1]. Although this maintenance system has the advantage of improving the technical inspection /checking/ and ensuring the reliability performance, it also creates wasteful costs such as mandatory disassembly to inspect components and regular planned maintenance without taking into account the real condition of machinery.

The latest application in locomotive maintenance in the world is gradually moving to the non-dismantle methods for diagnostics on the technical condition of components and the condition-based maintenance system which allows for the reduction of wasteful costs. The International Organization for Standardization (ISO) specifies guidance to machinery condition monitoring and diagnostics as follows (table 1).

Table 1 – ISO standards for condition monitoring and diagnostics of machines

Machinery monitoring	ISO reference
Vibration	ISO 13373-1:2002; 13373-2:2005; 16587; 18436-2
Thermography	ISO 18434-1:2008; 18436-7
Acoustic emission and ultrasound	ISO 22906:2007; 29821-1:2011; 18436-6
Tribology-based monitoring and lubricant analysis	ISO 14830-1; 18436-5

Tribology in the tribology and lubricant analysis category analyzes wear degrees, while lubricant analysis determines the machinery technical condition by analyzing the state of the lubricant. Lubrication condition monitoring (LCM) has become an important factor in decision-making on engine maintenance systems and it can be seen from the increase in the number of research papers published in the last five years [9]. This monitoring consists of analysis of physical-chemical parameters in used oil of an engine, oil additives, contaminants and wear elements [5]. In particular, it is possible to get a lot of information from the accumulation of wear particles in used oil, such as the technical condition of the engine and the normal operation of the subsystems [2; 4; 6].

The manufacturers of diesel engines recommend following the operation instructions for use, which provide the physical-chemical and other parameters of lubricating oils. They have also developed standards for diagnosing the technical condition of an engine and determining the remaining useful life of components without disassembly using the parameters for the normal, abnormal, and critical limits of concentration of wear elements and contaminants in used oil during engine operation.

The parameters in GOST20759 standard are followed for determining the qualitative and quantitative variables (concentration) of wear elements in used oil of 16ChH26/26 diesel engine by spectral analysis method, diagnosis before damages and failures and estimation of wear degree and remaining useful life of components (table 2).

Table 2 – Limits of wear elements concentration for diesel engine diagnosis

Element	Symbol	Concentration			Components
		Normal	Abnormal	Critical	
Iron	Fe	<65	65-100	>100	Cylinder, Rings, Crankshafts, Gears, Rust
Lead	Pb	<15	15-20	>20	Bearings, babbitt
Aluminium	Al	<20	20-30	>30	Bearings camshaft
Copper	Cu	<50	50-100	>100	Bronze bushing
Chrome	Cr	<10	10-15	>15	Rings
Tin	Sn	<5	5-10	>10	Piston skirt

The diagnostic parameters of elements concentration given in the standard takes into account many factors, such as natural and climatic conditions, adjusted power of the engine, quality of technical servicing, schedule of oil change, addition of new oil [8;10].

One. Principles on determination of diagnostic parameters. The study aims to determine the diagnostic parameters for assessing the technical state of components by the concentration of wear elements, K present in the used oil of an engine. To achieve it, it is necessary to determine the critical value K_0 of the concentration of each wear element [3]. In other words, if $K \geq K_0$, the engine is not allowed to be used and it needs to be repaired, but if $K < K_0$, it is allowed to continue using it. Let's denote: D_1 the normal state of machinery, D_2 – the faulty state of machinery.

Then, if the decision rule or the diagnostic parameter is $K < K_0$, the state D_1 is accepted or valid, and if $K \geq K_0$, the state D_2 is accepted or valid. The functions of concentration density (figure 1) corresponding to D_1 as a normal state and D_2 as a faulty state are described as follows.

A faulty solution in diagnosis refers to a solution that does not correspond to the actual state of the diagnostic object. If, according to the diagnostic results, the state of the object is diagnosed as «faulty» (D_2), but according to the results of the examination, the state is assessed as «normal», then the false alarm or its probability is a first-type error, while the solution is «normal» and in reality it is «faulty», its probability is called the second type error respectively [2].

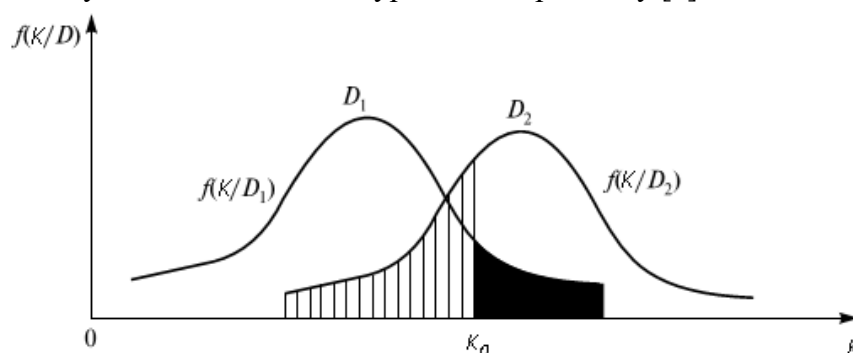


Figure 1 – The density function of diagnostic parameters in normal and faulty states

As mentioned above, C_1 and C_2 costs due to false alarms and errors not to detect the failure during technical diagnostics will occur. The cost estimation on an error is often not clear. While it is very difficult to determine it correctly, it is important to reduce the concerns to other errors as much as possible when any error is at a certain (acceptable) level.

According to the Neyman-Pearson approach, when the probability of a false alarm is at a given acceptable level, the probability of missing an error without detection is minimal.

$$P_1 \int_{K_0}^{\infty} f(K/D_1) dK \leq A. \quad (1)$$

Where: A – a given and acceptable level of the probability of false alarm; P_1 – the probability in a state of without faults.

The states given in (1) refers to the probability of a false alarm condition (no P_1 multiplier). It can be seen from Figure 1 that when an error of false alarm increases (section, K_0 has moved to the left), an error of missing a fault decreases.

$$P_1 \int_{K_0}^{\infty} f(K/D_1) dK = A. \quad (2)$$

Its minimum concern corresponds to the state of having the equal sign of the state given in (1) [2].

Two. Experimental result. The 16ChH26/26 diesel engine of a diesel locomotive was selected as an object of the study. The engine was produced by JSC “Kolomensky Zavod” in Russian Federation with 16 cylinders and a power of 2650 kW (figure 2).

The operation instruction recommends that M14G2Ts motor oil should be changed between every 50-100 thousand km, and M14D2 motor oil should be changed between every 75-150 thousand km, depending on the physical and chemical characteristics. According to the study of the oil consumption of the locomotive depot, about 70 % of the total oil was changed when it reached the maximum useful life of locomotives, about 20 % was changed when the oil was mixed with fuel and coolant, and about 10 % was changed in case of failure in the physical and chemical characteristics of the oil.

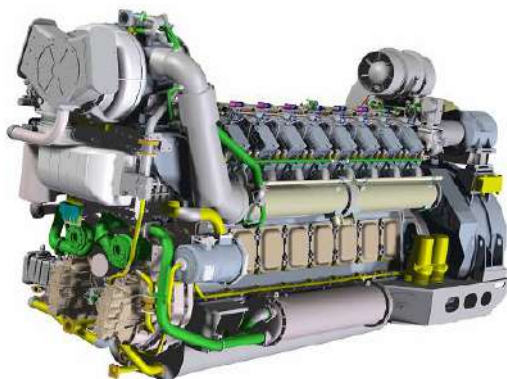


Figure 2 – 16XH26/26 diesel engine of diesel locomotive

2.1 Analysis on wear and wear rate in components of a diesel engine in one cycle of

maintenance. When the technical state of a diesel engine is diagnosed without disassembly with its lubricating oil, it is necessary to examine carefully whether the wear and wear intensity of the same type of components are different or not from each other. The fact that some components wear out faster than others (too different intensity of wear) is the condition for making wrong decisions on diagnostics.

Therefore, in accordance with the rule of our traditional scheduled preventive maintenance, the engine was disassembled, a number of observations /measurements/ were made through the routine maintenance (RM-2, RM-3), a statistical analysis was performed on the wear and its intensity (table 3), and the distribution law was predicted (table 4).

Table 3 – The statistical parameters of wear in diesel engine components

Detail	N	Average	Standard deviation	Standard error	95 % confidence interval of the mean		Minimum value	Maximum value	Variance of interference
					Less	More			
Piston Pins	128	0,025	0,013	0,0015	0,02	0,027	0,000	0,080	
Bronze bushing	128	0,131	0,043	0,003	0,12	0,138	0,075	0,260	
Crank Main journals	80	0,023	0,008	0,0005	0,05	0,055	0,040	0,070	
Crank pin journals	64	0,019	0,009	0,0007	0,04	0,050	0,030	0,060	
Cylinder liner	128	0,032	0,023	0,0015	0,02	0,035	0,000	0,105	
Connecting rod bronze bushing	64	0,111	0,020	0,0014	0,10	0,114	0,070	0,145	
Pin connecting rod	34	0,032	0,014	0,0012	0,03	0,035	0,005	0,080	
Total	1190	0,071	0,056	0,0014	0,06	0,073	0,000	0,330	
Model	No random effect		0,022	0,0005	0,06	0,072			
	Random effect			0,0187	0,02	0,114			0,003

Table 4 – The result of Kolmogorov-Smirnov and Shapiro-Wilk tests

Components	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistics	Degree of freedom	Negative probability	Statistics	Degree of freedom	Negative probability
Piston Pins	0,108	128	0,001	0,949	128	0,000
Piston bronze bushing	0,144	128	0,000	0,902	128	0,000
Crank Main journals	0,171	80	0,000	0,898	80	0,000
Crank pin journals	0,228	64	0,000	0,843	64	0,000
Cylinder liner	0,109	128	0,000	0,948	128	0,000
Connecting rod bronze bushing	0,156	64	0,000	0,936	64	0,000
Pin connecting rod	0,123	34	0,000	0,957	34	0,000

According to the statistics of the study on determining wear rate of diesel engine components, 0,05 – 0,2 mm of wear occurred in 95 % of components between every RM-2 maintenance, and 0,2 – 0,24 mm in 95 % of all types of bearings. Compared to the wear rate required to replace the components recommended in the rule for routine maintenance, there is a residual useful life of 0,7 – 0,85 percent.

When the wear values of the components are analyzed with the Kolmogorov-Smirnov and Shapiro-Wilk tests, it was determined that there is a normal distribution with a probability of 0,95. The normal distribution of the wear rate in the components shows that the wear and its intensity of all components are equal.

2.2 Diagnostic parameters. The experimental study was carried out in the oil of 20 engines of 10 diesel locomotives of 2TE116Um series through 319 tests during every technical maintenance TM, routine maintenance RM and every oil changes and in any other necessary cases.

The analysis on the used oil of an engine was carried according to the ASTM D6595 standard in the laboratory of Techonomics Mongolia LLC, a branch company of the Australian Techonomics International Company in Mongolia, which is accredited by the MNS/IES 17025 standard.

A model [7] was developed that can determine the amount of wear metals of components by the concentration of wear elements in engine oil. During the development of this model, it was assumed that the speed of the wear elements entering the oil and the filtration parameters are constant.

Diesel engine oil was completely changed 3-5 times or every 75,000 km on average depending on whether it can meet the physical and chemical specifications between routine maintenance of 16ChH26/26 engine (300,000 km). During the operation of the diesel locomotive, the total mileage (running) for complete change of oil was divided into periods I-IV, and the amount of the concentration of wear elements (g/ton) and its statistical parameters were determined by the spectral analysis in used oil (Table 5; Figure 3).

Table 5 – The statistical parameters of the concentration of wear elements in used oil in periods I-IV of locomotive mileage for the complete oil change

Sym	I			II			III			IV		
	Count	Aver	dis	Count	Aver	dis	Count	Aver	dis	Count	Aver	Dis
Fe	33,0	20,1	11,38	36,0	30,5	17,70	25,0	34,4	15,94	16,0	32,3	13,37
Pb	33,0	1,1	1,24	36,0	1,8	2,23	25,0	2,1	1,08	16,0	2,2	0,98
Al	33,0	3,8	1,79	36,0	4,9	2,48	25,0	5,4	2,48	16,0	5,2	1,60
Cu	33,0	2,0	1,29	36,0	3,7	2,29	25,0	4,3	3,17	16,0	6,3	4,63
Cr	33,0	1,0	0,82	36,0	1,7	0,99	25,0	1,9	1,44	16,0	2,5	1,38

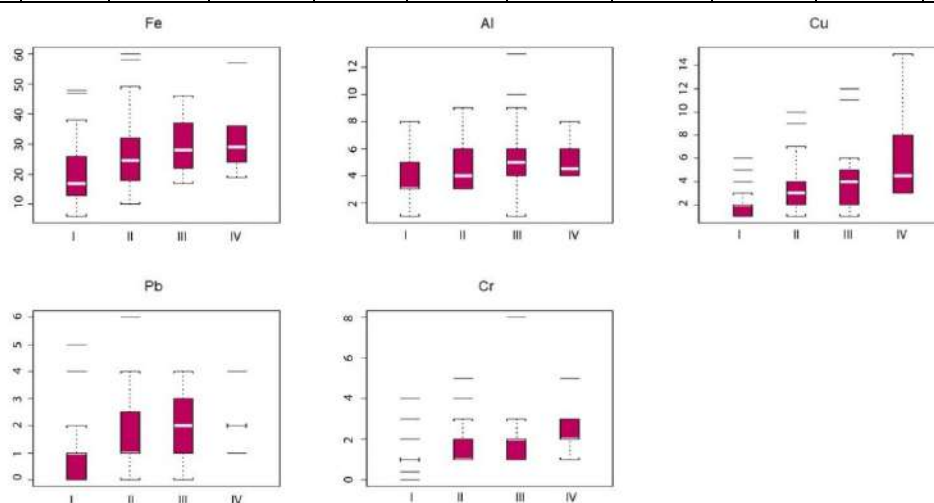


Figure 3 – The changes in the concentration of wear elements in used oil in periods I-IV of locomotive mileage for complete oil change; g/ton

A histogram of the concentration (g/ton) of wear elements such as iron, copper, aluminum, chromium and lead in oil was created (Figures 4 – 5). The probability distribution function K/D_1 can

be used because it was normal or undamaged when the engine was disassembled to check the technical state through the routine maintenance.

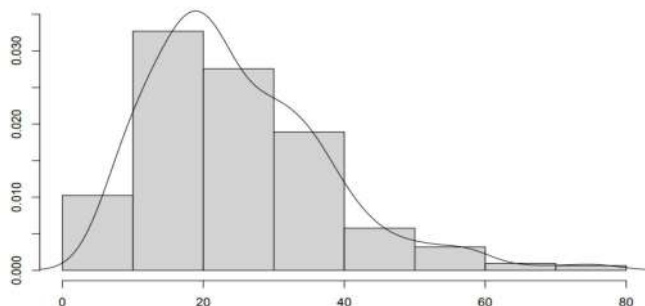


Figure 4 – A Histogram of iron concentration

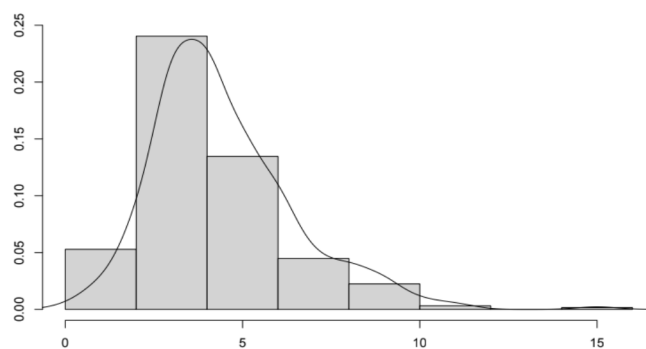


Figure 5 – A Histogram of aluminum concentration

During the observation period, based on the statistical data on the concentration of wear elements in used oil of an engine, when the acceptable limit value of the diagnostic parameters in normal state without faults is determined by model 2 with confidence between 0,9 – 0,975 using the non parametric statistical method, the following results were obtained (Table 6).

Table 6 – The diagnostic parameters of analysis

Wear elements; g/ton	Probability in confidence interval			
	0,9	0,925	0,95	0,975
Iron	41	43	50	58
Copper	7	8	9	9
Aluminum	5	6	7	10
Chrome	3	3	3	4
Lead	3	3	3	4

The probability that the diagnostic parameters corresponding to the probability in confidence interval of 0,95 is simultaneously fulfilled by all parameters was estimated by the relative frequency approach.

$$P = \frac{n_0}{n} = \frac{214}{312} = 0,68, \quad (3)$$

where n_0 – number (value) obtained by all parameters; n – random number (value).

The number of all parameters n_0 is defined as

$$n_0 = \sum_{i=1}^n I(k_{1i} < 50.35) \cdot I(k_{2i} < 7.035) \cdot I(k_{3i} < 8.67) \cdot I(k_{4i} < 3.25) \cdot I(k_{5i} < 3.1), \quad (4)$$

using the indicator function $I(K > K_0) = \begin{cases} 1, & \text{if } K < K_0; \\ 0, & \text{if } K \leq K_0, \end{cases}$

where k_{1i} – iron concentration in the measurement; k_{2i} – copper concentration in the measurement; k_{3i} – aluminum concentration in the measurement; k_{4i} – chrome concentration in the measurement; k_{5i} – lead concentration in the measurement;

k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 – the parameters (values) of the concentration of wear elements are transformed by a linear transformation of

$$\begin{aligned} Y_1 &= a_{11}k_1 + a_{12}k_2 + a_{13}k_3 + a_{14}k_4 + a_{15}k_5; \\ Y_2 &= a_{21}k_1 + a_{22}k_2 + a_{23}k_3 + a_{24}k_4 + a_{25}k_5; \\ Y_3 &= a_{31}k_1 + a_{32}k_2 + a_{33}k_3 + a_{34}k_4 + a_{35}k_5; \\ Y_4 &= a_{41}k_1 + a_{42}k_2 + a_{43}k_3 + a_{44}k_4 + a_{45}k_5; \\ Y_5 &= a_{51}k_1 + a_{52}k_2 + a_{53}k_3 + a_{54}k_4 + a_{55}k_5, \end{aligned} \quad (5)$$

and as a result of the analysis on the principal component using SPSS program, the first main component with the largest dispersion is $Y_1 = 0,881k_1 + 0,875k_2 + 0,751k_3 + 0,783x_4 + 0,410x_5$, and the dispersion is 57,7 percent of the total dispersion and the second largest component in the remaining dispersion is $Y_2 = -0,210k_1 - 0,158k_2 + 0,424k_3 - 0,435k_4 + 0,843k_5$, and the dispersion accounts for 22,96 percent of the total dispersion. The first and second components account for 85,323 % of the total dispersion, which means that they can be considered representative of the entire sample.

Therefore, with the help of the first and second components, the analytical range with a probability of 0,05 of the first type error is can be created as $Y_1 \leq 60,02$; $Y_2 \leq 1,004$.

2.3 The result of the diagnostic parameters into the maintenance systems. The attempts to regulate the maintenance interval recommended by the manufacturer of a diesel locomotive according to the mileage of a locomotive using the increase in the concentration of elements in used oil and the diagnostic parameters determined in the study were successful. For example, according to the operation instruction of the manufacturer, the routine maintenance-2, which involves partial disassembly of a diesel engine, is recommended every 300,000 km, and the routine maintenance-3, which is completely disassembled after taking out from the diesel locomotive, every 600,000 km. It was possible to increase the mileage of a locomotive for routine maintenance-2, if the wear element concentration is not detected in the used oil up to the maximum value of the diagnostic parameters that we determined. This case occurred in 30 percent of all locomotives and reduced maintenance costs by 20 percent per million kilometers of mileage.

Conclusions.

1. The quantitative and qualitative amounts of concentration in wear elements in used oil of a diesel engine were determined by the spectral analysis through the every technical maintenance (every 15000 – 20000 km) and the statistical analysis was performed.

2. It was determined that the wear intensity of diesel engine components and the wear of the same type of components has a normal distribution through the routine maintenance-2 or every 300000 km.

3. In accordance with the operation condition in Mongolia, when the engine is operated at a reduced power of 10 percent, the parameters for diagnostics without disassembly of components were determined by the spectral analysis method. The quantitative method has been analyzed by principal component method.

References

1. Gorsky A.V., Vorobyov A.A. Optimization of the locomotive repair system. Moscow, Transport Publ., 1994 (In Russian).
2. Chetvergov V.A., Ovcharenko S.M., Bukhteev V.F. Technical diagnostics of locomotives. Moscow, Educational and methodological center for education in railway transport Publ., 2014, 371 p. (In Russian).
3. Birger I.A. Technical diagnostics. Moscow, Mechanical engineering Publ., 1978, 240 p. (In Russian).
4. Yuegang Zhao. Oil Analysis Handbook. Spectro Scientific, Inc., 2017, 111 p. (In Chinese).
5. National Standard ASTM D5185 Standard Test Method for Determination of Additive Elements, Wear Metals, and Contaminants in Used Lubricating Oils and Determination of Selected Elements in Base Oils by Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry (ICP-AES). USA.
6. Fernandez-Feal M.C., Fernandez-Feal M.L. Study of Metal Concentration in Lubricating Oil with Predictive Purposes. *British Journal of Applied Science & Technology*, Past, 2018.
7. Ovcharenko S.M., Minakov V.A. Modeling accumulation of products depreciation in engine oil of diesel D49. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2014, no. 3 (19), pp. 31-36 (In Russian).

8. Organization for Cooperation of Railways (OSJD). Recommendations for the introduction of a diagnostic system for controlling the state of diesel locomotives and diesel-trains by analyzing oil results. Infrastructure and rolling stock committee OSJD, Warsaw, P647-1.2009 (In Russian).

9. James M., Wakiru, Liliane Pintelon. A review on lubricant condition monitoring information analysis for maintenance decision support. *Mechanical systems and signal processing*, vol.118, 2018.

10. Macian V., Tormos B., Olmeda P., Montoro L. Analytical approach to wear rate determination for internal combustion engine condition monitoring based on oil analysis. *Tribology International*, 36, 2003, pp. 771-776.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сандаг Галбадрах

Улан-Баторский Железнодорожный институт (УБЖ/ДИ).

Мира пр., д. 44, район Баянгол, г. Улан-Батор, 210635, Монголия.

Магистр технических наук, старший преподаватель кафедры «Подвижной состав», УБЖ/ДИ.

Тел.: (976)-91-009193.

E-mail: galbadrakh.sandag@gmail.com

Жамъян-Осор Пурэвсүрэн

Монгольский государственный университет науки и технологии (МГУНТ).

Бага Тойруу ул., д. 34, Сухэ-Баторский район, г. Улан-Батор, 14191, Монголия.

Кандидат физико-математических наук, профессор математической статистики кафедры «Отделение бизнес-администрирования», МГУНТ.

Тел.: (976)-99-281475.

E-mail: jampuje@gmail.com

Нацаг Одгэрэл

Улан-Баторский железнодорожный институт (УБЖ/ДИ).

Мира пр., д. 44, район Баянгол, г. Улан-Батор, 210635, Монголия.

Магистр лингвистики, старший преподаватель кафедры «Социально-гуманитарные науки», УБЖ/ДИ.

Тел.: (976)-88-177187.

E-mail: odgerel.n306@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Сандаг, Г. Определение диагностических параметров для дизельных двигателей локомотивов / Г. Сандаг, П. Жамъян-Осор, О. Нацаг. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 1 (53). – С. 2 – 9 (на англ. языке).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sandag Galbadrakh

Ulaanbaatar Institute of Railways.

Peace av., 44, Bayangol District, Ulaanbaatar, 210635, Mongolia.

Master of Science in Engineering, senior lecturer of the department «Rolling Stock», Ulaanbaatar Institute of Railways.

Phone: (976)-91-009193.

E-mail: galbadrakh.sandag@gmail.com

Jamyan-Osor Purevsuren

Mongolian University of science and technology (MUST).

34, Baga Roundabout, Sukhbaatar District, Ulaanbaatar, 14191, Mongolia.

Ph. D. in Mathematical Statistics, professor of the department «Branch of Business Administration», MUST.

Phone: (976)-99-281475.

E-mail: jampuje@gmail.com

Natsag Odgerel

Ulaanbaatar Institute of Railways.

Peace av., 44, Bayangol District, Ulaanbaatar, 210635, Mongolia.

Master of Linguistics, senior lecturer of the department «Social sciences and Humanities», Ulaanbaatar Institute of Railways.

Phone: (976)-88-177187.

E-mail: odgerel.n306@gmail.com

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Sandag G., Jamyan-Osor P., Natsag O. Definition of diagnostic parameters for locomotive diesel engines. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 1 (53), pp. 2-9 (In English).

Н. А. Жигулин, О. Е. Пудовиков

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

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ И МОДУЛЯ ЗАДАТЧИКА НАПРЯЖЕНИЯ СТПР-1000 ДЛЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ ПОЕЗДА С ЭЛЕКТРОВОЗОМ 2ЭС6

Аннотация. Применение средств автоматизации управления движением поездов на железнодорожном транспорте повышает экономическую эффективность и безопасность движения поездов. Широкое применение на тяговом подвижном составе находят системы автоведения поездов (САВП), построенные по многоконтурному принципу и включающие в себя контур управления скоростью движения поезда. Подчиненным контуром для системы автоматического управления (САУ) скорости является автоматизированный тяговый электропривод, входным сигналом для которого является заданное значение силы тяги. Для модели САУ электропривода предложена математическая модель тягового электродвигателя ЭДП810, учитывающая способ возбуждения тяговых двигателей. Предложен алгоритм управления величиной силы тока возбуждения посредством изменения выходного напряжения на статическом преобразователе СТПР-1000. Данный алгоритм учитывает рассогласование между заданием тока возбуждения и его текущей величиной, внутренние параметры элементов ветви тока возбуждения и тока реактора, коэффициент компаундирования, а также максимально возможную скорость изменения величины тока возбуждения за такт управления. Полученные в ходе моделирования с использованием предлагаемой модели двигателя его электромеханические характеристики в достаточной мере соответствуют экспериментальным данным, а выбранный способ управления величиной силы тяги позволяет поддерживать ее на заданном уровне. Таким образом, предложенная модель тягового электродвигателя продемонстрировала свою адекватность, а способ управления силой тяги – возможность его применения в составе многоконтурной САУ скоростью движения электровоза с дискретным управлением силой тяги.

Ключевые слова: модель тягового электродвигателя, тяговый двигатель электровоза, независимое возбуждение, двигатель независимого возбуждения, переходный процесс, магнитный поток.

Nikita A. Zhigulin, Oleg E. Pudovikov

Russian university of transport (RUT (MIIT)), Moscow, the Russian Federation

MATHEMATICAL MODEL OF THE CONTROL OBJECT AND VOLTAGE SETTING MODULE STPR-1000 FOR THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF THE SPEED OF THE TRAIN WITH ELECTRIC LOCOMOTIVE 2ES6

Abstract. The use of automation tools for train traffic control in railway transport increases the economic efficiency and safety of train traffic. Widespread use on traction rolling stock is found in automatic train control systems (ATCS), built on a multi-loop principle and including a train speed control loop. The slave circuit for the automatic speed control system (ACS) is an automated traction electric drive, the input signal for which is the set value of the traction force. For the ACS model of the electric drive, a mathematical model of the EDP810 traction motor is proposed, taking into account the method of excitation of the traction motors. An algorithm for controlling the value of the traction force is proposed, which assumes its change by controlling the current value of the excitation current by changing the output voltage on the static converter STPR-1000. This algorithm takes into account the mismatch between the setting of the excitation current and its current value, the internal parameters of the elements of the excitation current branch and the reactor current, the compounding coefficient, as well as the maximum possible rate of change in the excitation current per control cycle. The electromechanical characteristics obtained in the course of simulation using the proposed engine model are in sufficient agreement with the experimental data, and the chosen method of controlling the thrust force value allows maintaining it at a given level. Thus, the proposed model of the traction electric motor has demonstrated its adequacy, and the method of controlling the traction force has demonstrated the possibility of its use as part of a multi-circuit automatic control system for the speed of an electric locomotive with discrete control of the traction force.

Keywords: traction motor model, electric locomotive traction motor, independent excitation, independent excitation motor, transient process, magnetic flux.

Применение средств автоматизации управления движением поездов на железнодорожном транспорте повышает экономическую эффективность и безопасность движения поездов.

Разработке регуляторов скорости ЭПС посвящены труды ученых МИИТа, ВНИИЖТа, ПГУПС и ряда других организаций. Имеются разработки регуляторов скорости для подвижного состава с релейно-контакторным управлением силой тяги с использованием как линейного, так и нелинейного законов управления. Созданы регуляторы для пассажирских поездов с электрической тягой, использующие эвристические алгоритмы. Проводились исследования для электропоездов с непрерывным управлением тягой и допущениями, что модель поезда линеаризована, а временная дискретизация и измерительные тракты не учитывались [1]. С использованием результатов анализа продольных колебаний в поезде, полученных путем имитационного моделирования, разработан регулятор скорости грузового локомотива с непрерывным управлением тягой, обеспечивающий ограничения на продольные динамические силы в поезде [2].

В СССР первые регуляторы скорости движения были разработаны для электровозов со ступенчатым регулированием силы тяги [3]. Появление новых локомотивов со ступенчатым регулированием и предоставляемых ими возможностей обуславливает дальнейшее развитие алгоритмов. Одним из таких локомотивов является 2ЭС6, схемой которого предусмотрено применение независимого возбуждения тяговых электродвигателей (ТЭД).

Задачи, разрешаемые в рамках настоящей статьи: разработка модели объекта управления, представленного тяговым приводом с двигателями ЭДП810 и независимым питанием обмоток возбуждения для САУ скоростью поезда с локомотивом 2ЭС6; построение алгоритма управления выходным напряжением преобразователя СТПр-1000, обеспечивающим управление силой тяги.

Решение поставленных задач позволит построить САУ скоростью поезда для локомотива с дискретным управлением силой тяги.

При разработке модели были приняты некоторые допущения: преобразователь СТПР-1000 представлен безынерционным звеном; сумма величин индуктивностей обмоток якоря, компенсационной и добавочных полюсов принимается как доля от динамической индуктивности обмотки возбуждения [4]; учет вихревых токов не осуществляется.

В качестве прототипа принята САУ скоростью грузового электровоза (рисунок 1), для достижения поставленных задач осуществляется доработка алгоритма работы ее элементов.

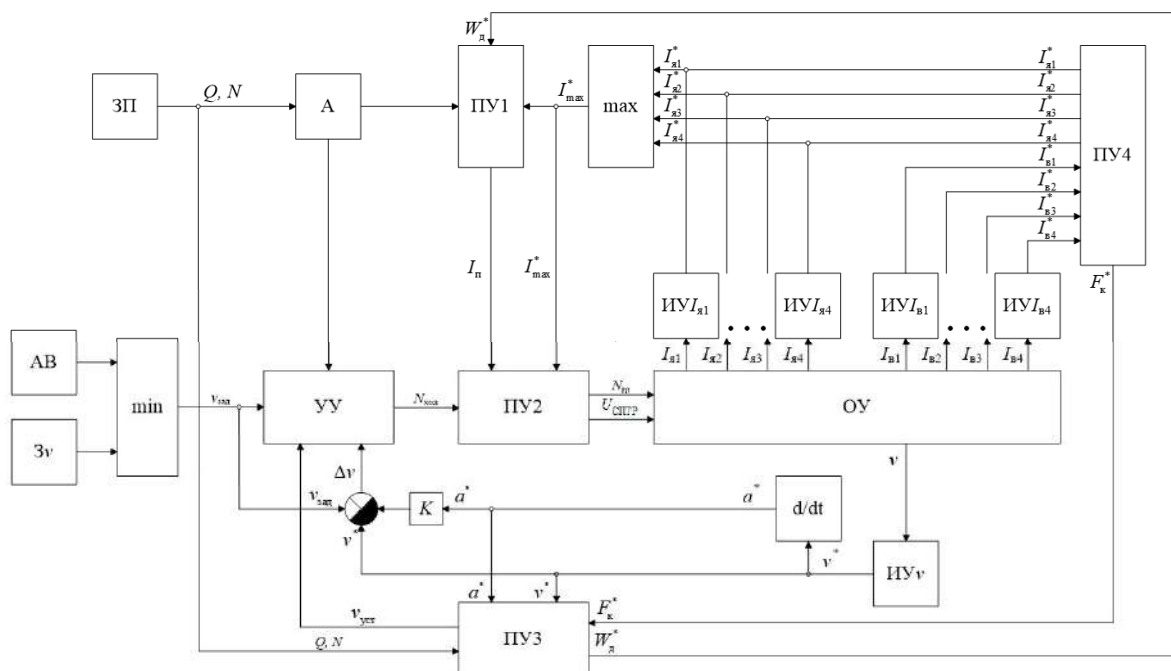


Рисунок 1 – Функциональная схема САУ скоростью движения [5]

Устройство управления (УУ) осуществляет выбор ходовой позиции, на которой возможно достижение заданной скорости $v_{\text{зад}}$. В качестве входных данных используется задание по скорости, рассогласование по ней Δv .

Дополнительным критерием выбора является обеспечение максимального КПД привода. Блок ПУ2 задает переключения в силовой цепи в целях достижения максимальных тяговых усилий $F_{\text{max}}(v)$ до переключения на ходовую позицию или достижения задания по скорости, а также управляет выходным напряжением $U_{\text{СПП}}$ преобразователя СТПР-1000. Блок ПУ2 принимает в качестве входных сигналов значение тока якоря и номер ходовой позиции $N_{\text{ход}}$, которую необходимо достигнуть.

Применение независимого возбуждения на электровозе 2ЭС6 позволяет управлять величиной результирующего магнитного потока, а значит, воздействовать на величину силы тяги электровоза.

На рисунке 2 приведена упрощенная силовая схема, составленная на основе принципиальной схемы [6], где $M1-4$ – тяговые электродвигатели, в том числе их обмотки возбуждения; $L2-3$ – сглаживающие реакторы; $R15-16$ – сопротивления, шунтирующие обмотки возбуждения; $R13-14$ – сопротивления, шунтирующие сглаживающие реакторы; $R5-6$ – балластные резисторы; $A7-8$ – статические преобразователи СТПР-1000.

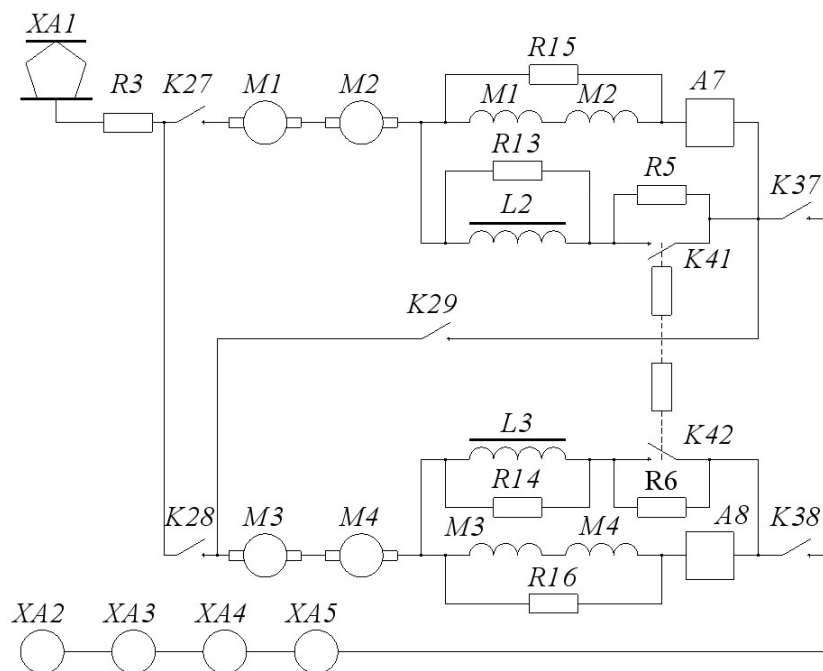


Рисунок 2 – Упрощенная силовая цепь одной секции электровоза [6]

Для выполнения исследования преобразуем схему (см. рисунок 2) к виду, представленному на рисунке 3.

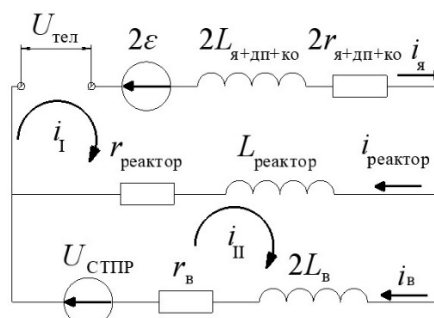


Рисунок 3 – Расчетная силовая схема применительно к одной тележке

На рисунке 3: $U_{\text{тел}}$ – напряжение питания в расчете на одну тележку с учетом схемы соединения, В; $i_{\text{я}}$ – ток якоря, А; ε – ЭДС вращения одного двигателя, В; $L_{\text{я+дп+ко}}$ – сумма величин индуктивностей обмоток якоря, компенсационной и добавочных полюсов одного двигателя, Гн; $L_{\text{реактор}}$ – индуктивность сглаживающего реактора, Гн; $U_{\text{СТПР}}$ – напряжение на выходе преобразователя СТПР-1000; $i_{\text{в}}$ – ток возбуждения, А; $r_{\text{в}}$ – суммарное сопротивление двух последовательно соединенных обмоток возбуждения и параллельно включенного шунтирующего сопротивления, Ом; $r_{\text{реактор}}$ – суммарное сопротивление сглаживающего реактора и шунтирующего его сопротивления, Ом; $L_{\text{в}}$ – динамическая индуктивность одной обмотки возбуждения, Гн; $i_{\text{реактор}}$ – ток ветви сглаживающего реактора, А.

Составим систему уравнений для решения ее методом контурных токов [7]:

$$\begin{cases} 2L_{\text{я+дп+ко}} \frac{di_1}{dt} + i_1 2r_{\text{я+дп+ко}} + L_{\text{реактор}} \frac{di_1}{dt} + i_1 r_{\text{реактор}} = U_{\text{тел}} - 2\varepsilon; \\ i_{\text{II}} r_{\text{в}} + 2L_{\text{в}}^{\text{дин}} \frac{di_{\text{II}}}{dt} + L_{\text{реактор}} \frac{di_{\text{II}}}{dt} + i_{\text{II}} r_{\text{реактор}} = -U_{\text{СТПР}}; \\ i_{\text{я}} = i_1; i_{\text{реактор}} = i_1 + i_{\text{II}}; i_{\text{в}} = -i_{\text{II}}. \end{cases} \quad (1)$$

В силовых цепях индуктивность обмотки возбуждения $L_{\text{в}}^{\text{дин}}$ является динамической, и ее можно найти по уравнению [4]:

$$L_{\text{в}}^{\text{дин}} = L_{\text{в}}^{\text{ст}} - (\dot{L}_{\text{в}}^{\text{ст}} / \dot{i}_{\text{в}}) i_{\text{в}}, \quad (2)$$

где $\dot{L}_{\text{в}}^{\text{ст}}$ – скорость изменения статической индуктивности, Гн/с;

$\dot{i}_{\text{в}}$ – скорость изменения тока возбуждения, А/с.

Статическая индуктивность обмотки возбуждения [4]

$$L_{\text{в}}^{\text{ст}} = 2 \cdot p \cdot \sigma \cdot W \cdot \left(\frac{\Phi}{i_{\text{в}}} \right), \quad (3)$$

где p – число пар полюсов машины;

σ – коэффициент рассеяния магнитного потока. Для машин с компенсационной обмоткой $\sigma = 1,25$ [4];

W – число витков полюсной катушки.

Сумма величин индуктивностей обмоток якоря, компенсационной и добавочных полюсов на один двигатель [4]

$$L_{\text{я+дп+ко}} = 0,3 L_{\text{в}}^{\text{дин}}. \quad (4)$$

ЭДС одного двигателя

$$\varepsilon = 3,6 \cdot c_v \cdot v \cdot \Phi, \quad (5)$$

где c_v – постоянный коэффициент колесно-моторного блока, $c_v = \frac{\mu p N}{3,6 \pi D_o a}$ [8];

D_6 – диаметр бандажа колесной пары, м;
 μ – передаточное отношение редуктора;
 N – число проводников якорной обмотки;
 v – скорость локомотива, км/ч.

Зависимость магнитного потока от тока возбуждения $\Phi(i_b)$ получаем в результате обработки электротяговых характеристик двигателя, приведенных в ПТР [9]. Данная зависимость представлена в виде полинома третьей степени:

$$\Phi = ai_b^3 + bi_b^2 + ci_b. \quad (6)$$

Значения коэффициентов найдены с использованием метода наименьших квадратов: $a = 5,08736 \cdot 10^{-10}$; $b = 1,06914 \cdot 10^{-6}$; $c = 8,39219 \cdot 10^{-4}$.

Сила тяги локомотива [8]

$$F_k = \frac{2 \cdot \Phi \cdot c_m \cdot i_a \cdot \mu \cdot \eta}{D_6} \cdot n_{ТЭД}, \quad (7)$$

где c_m – постоянный коэффициент машины, $c_m = \frac{pN}{2\pi a}$ [8];

$n_{ТЭД}$ – количество ТЭД электровоза;

η – общий КПД привода.

Как отмечалось ранее, выходным сигналом блока ПУ2 является напряжение на выходе СТПр-1000, изменение которого позволяет регулировать ток возбуждения i_b , а значит, и силу тяги электровоза. По известным $F_{\max}(v)$ и величине тока якоря i_a на основании уравнения электротяговой характеристики $F_{\text{кл}}(I_d)$ определяем величину задания по магнитному потоку $\Phi_{\text{зад}}$, который при текущем токе якоря позволит достичь $F_{\max}(v)$:

$$\Phi_{\text{зад}} = \frac{F_{\max}(v) \cdot D_6}{2 \cdot \mu \cdot c_m \cdot i_a \cdot \eta \cdot n_{ТЭД}}. \quad (8)$$

Значение тока возбуждения $i_b(\Phi_{\text{зад}})$, необходимое для создания магнитного потока $\Phi_{\text{зад}}$, определяется по графику обратной зависимости $i_b(\Phi)$. В свою очередь [6]

$$i_b(\Phi_{\text{зад}}) = i_{\text{СТПр}} + k_{\text{комп}} \cdot i_a, \quad (9)$$

где $k_{\text{комп}}$ – коэффициент компаундирования;

$i_{\text{СТПр}}$ – уставка тока возбуждения, А.

Ток уставки цепи обмотки возбуждения $i_{\text{СТПр}}$ регулируется путем изменения напряжения $U_{\text{СТПр}}$ на выходе СТПр-1000. Напряжение $U_{\text{СТПр}}$ определяется в соответствии с условиями:

$$\begin{cases} U_{\text{СТПР}} = (i_{\text{в}}(\Phi_{\text{зад}}) - k_{\text{комп}} \cdot i_{\text{я}}) \cdot (2r_{\text{в}} + r_{\text{реактор}}), \text{ если } |i_{\text{в}} - i_{\text{в}}(\Phi_{\text{зад}})| \leq \Delta i_{\text{в}}^{\text{max}}; \\ \text{иначе:} \\ U_{\text{СТПР}} = (i_{\text{СТПР}}^{\text{max}} - k_{\text{комп}} \cdot i_{\text{я}}) \cdot (2r_{\text{в}} + r_{\text{реактор}}), \text{ если } i_{\text{в}} - i_{\text{в}}(\Phi_{\text{зад}}) < 0; \\ \text{иначе:} \\ U_{\text{СТПР}} = (i_{\text{СТПР}}^{\text{min}} - k_{\text{комп}} \cdot i_{\text{я}}) \cdot (2r_{\text{в}} + r_{\text{реактор}}), \end{cases} \quad (10)$$

где $i_{\text{СТПР}}^{\text{max}}$ – максимальная величина уставки тока возбуждения, $i_{\text{СТПР}}^{\text{max}} = 800 \text{ А}$;

$i_{\text{СТПР}}^{\text{min}}$ – минимальная величина уставки тока возбуждения, $i_{\text{СТПР}}^{\text{min}} = 50 \text{ А}$;

$\Delta i_{\text{в}}^{\text{max}}$ – модуль величины порогового значения разницы $i_{\text{в}} - i_{\text{в}}(\Phi_{\text{зад}})$. На основании пробных расчетов принято, что $\Delta i_{\text{в}}^{\text{max}} = 1,5$.

В результате работы построенной модели были получены электромеханические характеристики, представленные на рисунке 4. Сравнение полученных характеристик с характеристиками, представленными в источнике [10], позволяет говорить об адекватности построенной модели тягового двигателя.

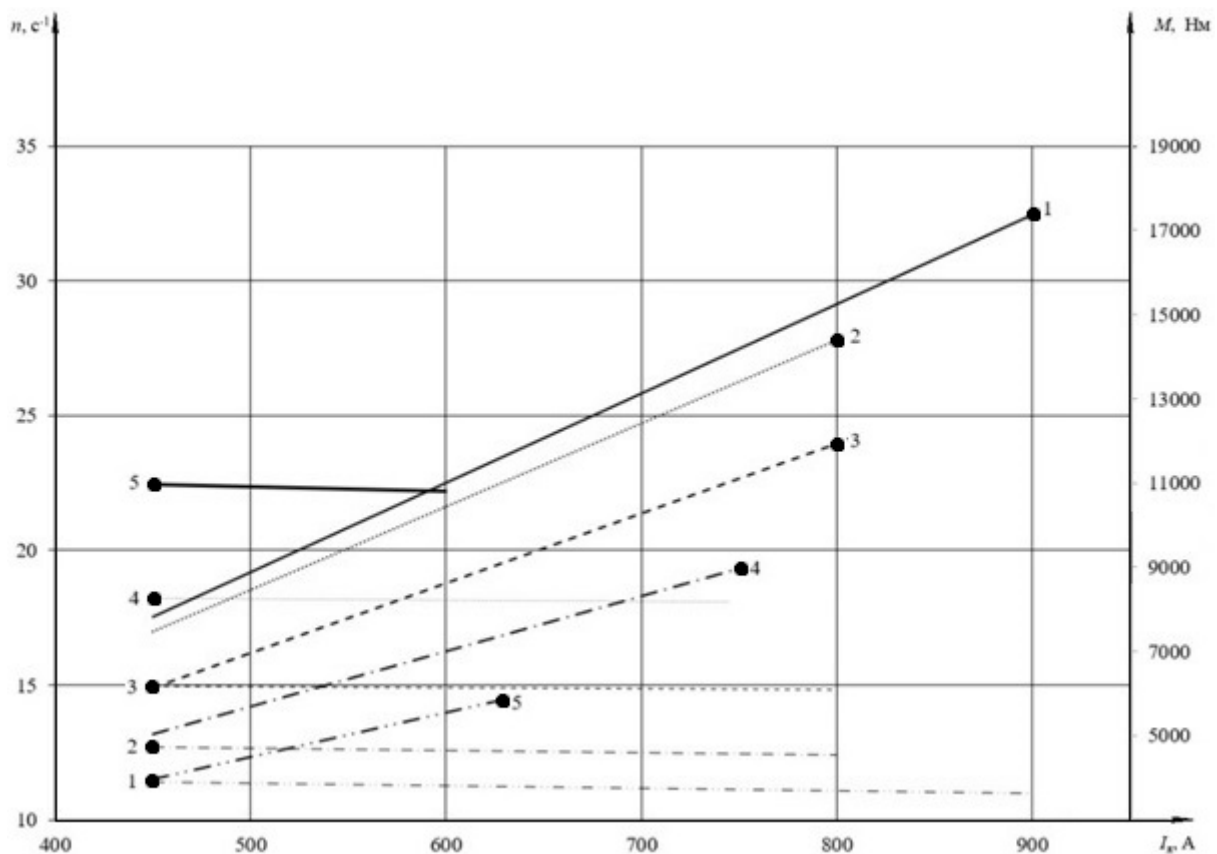


Рисунок 4 – Электромеханические характеристики модели двигателя ЭДП810: 1 – ток возбуждения 200 А; 2 – ток возбуждения 250 А; 3 – ток возбуждения 350 А; 4 – ток возбуждения 580 А; 5 – ток возбуждения 800 А

Был проведен эксперимент с пуском поезда массой в 4000 т с локомотивом 2ЭС6 по профилю пути с нулевым уклоном. В качестве задания по силе тяги было выбрано значение в 500 кН. Было принято, что минимальное время между переключениями позиций должно быть не меньше 1 с; величина тока после переключения на следующую позиции за время переходного процесса 5τ не превысит 800 А.

На рисунке 5 представлены результаты моделирования, которые отражают возможность регулировать силу тяги на данной модели при помощи изменения величины магнитного потока посредством изменения напряжения на выходе СТПР-1000.

Скачкообразный рост величины силы тяги после достижения заданного значения связан с переключением реостатных позиций и увеличением величины тока якоря, однако через некоторое время величина силы тяги локомотива восстанавливается до заданного значения. Снижение силы тяги (например, в интервале времени 20 – 25 с) связано с падением силы тока якоря при одновременном невыполнении условий перехода на следующую позицию, описанных выше.

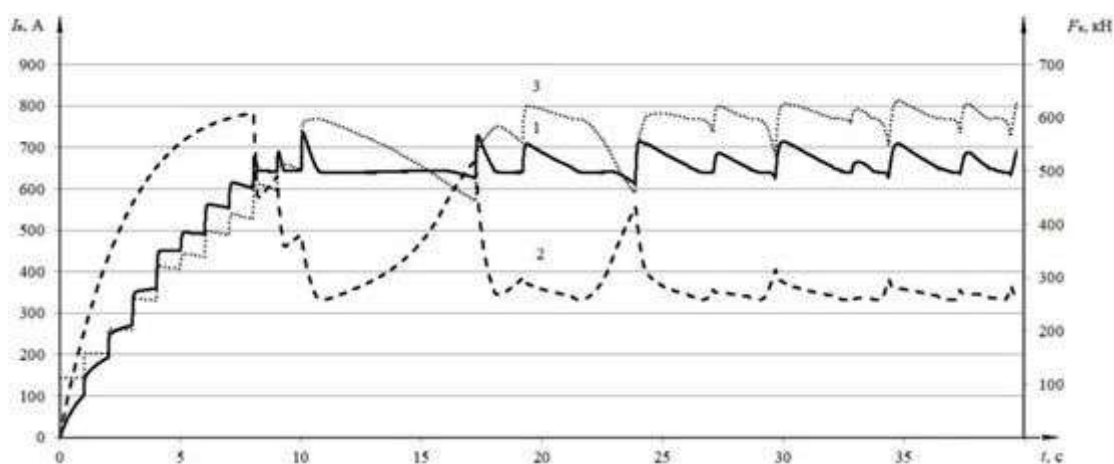


Рисунок 5 – График изменения силы тяги локомотива, токов двигателя и возбуждения:

1 – сила тяги локомотива F_k ; 2 – ток возбуждения i_b ; 3 – ток якоря i_a

На рисунке 6 представлены значения величин текущего магнитного потока и величины задания по магнитному потоку. Отклонение фактического значения магнитного потока от заданного обуславливается временем протекания переходного процесса в цепи тока возбуждения и минимальным коэффициентом ослабления поля $\beta_{\min} = 0,43$.

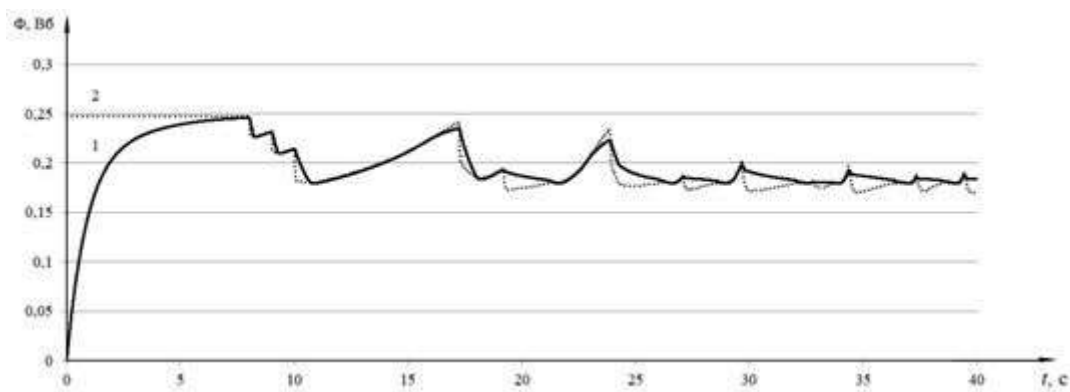


Рисунок 6 – График изменения магнитного потока:

1 – магнитный поток Φ ; 2 – задание магнитного потока $\Phi_{\text{зад}}$

На рисунке 7 представлено изменение положения рукоятки контроллера машиниста (РК) во времени.

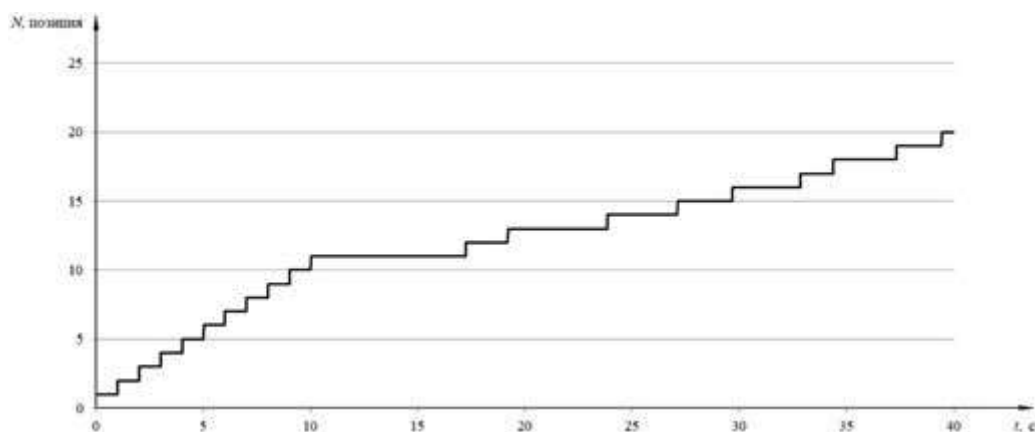


Рисунок 7 – График изменения позиции РК

Как видно из приведенных результатов моделирования привода электровоза 2ЭС6 с двигателями ЭДП810 при использовании независимого возбуждения, полученные характеристики соответствуют экспериментальным данным для реальной машины, а предложенный алгоритм управления током возбуждения может быть применен для регулирования силы тяги в целях дальнейшего построения САУ скоростью для локомотивов с независимым возбуждением и дискретным управлением силой тяги.

Список литературы

1. Савоськин, А. Н. Системы автоматического управления скоростью электроподвижного состава / А. Н. Савоськин, В. С. Островский, О. Е. Пудовиков. – Текст : непосредственный // Подвижной состав 21 века (идеи, требования, проекты) : сборник докладов научно-технической конференции. – Санкт-Петербург : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 1999. – С. 56.
2. Пудовиков, О. Е. Автоматическое управление скоростью движения длинносоставного грузового поезда / О. Е. Пудовиков. – Текст : непосредственный // Мехатроника. Автоматизация. Управление. – 2010. – № 8. – С. 51–57.
3. Аснис, И. А. Выбор параметров цифрового регулятора скорости для электровоза ЧС2Т / И. А. Аснис. – Текст : непосредственный. // Труды МИИТа. – Вып. 653. – Москва : МИИТ, 1982. – С. 29–35.
4. Алексеев, А. С. Исследование влияния нелинейности кривой намагничивания тягового электродвигателя на переходные процессы в силовой цепи электровоза / А. С. Алексеев. – Текст : непосредственный // Труды МИИТа. – Вып. 912. – Москва : МИИТ, 1997. – С. 84–88.
5. Алпатов, А. И. Автоматическое управление скоростью движения грузового поезда с электровозом постоянного тока и дискретным управлением силой тяги / А. И. Алпатов. – Текст : непосредственный // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2012. – № 1. – С. 61–64.
6. Электровоз грузовой постоянного тока 2ЭС6 с коллекторными тяговыми электродвигателями : Руководство по эксплуатации. – Верхняя Пышма : ОАО «УЗЖМ», 2008. – Часть 1. – 166 с. – Текст : непосредственный.
7. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле : учебник / Л. А. Бессонов. – Москва : Юрайт, 2016. – 317 с. – Текст : непосредственный.
8. Теория электрической тяги / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров, М. И. Озеров; под ред. И. П. Исаева. – Москва : Транспорт, 1995. – 294 с. – Текст : непосредственный.
9. Правила тяговых расчетов для поездной работы. Нормативное производственно-практическое издание. – Москва : ОАО «РЖД», 2016. – 515 с. – Текст : непосредственный.
10. Электровоз грузовой постоянного тока 2ЭС6 с коллекторными тяговыми электродвигателями: Руководство по эксплуатации. – Верхняя Пышма : ОАО «УЗЖМ», 2008. – Часть 4. – 149 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Savoskin A.N., Ostrovskiy V.S., Pudovikov O.E. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya skorost'yu elektropovizhnogo sostava* [Automatic speed control systems for electric rolling stock]. *Sbornik dokladov v nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Podvizhnoy sostav 21 veka (idei, trebovaniya, proekty)»*. (Collection of reports of the scientific and technical conference «Rolling stock of the 21st century (ideas, requirements, projects)»). St. Petersburg, 1999, PSTU, 1999, p. 56 (In Russian).
2. Pudovikov O.E. *Avtomaticheskoe upravleniye skorost'yu dvizheniya dlinnosostavnogo gruzovogo poezda* [Automatic speed control of a long freight train]. *Mekhatronika. Avtomatizatsiya. Upravlenie – Mechatronics. Automation. Control*, 2010, no. 8, pp. 51-57 (In Russian).
3. Asnis I.A. *Vybor parametrov tsyifrovogo regulatora skorosti dlya elektrovoza ChS2T* [Selection of digital speed controller parameters for electric locomotive ChS2T]. *Trudy MIITa – Proceedings of MIIT*, 1982, no. 653, pp. 29-35 (In Russian).
4. Alekseev A.S. *Issledovanie vliyaniya nelineynosti krivoy namagnichivaniya tyagovogo elektrodvigatelya na perehodnye protsessy v silovoy tsepi elektrovoza* [Study of the influence of the nonlinearity of the magnetization curve of a traction motor on transient processes in the power circuit of an electric locomotive]. *Trudy MIITa – Proceedings of MIIT*, 1997, no. 912, pp. 84-88 (In Russian).
5. Alpatov A.I. *Avtomaticheskoe upravlenie skorost'yu dvizheniya gruzovogo poezda s elektrovozom postoyannogo toka i diskretnym upravleniem siloy tyagi* [Automatic speed control of a freight train with a DC electric locomotive and discrete traction control]. *Transport: nauka, tekhnika i upravlenie – Transport: science, technology and management*, 2012, no. 1, pp 61-64 (In Russian).
6. *Elektrovoz gruzovoy postoyannogo toka 2ES6 s kollektornymi tyagovymi elektrodvigatelyami* [Freight direct current electric locomotive 2ES6 with collector traction motors]. Upper Pyshma, JSC «UZhZM» Publ., 2008, manual, vol. 1, 166 p. (In Russian).
7. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Elektromagnitnoye pole: uchebnik dlya bakalavrov* [Theoretical foundations of electrical engineering. Electromagnetic field: textbook for bachelors]. Moscow, Yurayt Publ., 11th ed., revised and additional, 2016, 317 p. (In Russian).
8. Rozenfeld V.E., Isaev I.P., Sidorov N.N., Ozerov M.I., ed. Isaev I.P. *Teoriya elektricheskoy tyagi* [Theory of electric traction]. Moscow, Transport Publ., 1995, 294 p. (In Russian).
9. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoy paboty. Normativnoye proizvodstvenno-prakticheskoye izdaniye* [Rules of traction calculations for train work. Normative production and practical edition]. Moscow, JSC Russian Railways Publ., 2016, 515 p. (In Russian).
10. *Elektrovoz gruzovoy postoyannogo toka 2ES6 s kollektornymi tyagovymi elektrodvigatelyami: rukovodstvo po ekspluatatsii* [Freight direct current electric locomotive 2ES6 with collector traction motors: manual]. Upper Pyshma, JSC «UZhZM» Publ., 2008, vol. 4, 149 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Жигулин Никита Андреевич

Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ)).

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

Аспирант кафедры «Электропоезда и локомотивы», ПУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (926) 901-59-49.

E-mail: zhigulinnikita@gmail.com

Пудовиков Олег Евгеньевич

Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ)).

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zhigulin Nikita Andreevich

Russian university of transport (RUT (MIIT)).

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

Postgraduate student of the department «Electric trains and locomotives», RUT (MIIT).

Phone: +7 (926) 901-59-49.

E-mail: zhigulinnikita@gmail.com

Pudovikov Oleg Evgenevich

Russian university of transport (RUT (MIIT)).

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

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

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

Тел.: +7 (916) 182-78-24.

E-mail: olegep@mail.ru

Doctor of Sciences in Engineering, associate
professor, head of the department «Electric trains and
locomotives», RUT (MIIT).

Phone: +7 (916) 182-78-24.

E-mail: olegep@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Жигулин, Н. А. Математическая модель объекта управления и модуля задатчика напряжения СТПр-1000 для системы автоматического управления скоростью поезда с электровозом 2ЭС6 / Н. А. Жигулин, О. Е. Пудовиков. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 1 (53). – С. 10 – 19.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Zhigulin N.A., Pudovikov O.E. Mathematical model of the control object and voltage setting module STPR-1000 for the automatic control system of the speed of the train with electric locomotive 2ES6. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 1 (53), pp. 10-19 (In Russian).

УДК 621.333.048.015

М. Г. Дурандин, И. А. Кузьминых

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС), г. Екатеринбург, Российская Федерация

СНИЖЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК ЯКОРНЫХ ОБМОТОК ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЛОКОМОТИВОВ

Аннотация. Одним из наиболее нагруженных и, соответственно, наименее долговечных в эксплуатации узлов тяговых электродвигателей локомотивов остается высоковольтная изоляция их обмоток. В статье рассмотрен один из возможных путей повышения надежности работы якорной изоляции тяговых электродвигателей за счет изменения материала изготовления пазовых клиньев и прокладок, укладываемых под клин, на дно паза и в межсекционное пространство. Поставленная цель достигается за счет усиления теплообмена между активными элементами обмотки якоря и внешней охлаждающей средой. Определены критерии выбора и требования к физическим свойствам материалов, предлагаемых в качестве альтернативных к традиционно используемым при существующей технологии производства пазовых клиньев. Предложено использование пазовых клиньев и внутрипазовых прокладок из цветных металлов и сплавов на их основе. На базе разработанной математической модели в программной среде COMSOL Multiphysics произведены сравнительные тепловые расчеты якорной конструкции тягового электродвигателя ТЛ-2К1 со стеклотекстолитовыми клиньями и миканитовыми прокладками, а также с использованием алюминиевых клиньев и прокладок. Результаты расчетов, представленные в виде температурных диаграмм, доказывают возможность снижения до 11 % уровня тепловой нагруженности якорных проводников уже при номинальных значениях тока якоря в случае использования металлических клиньев и прокладок. Численно доказывается рост результативности их применения при возрастании токовых нагрузок. Сделаны выводы как в отношении практической возможности реализации предлагаемых изменений в конструкции существующих типов тяговых электродвигателей, так и перспектив модернизации вновь проектируемых образцов.

Ключевые слова: тяговый электродвигатель, обмотка якоря, высоковольтная изоляция, пазовый клин, миканитовая прокладка, теплофизические свойства, материал изготовления, тепловая нагрузка, температура нагрева.

Michael G. Durandin, Ivan A. Kuzminykh

Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, the Russian Federation

REDUCING HEAT LOADS OF ANCHOR WINDINGS OF TRACTION ELECTRIC MOTORS OF LOCOMOTIVES

Abstract. High-voltage insulation of their windings remains one of the most loaded and, accordingly, the least durable units of traction electric motors of locomotives. The article considers one of the possible ways to improve the reliability of the anchor insulation of traction motors by changing the material for the manufacture of slot wedges and gaskets placed under the wedge, on the bottom of the slot and in the intersection space. This goal is achieved by enhancing

heat transfer between the active elements of the armature winding and the external cooling medium. The selection criteria and requirements for the physical properties of materials proposed as alternatives to those traditionally used in the existing technology for the production of slot wedges are determined. The use of slot wedges and intra-groove gaskets made of non-ferrous metals and alloys based on them is proposed. Based on the developed mathematical model in the COMSOL Multiphysics software environment, comparative thermal calculations were made for the anchor structure of the TL-2K1 traction motor with fiberglass wedges and micanite spacers, as well as using aluminum wedges and spacers. The calculation results presented in the form of temperature diagrams prove the possibility of reducing the level of thermal loading of anchor conductors to 11% already at nominal values of armature currents in the case of using metal wedges and gaskets. The increase in the effectiveness of their application with increasing current loads is numerically proved. Conclusions are drawn both regarding the practical possibility of implementing the proposed changes in the design of existing types of traction motors, and the prospects for the modernization of newly designed samples.

Keywords: traction motor, armature winding, high voltage insulation, slot wedge, micanite gasket, thermophysical properties, material of manufacture, thermal load, heating temperature.

На сегодняшний день по данным Федеральной службы государственной статистики железнодорожный транспорт продолжает занимать лидирующие позиции на рынке грузовых транспортных услуг [1]. Заложенные в Стратегию развития железнодорожного транспорта до 2030 г. масштабные проекты по строительству новых железнодорожных веток с целью освоения отдаленных территорий, глубокая модернизация существующих линий, направленная на повышение их пропускной способности, свидетельствуют о лидирующей роли железнодорожного транспорта в обеспечении массовых перевозок грузов на дальние расстояния.

Решения поставленных задач по дальнейшему увеличению грузооборота невозможно добиться без обновления и модернизации локомотивного парка, выступающего ключевым звеном в реализации перевозочного процесса. Однако поступающие в настоящее время на российские железные дороги образцы новой техники с высокими тягово-энергетическими характеристиками не лишены недостатков в отношении ряда узлов, что подтверждается соответствующей статистикой отказов тягового оборудования.

Так, по имеющимся данным [2] одним из лимитирующих элементов грузовых электровозов нового поколения являются тяговые электродвигатели, оказывающие существенное влияние на надежность показатели работы всего локомотива. При этом речь идет не об ущербности двигательной конструкции в целом, а только о недостатках ее отдельных элементов, что ставит актуальную задачу по поиску путей их модернизации и совершенствования.

Анализ условий работы тяговых электродвигателей показывает, что в наибольшей степени воздействию неблагоприятных эксплуатационных факторов подвержены изоляционные компоненты активных частей машины [3]. В первую очередь это относится к якорным обмоткам, многослойная изоляция которых испытывает комплексное воздействие высоких потенциальных, тепловых и ударно-вибрационных нагрузок в условиях жестких габаритных ограничений на их размещение в пазовом пространстве [4].

Указанные особенности условий работы якорных обмоток тяговых электродвигателей предопределяют и значительно более высокие, чем в промышленных аналогах, удельные нагрузки для изоляционных покрытий. Доминирующее влияние среди них имеет тепловой фактор, от воздействия которого зависит безотказность работы якорной изоляции [5, 6]. При этом стремление к увеличению толщины диэлектрического барьера для снижения потенциальной загруженности слоев изоляции повышает их сопротивление процессу теплопередачи и, как следствие, негативно сказывается на тепловой напряженности всей якорной конструкции.

Обозначенная проблема наиболее отчетливо проявляется в отношении тяговых электродвигателей новых серий, что обусловлено устойчивой тенденцией к наращиванию их единичной мощности. Закономерно, что в конструкции их якорных обмоток используются все более высокие классы нагревостойкости изоляционных покрытий. Неизбежное при этом

повышение стоимости самих тяговых электродвигателей не окупается из-за низких надежностных показателей их работы.

Для решения поставленной проблемы предлагается внести изменения в конструкцию активного слоя якоря с целью повышения интенсивности процесса теплопередачи между проводниками якорной обмотки и внешней охлаждающей поверхностью якоря. Снизить сопротивление процессу теплопередачи предполагается за счет подбора материала пазовых клиньев, выполняющих функцию крепления обмотки якоря.

В настоящее время пазовые клинья для тяговых машин постоянного и пульсирующего тока преимущественно изготавливают из текстолита и стеклотекстолита, представляющих собой слоистые композиционные материалы на основе волокнистых тканей и стеклотканей с одним из полимерных связующих [7, 8]. В большей части своих физических свойств указанные материалы схожи с основными компонентами изоляционных покрытий, хотя и не предназначены для реализации функции потенциального барьера. Обладая одновременно низкими значениями коэффициента удельной теплопроводности и высокими значениями удельной теплоемкости, клинья создают столь высокое тепловое сопротивление на пути выхода теплового потока, что в типовых методиках определения перегрева якорной обмотки данный участок пазового пространства в расчет не принимается [9].

Очевидно, что использование клиньев с высокими теплопроводящими свойствами является дополнительным, еще не использованным ресурсом в повышении мощности потоков теплопередачи из внутрипазового пространства. Для этого материал клиньев должен обладать, по возможности, максимально высоким значением удельного коэффициента теплопроводности.

В то же время поиск материалов, способных к альтернативной замене существующих пазовых клиньев, необходимо вести и с ориентацией на требование сохранения ими механической прочности для возможности выполнения своих изначальных функций. С учетом большого количества клиньев важно также, чтобы их общий вес оставался сопоставимым с существующими значениями, не нарушая весовых показателей машины, статических и динамических нагрузжений якорных подшипников, условий динамической балансировки якоря и др.

Выбор в пользу того или иного материала для пазовых клиньев должен одновременно учитывать и его магнитные свойства с тем, чтобы обеспечить стабильность параметров магнитной системы машины. Это позволит избежать изменений в конструкции магнитопровода машины с сохранением ее технических параметров и выходных рабочих характеристик. С этих позиций клинья должны обладать сопоставимой с используемыми сегодня текстолитовыми и стеклотекстолитовыми материалами магнитной проницаемостью, т. е. на уровне пара- или диамагнетиков.

По совокупности перечисленных выше требований к физическим свойствам пазовых клиньев в наибольшей степени отвечают такие материалы, как медь, алюминий и сплавы на их основе. Тепловые и физические свойства указанных металлов и их наиболее распространенных сплавов в сравнении с аналогичными параметрами традиционных клиновых материалов представлены в таблице [10].

Тепловые физические параметры материалов

Материал	Плотность, кг/м ³	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
Текстолит	1350	1486	0,285
Стеклотекстолит	1750	1100	0,300
Алюминий	2700	934	226
Дюралюминий	2800	670	186
Медь	8900	385	400
Латунь	8600	389	110
Бронза	7750	377	52

Приведенные данные демонстрируют возможный диапазон варьирования физических показателей материала клиньев. В первую очередь речь идет о перспективе повышения коэффициента теплопроводности пазовых клиньев на несколько порядков.

Из данных таблицы видно, что медь и алюминий по своим тепловым свойствам представляются наиболее подходящей заменой текстолиту и стеклотекстолиту. Для сплавов характерна несколько меньшая теплопроводность в сравнении с базовыми металлами, что снижает целесообразность их использования в качестве пазовых клиньев. В то же время нельзя не считаться с тем, что у сплавов имеются и положительные свойства. Так, дюралюминий по своим теплопроводящим свойствам ненамного уступает алюминию, но при этом отличается большей механической прочностью, меньшими теплостойкостью и стоимостью.

Для окончательных выводов о целесообразности внесения изменений в якорную конструкцию действующих тяговых электрических машин и предпочтительности использования в пазовых клиньях тех или иных материалов были проведены сравнительные тепловые расчеты.

Среди имеющихся на сегодняшний день методов расчета температурных полей в сложносоставных композициях наиболее приемлемым представляется конечно-элементное моделирование с использованием специализированных программных пакетов. В отличие от традиционных прикладных методик, основанных на решении тепловых схем замещения, компьютерное моделирование позволяет отказаться от многих допущений, что повышает точность результатов. Кроме того, на основе реализации тепловых моделей в современных программных средах возможно получать данные по нагреву и охлаждению машин не только в стационарных, но и в неустановившихся тепловых режимах.

Известно несколько программных продуктов, реализующих данное направление, среди которых наиболее эффективным в решении рассматриваемой задачи представляется среда COMSOL Multyphysics. Работа данной среды основана на решении методом конечных элементов систем дифференциальных уравнений в частных производных, посредством которых описывается большинство физических процессов.

В качестве расчетной модели в сравнительной оценке материалов клинового крепления использовалась конструкция активного слоя якоря тягового электродвигателя ТЛ-2К1, имеющего типовую конструкцию и технологию изготовления якорных обмоток для тяговых электрических машин отечественного производства.

Описание математической модели процессов теплопередачи на базе фундаментальных уравнений теплопроводности с заданием начальных и граничных условий, определяющих распределение температурных потенциалов в пазу якоря, приведено в публикации, посвященной данной тематике [6]. Поскольку в этих исследованиях уже анализировались закономерности пазового распределения температурных потенциалов в условиях постоянно меняющихся нагрузок и скоростей движения подвижного состава, то для текущей задачи было принято допущение о постоянстве тока якоря и частоты вращения. Меньшее число анализируемых факторов облегчает поиск решения за счет снижения объема расчетных операций. Кроме того, следует отметить, что несмотря на неизбежное возникновение в металлических клиньях добавочных потерь мощности различной физической природы их присутствие не учитывалось при моделировании как по причине отсутствия совершенных методик их определения, так и ввиду относительной малости их величины по сравнению с основными потерями в меди и стали якоря. Учитывая сложность своей постановки, данный вопрос требует отдельного рассмотрения с поиском ответов экспериментальными методами либо методами компьютерного моделирования.

Масштабированное изображение расчетной конструкции тягового электродвигателя ТЛ-2К1 представлено на рисунке 1. В качестве исследуемого материала по замене стеклотекстолитовых клиньев был выбран алюминий, обладающий высоким коэффициентом теплопроводности при низких плотности и показателях теплостойкости, но с достаточно высокой механической прочностью.

Структура изоляции соответствовала типовой технологической карте изготовления якорных секций тягового электродвигателя ТЛ-2К1. Тепловые физические параметры сравниваемых клиновых материалов принимались согласно данным представленной таблицы.

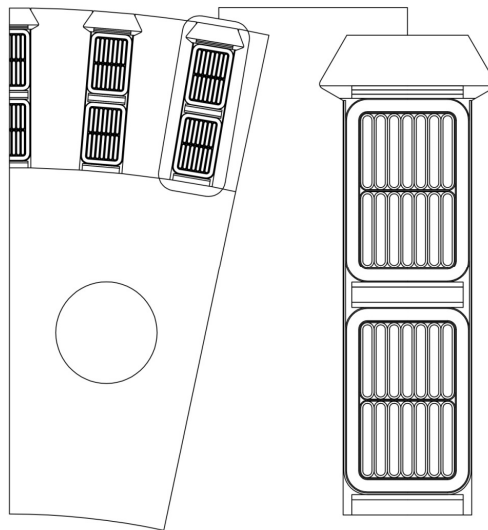


Рисунок 1 – Расчетная структура активного слоя якоря тягового электродвигателя ТЛ-2К1

Результаты расчета кривых нагрева медных проводников якорной обмотки в точках максимальных значений температур для сравниваемых вариантов материала клиньев представлены на рисунке 2 ($I_a = 410$ А).

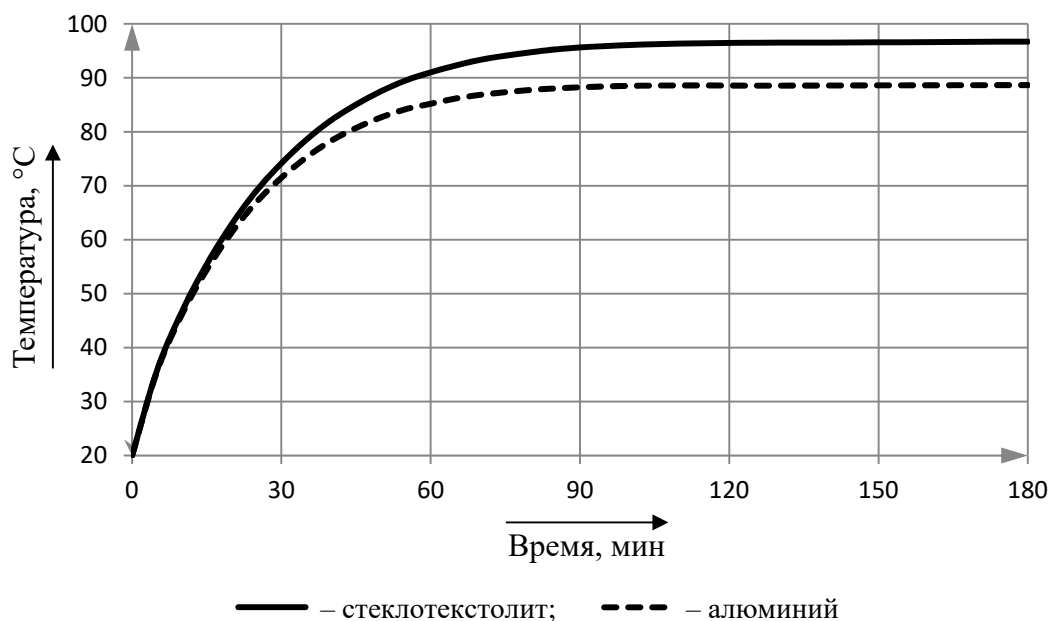


Рисунок 2 – Кривые нагрева медных проводников обмотки якоря тягового электродвигателя ТЛ-2К1

Из полученных температурных кривых видно, что использование алюминия в качестве материала для клинового крепления обмотки якоря снижает нагрев ее медных проводников на 8 °С. Таким образом, можно утверждать, что использование теплопроводящих клиньев уже в номинальном режиме работы тяговых электродвигателей снижает уровень тепловых нагрузок их якорных обмоток в пределах 10 %.

Преимущество металлических клиньев в сравнении с композиционными диэлектрическими аналогами проявляется все сильнее по мере увеличения токовых нагрузок. На рисунке 3 представлены графики установившихся максимальных значений температуры

медных проводников в зависимости от величины тока тягового электродвигателя при условии постоянства магнитных потерь в стали якоря.

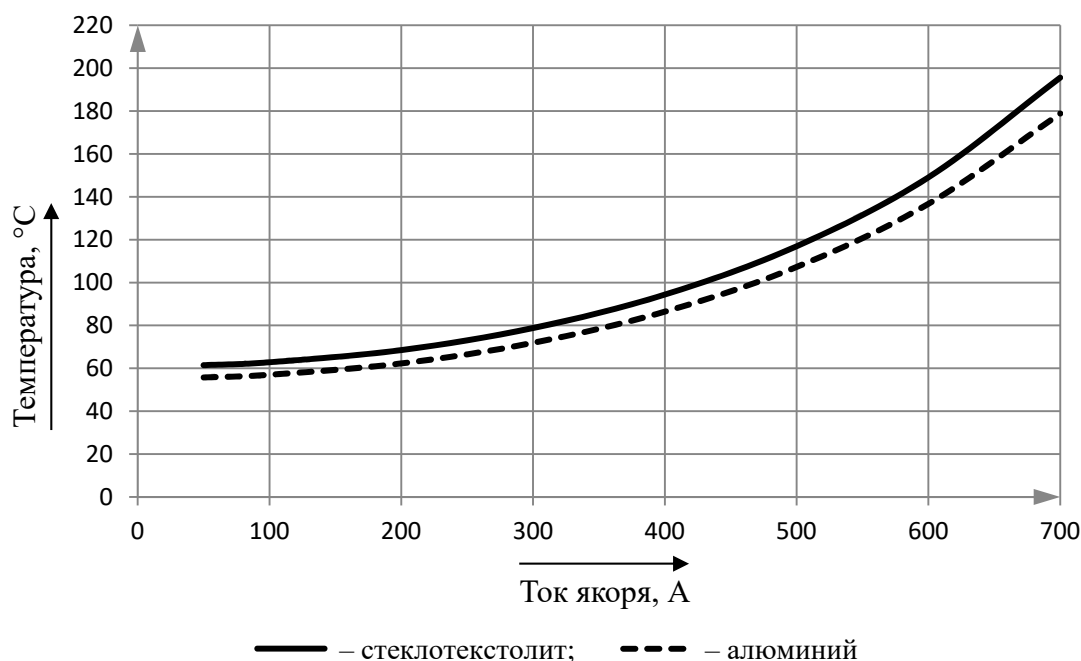


Рисунок 3 – Установившиеся значения температуры медных проводников в зависимости от тока якоря

Из диаграммы рисунка 3 следует, что разница в температурных режимах нагрева якорных проводников при малых значениях тока возрастает втрое в предельных токовых режимах. Данная особенность становится особенно актуальной при современной тенденции наращивания мощностей локомотивов и их эксплуатации в предельных режимах нагружения.

Интерес представляет и тот факт, что ожидаемого эффекта по дальнейшему снижению нагрева якорных проводников при замене материала клиньев на медь, обладающую вдвое большим коэффициентом теплопроводности по отношению к алюминию, не получено. Кривые нагрева якорных проводников при использовании медных клиньев отличаются от представленных на рисунке 2 на десятые доли градуса и поэтому не приводятся.

Данная особенность позволяет сделать важный вывод в отношении выбора материала пазовых клиньев – увеличение коэффициента теплопроводности пазовых клиньев дает ощутимый эффект только до определенного уровня. Поэтому при выборе материала для изготовления пазовых клиньев следует учитывать, что его теплопроводящие свойства не являются однозначным критерием отбора и поэтому необходимо учитывать и другие факторы – стоимость материала, технологичность изготовления клиньев, удобство их использования в процессе укладки якорных секций и др.

В развитии данного направления было обращено внимание на еще один элемент пазовой структуры, который также представляет собой значительное тепловое сопротивление на пути выхода тепловых потоков. Согласно действующим технологиям под клин закладываются миканитовые прокладки, которые не несут изоляционной нагрузки, поскольку не контактируют с потенциально заряженными поверхностями, но при этом обладают теми же теплофизическими свойствами, что и диэлектрические композиционные материалы.

Если предположить, что их функции будет выполнять материал с теплопроводностью металла, это может стать дополнительным резервом в снижении тепловой нагрузки для якорной обмотки.

На рисунке 4 представлены ожидаемые кривые нагревания проводников якоря в номинальном режиме работы тягового электродвигателя в случае замены материала клина на алюминий в сочетании с аналогичной заменой материала изоляционных прокладок.

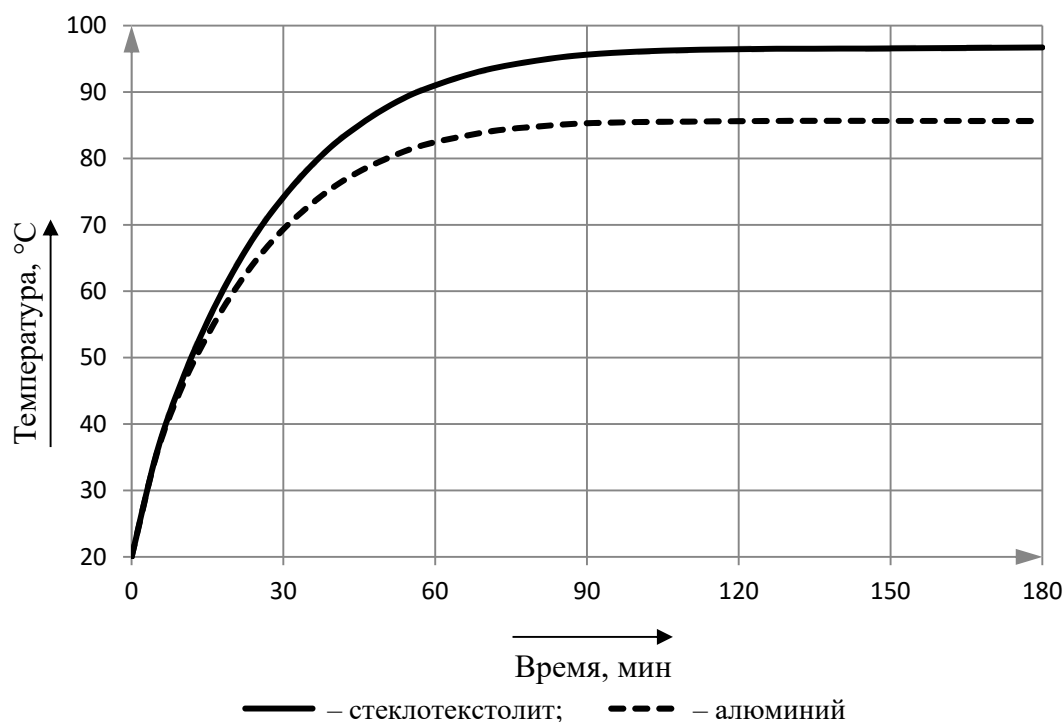


Рисунок 4 – Кривые нагрева проводников обмотки якоря при замене материала клина и изоляционных прокладок на алюминий

Полученные зависимости показывают, что подбор материала подклиновых прокладок может дать дополнительный положительный эффект, обеспечив снижение нагрева якорной обмотки на 11 % в сравнении с традиционным исполнением.

Ожидается, что применение поверхностных проводящих покрытий якорных проводников может оказаться полезным и в решении проблемы по снижению градиентов напряженности электрического поля на выходе из паза. Однако этот вопрос требует отдельного исследования.

Приведенные выше выводы справедливы не только для исследованной в работе пазовой части якорных конструкций. Аналогичные закономерности справедливы и в отношении более напряженных в тепловом отношении задних лобовых частей якорных обмоток. В этом случае речь идет об использовании крепежных бандажей из материалов, схожих по теплофизическим свойствам с металлами.

В заключение следует отметить, что преимуществом предложенных методов является простота их реализации в отношении как существующих образцов тяговых электрических машин, так и вновь разрабатываемых конструкций. Отличие состоит только в том, что во вновь проектируемых образцах может быть снято ограничение на значения магнитной проницаемости клиньев, что позволит одновременно реализовать идею применения и преимущества магнитных клиньев.

Список литературы

1. Основные показатели транспортной деятельности в России за 2019 – 2021 гг. – Текст : электронный // Федеральная служба государственной статистики : официальный сайт. – 2023. – URL: <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport/comments> (дата обращения: 04.03.2023).
2. Соколов, О. О. Как повысить надежность тяговых двигателей электровоза 2ЭС6 / О. О. Соколов, В. А. Мельников. – Текст : непосредственный // Локомотив. – 2015. – № 6 (702). – С. 26–27.
3. Сулейманов, Р. Я. Методы снижения дугообразования на коллекторе тяговых электродвигателей / Р. Я. Сулейманов, М. Г. Дурандин. – Текст : непосредственный // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 2 (38). – С. 35–41.

4. Серебряков, А. С. Электротехническое материаловедение. Электроизоляционные материалы : учебное пособие / А. С. Серебряков. – Москва : Маршрут, 2005. – 280 с. – Текст : непосредственный.
5. Дурандин, М. Г. Расчет электрических полей в якорной изоляции тяговых электродвигателей с учетом теплового фактора / М. Г. Дурандин, И. А. Кузьминых. – Текст : непосредственный // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2010. – № 4 (8). – С. 30–37.
6. Дурандин, М. Г. Обобщенная методика расчета электрических и тепловых полей в пазовой изоляции тяговых электродвигателей локомотивов / М. Г. Дурандин, И. А. Кузьминых. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2014. – № 2 (41). – С. 102–108.
7. Тяговые электрические машины : учебник / под ред. В. Г. Щербакова, А. Д. Петрушина. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2016. – 641 с. – Текст : непосредственный.
8. Грищенко, А. В. Новые электрические машины локомотивов : учебное пособие / А. В. Грищенко, Е. В. Козаченко. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2008. – 271 с. – Текст : непосредственный.
9. Тяговые электрические машины и трансформаторы : учебник / под ред. Д. Д. Захарченко. – Москва : Транспорт, 1979. – 303 с. – Текст : непосредственный.
10. Ачеркан, Н. С. Справочник машиностроителя : в 6 томах / Н. С. Ачеркан. – Москва : Машгиз, 1956. – Том 2. – 560 с. – Текст : непосредственный.
11. Дурандин, М. Г. Расчет нестационарных тепловых процессов в якорной изоляции тяговых электродвигателей / М. Г. Дурандин, И. А. Кузьминых. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2013. – № 1 (36). – С. 78–83.

References

1. *Osnovnye pokazateli transportnoj dejatel'nosti v Rossii za 2019 – 2021 gg* [Key indicators of transport activity in Russia for 2019 – 2021]. Available at: <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport/comments> (accessed 04.03.2023).
2. Sokolov O.O., Mel'nikov V.A. How to improve the reliability of traction motors of electric locomotive 2ES6. *Lokomotiv – Locomotive*, 2015, no. 6 (702), pp. 26-27 (In Russian).
3. Sulejmanov R.Ja., Durandin M.G. Methods for reducing arcing on the collector of traction electric motors. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija – Scientific journal «Herald of the Ural State University of Railway Transport»*, 2018, no. 2 (38), pp. 35-41 (In Russian).
4. Serebrjakov A.S. *Jelektrotehnicheskoe materialovedenie. Jelektroizoljacionnye materialy* [Electrotechnical materials science. Electrical insulating materials]. Moscow, Marshrut Publ., 2005, 280 p. (In Russian).
5. Durandin M.G., Kuz'minyh I.A. Calculation of electric fields in the anchor insulation of traction electric motors, taking into account the thermal factor. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija – Scientific journal «Herald of the Ural State University of Railway Transport»*, 2010, no. 4 (8), pp. 30-37 (In Russian).
6. Durandin M.G., Kuz'minyh I.A. Generalized method for calculating electric and thermal fields in slot insulation of locomotive traction electric motors. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2014, no. 2 (41), pp. 102-108 (In Russian).
7. Shherbakov V.G. *Tjagovye jelektricheskie mashiny* [Traction electric machines]. Moscow, Educational and methodological center for education in railway transport Publ., 2016, 641 p. (In Russian).
8. Grishhenko A.V., Kozachenko E.V. *Novye jelektricheskie mashiny lokomotivov* [New electric machine locomotives]. Moscow, Educational and methodological center for education in railway transport Publ., 2008, 271 p. (In Russian).

9. Zaharchenko D.D., Rotanov N.A., Gorchakov E.V. *Tjagovye jelektricheskie mashiny i transformatory* [Traction electrical machines and transformers]. Moscow, Transport Publ., 1979, 303 p. (In Russian).

10. Acherkan N.S. *Spravochnik mashinostroitelja: v 6 tomah* [Handbook of the machine builder: In 6 volumes]. Moscow, Mashgiz Publ., 1956, vol. 2, 560 p. (In Russian).

11. Durandin M.G., Kuz'minyh I.A. Calculation of non-stationary thermal processes in the anchor insulation of traction electric motors. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2013, no. 1 (36), pp. 78-83 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дурандин Михаил Гелиевич

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).

Колмогорова ул., д. 66, г. Екатеринбург, 620034, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрическая тяга», УрГУПС.

Тел.: +7 (909) 023-38-90.

E-mail: mdurandin@e1.ru

Кузьминых Иван Александрович

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).

Колмогорова ул., д. 66, г. Екатеринбург, 620034, Российская Федерация.

Ведущий инженер, проектно-изыскательский институт «Транспромопроект», УрГУПС.

Тел.: +7 (922) 225-23-36.

E-mail: iakuzminyih@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Durandin Mikhail Gelievich

Ural State University of Railway Transport (USURT).

66, Kolmogorova st., Yekaterinburg, 620034, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Electric Traction», USURT.

Phone: +7 (909) 023-38-90.

E-mail: mdurandin@e1.ru

Kuzminykh Ivan Alexandrovich

Ural State University of Railway Transport (USURT).

66, Kolmogorova st., Yekaterinburg, 620034, the Russian Federation.

Leading engineer, design and survey institute «Transpromproekt», USURT.

Phone: +7 (922) 225-23-36.

E-mail: iakuzminyih@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Дурандин, М. Г. Снижение тепловых нагрузок якорных обмоток тяговых электродвигателей локомотивов / М. Г. Дурандин, И. А. Кузьминых. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 1 (53). – С. 19 – 27.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Durandin M.G., Kuzminykh I.A. Reducing heat loads of anchor windings of traction electric motors of locomotives. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 1 (53), pp. 19-27 (In Russian).

УДК 621.331:621.311.004.18

Н. О. Жухин

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

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ ПОЕЗДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ СИСТЕМЫ АВТОВЕДЕНИЯ

Аннотация. Применение систем автоведения подвижного состава повышает безопасность движения поездов, экономит энергоресурсы, снижает напряженность труда локомотивных бригад. Одной из основных отечественных систем автоведения поездов является унифицированная система автоматизированного ведения поезда (УСАВП). С целью дальнейшего совершенствования данной системы и ее испытаний в режиме автоведения вне подвижного состава предложена конструкция стенда для проверки системы УСАВП методом математического моделирования. Основой данного стенда является математическая модель поезда, взаимодействующая с проверяемой системой автоведения. Управляющие команды, сформированные системой автоведения, поступают в математическую модель, которая определяет параметры движения поезда. Модель формирует сигналы от датчиков тока, напряжения, давления и скорости, которые поступают обратно в систему автоведения. Такой подход позволяет моделировать движение поезда с выбранными параметрами по

выбранному участку пути в режиме автоматизированного ведения поезда. В статье на примере одной из существующих систем автоведения рассмотрены различные подходы к разработке подобного стенда и используемой в нем модели поезда. Рассмотрены математические описания для модели поезда в виде материальной точки и дискретной многомассовой модели поезда.

Разработанный стенд может быть использован при демонстрации работы систем автоведения, при проверке и исследованиях систем автоведения в стационарных условиях. Проверка работы системы автоведения в стационарных условиях с использованием данного стенда позволит оперативно оценивать эффективность управления поездом в режиме автоматизированного ведения поезда и расширить применение систем автоведения подвижного состава.

Ключевые слова: автоведение поезда, автоматизация подвижного состава, автоматическое управление, математическая модель поезда, система автоматизированного ведения поезда.

Nikita O. Zhukhin

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

APPLICATION OF THE TRAIN MODEL TO RESEARCH THE OPERATION OF THE AUTOMATIC TRAIN DRIVING SYSTEM

Abstract. *The use of automatic train driving systems increases the safety of train traffic, energy savings, and reduces the labor intensity of locomotive crews. One of the main Russian systems of automatic train driving is the unified system of automatic train driving (USAVP). In order to further improve this system and its tests in the automatic train driving mode outside the locomotive, a design of a stand for testing the USAVP system by mathematical modeling is proposed. The basis of this stand is a mathematical model of a train that interacts with a checked automatic train driving system. The control commands generated by this system are fed into a mathematical model that determines the parameters of the train movement. The model generates signals from current, voltage, pressure and speed sensors, which are fed back into the automatic train driving system. This approach allows you to simulate the movement of a train with selected parameters along a selected section of track in the automatic train driving mode. In the article, using the example of one of the existing modifications of the USAVP system, various approaches to the development of such a stand and the train model used in it are considered. Mathematical descriptions for a train model in the form of a material point and a discrete multi-mass train model are considered.*

This stand can be used to demonstrate the operation of such systems, during testing and research of automatic train driving systems in stationary conditions. Checking the operation of the automatic train driving system outside the locomotive using this stand will allow you to quickly assess the effectiveness of train control in the automatic train driving mode and expand the use of automatic train driving systems.

Keywords: automatic train driving, automation of rolling stock, automatic control, mathematical model of the train, automatic train driving system.

С середины XX в. в нашей стране и за рубежом предприняты значительные шаги по автоматизации тягового подвижного состава и различных его систем. Разработаны и применяются автоматические системы отдельных узлов подвижного состава, системы автоматического управления током и скоростью тяговых двигателей, автоматические системы безопасности, системы автоматизированного ведения поездов. Постоянно совершенствуются алгоритмы управления и элементная база данных систем. Особенно эффективно применение микропроцессорных систем управления, безопасности и автоведения поездов. Так, применение микропроцессорных систем автоведения позволяет снизить напряженность работы машиниста, повысить безопасность движения, пропускную и провозную способность железных дорог, экономию энергоресурсов [1].

В настоящее время значительная часть отечественного тягового подвижного состава оборудована унифицированной микропроцессорной системой автоведения поезда УСАВП. Данная система служит для автоматизированного ведения поезда под контролем машиниста и с минимальным его участием, а также для вывода машинисту информации о параметрах движения поезда. УСАВП в различных модификациях устанавливается с начала 2000 гг. на многие отечественные электровагоны, электропоезда и тепловозы. Разработчиком данной системы является ООО «АВП Технологии».

Система УСАВП может работать в двух основных режимах – «Советчик» и «Автоведение» [2]. В обоих режимах УСАВП выводит машинисту на дисплей визуальную

информацию о параметрах движения поезда, о работе системы автоведения и о рациональном режиме движения. Кроме визуальной информации УСАВП в необходимых случаях выводит звуковые объявления машинисту, а на электропоездах – и пассажирам. В режим «Советчик» система переходит автоматически после ее включения машинистом и ввода им в систему информации о поезде и маршруте следования. В этом режиме управление поездом осуществляет машинист, а УСАВП только осуществляет вывод визуальной и звуковой информации.

В режиме «Автоведение» УСАВП осуществляет автоматическое ведение поезда от одной остановки до другой с учетом расписания данного поезда, постоянных и временных ограничений скорости, сигналов светофоров, а также настроек режима «Автоведение», заданных машинистом. При этом система управляет поездом таким образом, чтобы обеспечить выполнение графика движения при минимальном расходе топлива либо электроэнергии [2, 3].

Переход в режим автоведения происходит только по команде машиниста. Перед этим машинист должен включить систему автоведения, ввести в нее необходимые данные и подготовить локомотив к началу движения. В режиме автоведения машинист может в любой момент взять управление поездом на себя. Так, при переключении рукоятки контроллера машиниста или крана машиниста УСАВП автоматически переходит в режим «Советчик». Переход системы из режима «Автоведение» в режим «Советчик» также происходит при сбое в работе системы, при торможении, не вызванном системой автоведения, при снятии напряжения в контактной сети и в ряде других случаев.

Наиболее часто система УСАВП используется в режиме «Советчик». Применение этой системы в режиме автоведения достаточно ограничено из-за нескольких факторов: недостаточной подготовки локомотивных бригад в области управления системой УСАВП и применения автоведения поезда; необходимости контролировать работу системы УСАВП в режиме автоведения; низким качеством технического обслуживания и ремонта систем автоведения в условиях депо; вероятностью возникновения ошибок системы в режиме автоведения, которые могут привести к нерациональному управлению поездом (повышенный расход топлива или электроэнергии), ухудшению обслуживания пассажиров (остановка пассажирского поезда за пределами пассажирской платформы), а в ряде случаев – к срабатыванию системы безопасности. Это говорит о необходимости совершенствования существующих и проектируемых модификаций данной системы автоведения, устранения ошибок, возникающих при работе системы УСАВП, повышения уровня подготовки локомотивных бригад и ремонтного персонала в области эксплуатации и обслуживания систем автоведения.

С целью демонстрации работы системы автоведения в учебном процессе, а также с целью изучения работы системы автоведения в стационарных условиях кафедрой «Электропоезда и локомотивы» Российского университета транспорта (РУТа (МИИТа)) предложена конструкция стенда, позволяющего демонстрировать и исследовать работу системы автоведения УСАВП, в том числе в режиме «Автоведение».

Как известно, для проверки работы системы автоведения УСАВП вне локомотива разработаны и эксплуатируются специальные стенды, например, стенд типа ЧС-100С [4]. Эти стенды позволяют проверить включение системы, ввод в нее данных о поезде и участке пути, переход системы в режим «Автоведение». Стенды позволяют также моделировать сигналы, поступающие в систему УСАВП от аппаратов и датчиков. В то же время данные стенды не позволяют полностью продемонстрировать и проверить работу системы УСАВП в режиме «Автоведение», что является актуальной задачей при подготовке специалистов, при проверке работы системы автоведения в стационарных условиях и при проведении научных исследований.

Для возможности полноценной демонстрации и проверки системы УСАВП в режиме «Автоведение» стенд, предложенный кафедрой «Электропоезда и локомотивы», должен быть

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

оборудован математической моделью поезда, связанной с физической системой автоведения УСАВП. В режиме «Автоведение» система УСАВП формирует управляющие команды (набор и сброс позиций контроллера машиниста, переход на выбег, применение ступени торможения и т. д.), которые поступают в математическую модель поезда (рисунок 1).

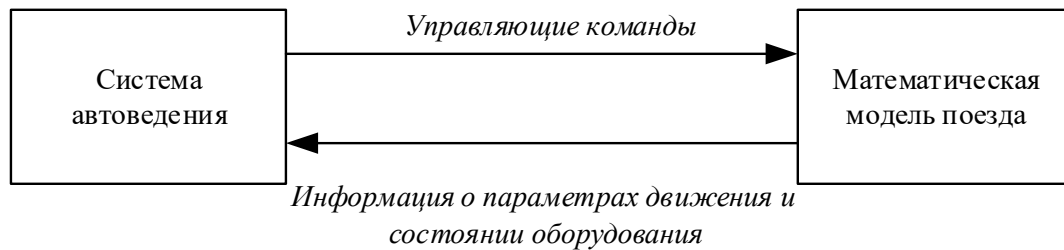


Рисунок 1 – Взаимодействие модели поезда и системы автоведения

Получая эти команды, математическая модель поезда вычисляет силу тяги и скорость локомотива, токи его тяговых двигателей, давление сжатого воздуха в пневматических системах и т. д. На основе этих данных устройства вывода математической модели формируют электрические сигналы, аналогичные сигналам от аппаратов и датчиков реального локомотива (датчиков скорости, тока, напряжения, давления и т. д.). Данные сигналы, как и на реальном локомотиве, поступают обратно в систему автоведения, позволяя ей оценить параметры движения локомотива и в зависимости от них формировать управляющие команды. Математическую модель поезда целесообразно формировать в виде электронного блока, оснащенного программируемым микроконтроллером и взаимодействующего с персональным компьютером.

В зависимости от поставленных задач и от особенностей конструкции конкретного подвижного состава возможны различные варианты реализации такого стенда. Рассмотрим один из этих вариантов применительно к системе автоведения УСАВП-01, используемой в настоящее время на пассажирских электровозах серии ЧС7, которые являются одними из основных пассажирских электровозов постоянного тока в России. Аппаратная часть данной системы применительно к одной секции электровоза состоит из следующих основных элементов [2]: блока системного БС, блока коммутации и сопряжения КС, пульта управления ПУ, блока клавиатуры КВ, устройства включения системы УВС, блока гальванической развязки БГР, датчиков скорости и давления, электропневматических вентилях, клеммной рейки и соединительных кабелей. В случае, если электровоз не оборудован системой измерений и регистрации параметров движения и автоведения РПДА, в аппаратную часть системы УСАВП входят датчики тока и напряжения. Структурная схема системы автоведения УСАВП-01 приведена на рисунке 2.

Как было показано выше, для изучения системы автоведения, взаимодействующей с моделью поезда, не требуется наличие различных датчиков и аппаратов, которыми управляет система автоведения на реальном электровозе. Поэтому необходимо лишь наличие управляющих блоков системы автоведения (блока системного БС, блока коммутации и сопряжения КС, пульта управления ПУ, блока клавиатуры КВ, устройства включения системы УВС) и соединительных кабелей. Для питания системы УСАВП необходим источник постоянного тока напряжением 50 В. Структурная схема данной модификации стенда с системой УСАВП и моделью поезда приведена на рисунке 3, а общий вид опытного образца стенда – на рисунке 4.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

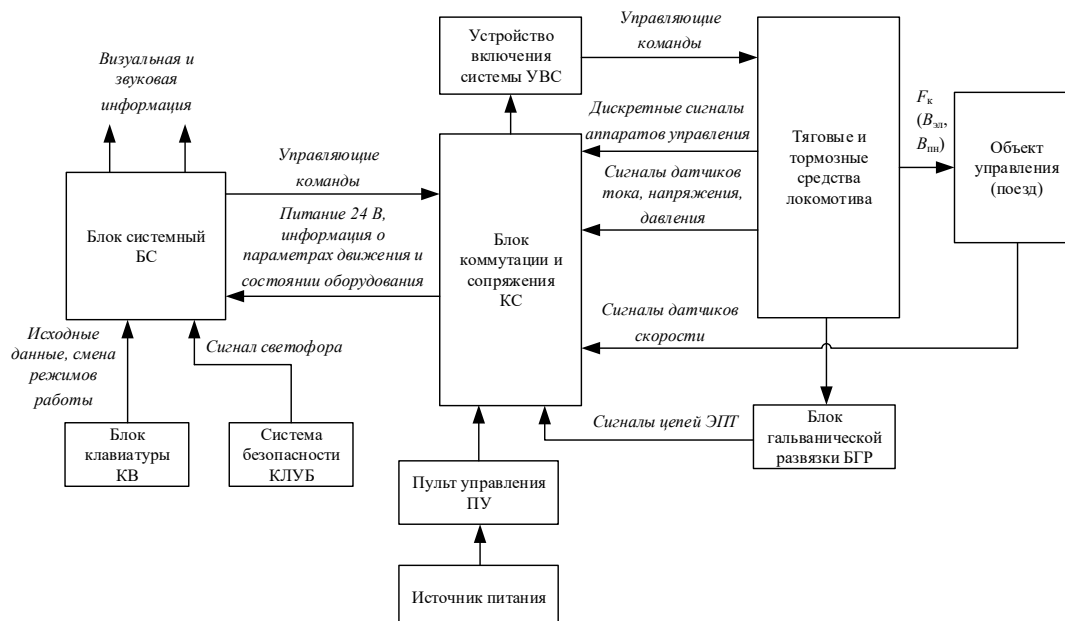


Рисунок 2 – Структурная схема системы автоведения УСАВПП-01 электровоза ЧС7

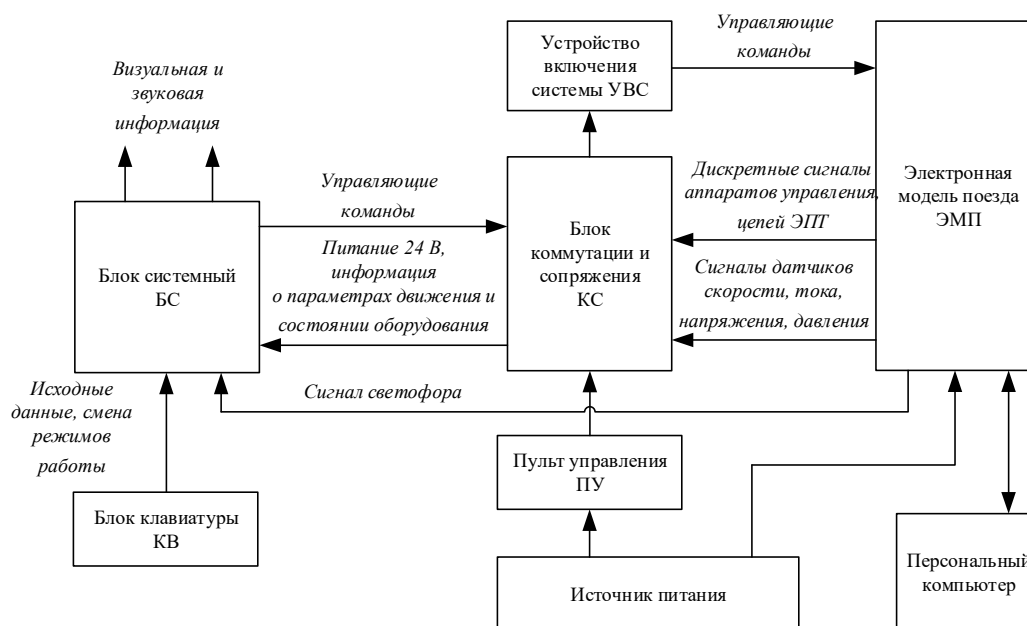


Рисунок 3 – Структурная схема предлагаемого стенда



Рисунок 4 – Общий вид опытного образца предлагаемого стенда

Рассмотрим функционирование данной модификации системы УСABП и ее взаимодействие с моделью поезда на разработанном стенде (см. рисунок 3). Напряжение 50 В от источника питания через пульт управления ПУ поступает в блок коммутации и сопряжения КС, где используется для питания системы и формирования управляющих команд, передаваемых в электронную модель поезда ЭМП. Это напряжение поступает и в модель поезда, где используется для формирования сигналов о состоянии аппаратов управления электровозом, сигналов от датчиков давления, тока, напряжения и скорости. Эти дискретные, аналоговые и частотные сигналы, формируемые ЭМП, поступают в блок КС, а оттуда в цифровом виде по интерфейсу «токовая петля» передаются в блок системный БС.

Блок БС является основным блоком системы автоведения, он осуществляет вывод визуальной и звуковой информации о параметрах движения поезда и о работе системы. Для переключения режимов работы системы и ввода в нее исходных данных к блоку БС подключена клавиатура КВ. Информация о сигнале светофора перед поездом также формируется моделью поезда и по интерфейсу CAN в цифровом виде поступает непосредственно в блок БС.

В режиме автоведения блок БС на основании информации о расписании поезда, пути и профиле, а также на основании параметров движения поезда формирует управляющие команды. Эти команды в цифровом виде передаются в блок КС, который в зависимости от принятых команд подает напряжение 50 В на те или другие провода цепей управления. Для подключения блока КС к проводам управления служит релейный модуль – устройство включения системы УВС. Сформированные команды по проводам управления через УВС поступают в модель поезда, которая вычисляет параметры движения поезда и параметры работы оборудования локомотива. На основе полученных значений модель поезда формирует сигналы от аппаратов и датчиков, поступающие в блок КС.

Рассмотренный стенд позволяет полностью моделировать режим автоведения и имеет ряд преимуществ перед существующими аналогами: возможность демонстрации работы системы УСABП как в режиме «Советчик», так и в режиме «Автоведение» при подготовке специалистов (в т. ч. локомотивных бригад), возможность оценки качества функционирования системы УСABП в стационарных условиях после переустановки программного обеспечения, возможность проведения исследований работы системы УСABП с целью дальнейшего совершенствования данной системы, применение физической системы автоведения и математической модели поезда. Так, при обновлении программного обеспечения системы УСABП комплект блоков системы с обновленным программным обеспечением может быть подключен к стенду для проверки. После включения системы и ввода исходных данных система УСABП переводится в режим автоведения и начинает управлять математической моделью поезда. На дисплей компьютера, связанного с моделью поезда, выводится информация о параметрах движения поезда (скорости, токе двигателей, расходе электроэнергии, отклонения от расписания, отклонения от точки прицельного торможения и т. д.), что позволяет оценить качество работы системы с обновленным программным обеспечением. Если качество управления в чем-либо не соответствует требуемому, такой подход позволяет оперативно скорректировать алгоритм управления и произвести повторную установку программного обеспечения.

Возможен вариант реализации стенда с системой автоведения и моделью поезда, требующий меньшего количества аппаратной составляющей системы автоведения, но аналогично позволяющий проверить работу УСABП в режиме «Автоведение». В данном варианте из аппаратной части системы автоведения УСABП-01 электровоза ЧС7 требуются только блок системный БС и блок клавиатуры КВ, а также источник постоянного тока напряжением 24 В для блока БС. Модель поезда ЭМП, также выполненная в виде отдельного блока, осуществляет взаимодействие с блоком БС по цифровым интерфейсам. Таким образом, здесь модель поезда заменяет блоки КС, УВС. Управляющие команды и запросы системы о состоянии оборудования передаются по цифровому интерфейсу в модель поезда. На

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

основании принятых команд и запросов модель поезда аналогично осуществляет расчет параметров движения поезда. Из модели поезда в блок БС в цифровом виде поступают пакеты данных о выполнении принятых команд, состоянии оборудования и о параметрах движения моделируемого поезда. Структурная схема этой модификации стенда приведена на рисунке 5.

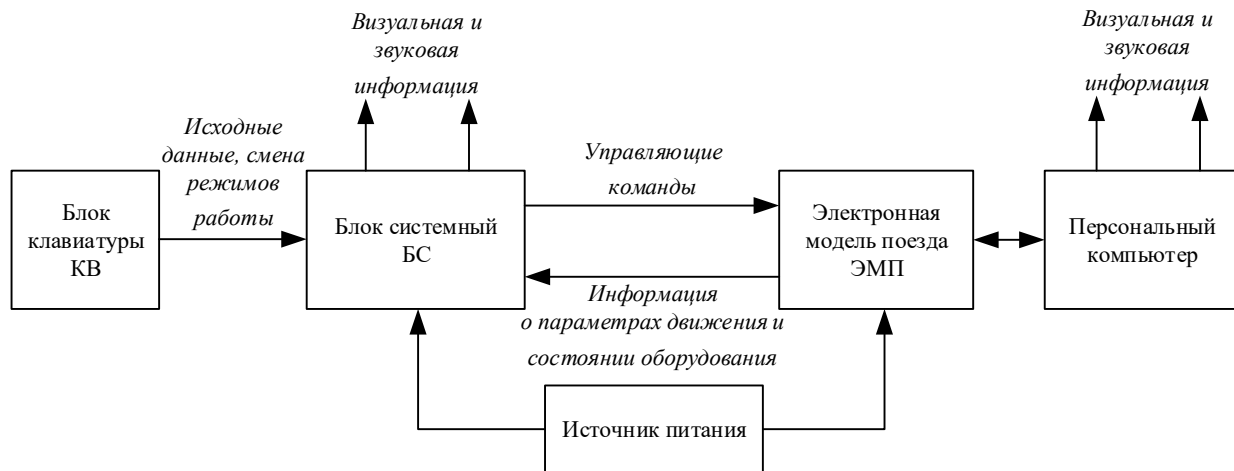


Рисунок 5 – Структурная схема предлагаемого стенда с упрощенной аппаратной составляющей системы автоведения УСABП-01

Преимуществами такого варианта стенда для исследований системы автоведения является значительное упрощение аппаратной части как проверяемой системы автоведения, так и модели поезда. В то же время данный вариант стенда не позволяет проверить работу ряда блоков системы автоведения и оценить их влияние на качество управления.

Данный стенд был рассмотрен применительно к модификации системы УСABП, разработанной для электровоза ЧС7, не оборудованного микропроцессорной системой управления и диагностики (МСУД). В то же время все современные электровозы оборудованы МСУД, которая обеспечивает управление тяговым оборудованием электровоза по командам машиниста либо системы автоведения. Поэтому на современных электровозах система УСABП аппаратно представляет собой один или несколько блоков, интегрированных с МСУД и оборудованных программным обеспечением для автоведения. Вывод информации машинисту система УСABП осуществляет через дисплей МСУД. Поэтому стенд для испытаний современных модификаций системы УСABП целесообразно интегрировать со стендом для испытаний МСУД. Вместо блоков системы УСABП рассмотренного выше стенда к стенду испытаний УСABП и МСУД будут подключаться блоки МСУД. Задачами модели поезда также будут прием команд, поступающих от МСУД, проведение моделирования и вывод в МСУД информации о состоянии оборудования и о параметрах движения моделируемого поезда. Конкретные особенности стенда и в этом случае будут зависеть от особенностей данного подвижного состава и от особенностей сигналов, которые формирует и принимает МСУД.

Важнейшей составляющей такого стенда является модель поезда. Широкое развитие микропроцессорной техники позволяет аппаратно реализовать ее в виде электронного блока, основой которого является программируемый микроконтроллер, взаимодействующий с персональным компьютером. На основании входных сигналов – команд, сформированных системой автоведения, микроконтроллер по заданной программе формирует определенные выходные электрические сигналы, моделирующие сигналы от аппаратов и датчиков. Для формирования моделью поезда сигналов напряжением 50 В можно использовать транзисторы либо транзисторные оптопары, управляемые микроконтроллером. При подключении микроконтроллера к цепям 50 В необходимо применять гальваническую развязку. Наличие связи микроконтроллера с персональным компьютером позволит передавать параметры

модели поезда на компьютер, оперативно перезагружать программу модели поезда, изменять данные о поезде, пути и профиле. Математическое описание поезда в этом случае представляет собой специальную программу, загруженную в микроконтроллер. Данная программа должна описывать движение поезда под действием приложенных к нему сил, изменение силы тяги локомотива и тока тяговых двигателей в зависимости от скорости и позиции управления, изменение тормозной силы при торможении и другие особенности работы локомотива.

Существуют различные подходы к формированию математической модели поезда, определяемые задачами конкретного исследования. Так, при выполнении тяговых расчетов чаще всего используется модель, представляющая поезд в виде материальной точки, которая движется под действием сил тяги F , торможения B и сопротивления движению W [5]. Это движение можно описать уравнением движения поезда:

$$m \frac{dv}{dt} = F - W - B, \quad (1)$$

где m – масса поезда;

v – скорость движения.

Для тех случаев, когда требуется учитывать взаимодействие локомотивов и вагонов поезда между собой (например, оценить продольные силы, возникающие в поезде в режиме автоведения), используются другие модели поезда, в которых поезд рассматривается в виде длинной упругой нити или в виде цепочки тел, связанных друг с другом. Так, дискретная многомассовая модель, разработанная коллективом ученых Днепропетровского института инженеров транспорта (ДИИТа), представляет поезд как цепочку из n тел (локомотивов и вагонов), которые соединены друг с другом упруго-диссипативными межвагонными соединениями [6]. Уравнение движения здесь записывается отдельно для каждого локомотива (вагона) и имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{v}_i = \frac{S_{i+1} - S_i + F_i}{m_i}, i = \overline{1, n}; S_{n+1} = 0; \\ \dot{q}_i = v_{i-1} - v_i, i = \overline{2, n}; \\ \dot{x}_1 = v_1 = -\dot{q}_1, \end{cases} \quad (2)$$

где v_i – скорость i -го экипажа;

S_i – продольная сила в i -м межвагонном соединении;

F_i – равнодействующая сил, действующих на i -й локомотив (вагон);

m_i – масса i -го локомотива (вагона);

q_i – деформация i -го межвагонного соединения;

x_i – координата i -го локомотива (вагона).

Уравнение движения каждого локомотива (вагона) в этом случае дополняется выражениями для расчета деформаций межвагонных соединений и продольных сил, возникающих в этих соединениях при деформации поглощающих аппаратов. Дискретная многомассовая модель поезда позволяет достаточно точно оценить динамические процессы,

происходящие в поезде, что является особенно актуальным для грузовых поездов, в которых могут возникать продольные силы значительной величины [7]. В зависимости от поставленной задачи в модели поезда могут использоваться математические описания механической части подвижного состава, тягового электропривода и т. д.

Необходимо отметить, что рассмотренные модели поезда (в виде материальной точки и дискретная многомассовая) используются и в программном обеспечении системы УСАВП с целью выбора энергетически рационального режима движения. В связи с меньшим спектром решаемых задач по сравнению с моделями поезда для рассмотренного стенда описание данных моделей несколько проще. Выбор конкретной модели и особенности ее описания зависят от типа подвижного состава, на котором установлена система УСАВП, а также от версии программного обеспечения системы. При выборе энергетически рационального режима движения модель поезда в системе УСАВП использует информацию о профиле пути, о тяговых, токовых и тормозных характеристиках локомотива. Проверка системы автоведения с помощью рассмотренного стенда позволит оценивать эффективность выбора энергооптимального режима и при необходимости доработать модель поезда и алгоритмы выбора такого режима, используемые в УСАВП.

Предложенные подходы к созданию стенда с моделью поезда для проверки систем автоведения могут быть применены и к модификациям системы УСАВП, разработанным для других пассажирских и грузовых локомотивов и для электропоездов. В каждом случае особенности конструкции стенда и модели поезда будут определяться поставленными задачами, особенностями конкретного подвижного состава и конкретной модификации УСАВП.

Таким образом, использование подобных стендов, оснащенных математической моделью поезда и аппаратной частью конкретной системы автоведения, позволит повысить качество подготовки специалистов по эксплуатации и обслуживанию данных систем; объективно оценивать качество работы существующих и разрабатываемых систем автоведения, а также систем автоведения с обновленным программным обеспечением; повышать качество управления систем автоведения. Все это позволит значительно расширить применение систем автоведения при управлении тяговым подвижным составом, что обеспечит повышение безопасности движения поездов, снижение напряженности труда локомотивных бригад, повышение экономии энергоресурсов и точности выполнения графика движения поездов.

Список литературы

1. Автоматизация электроподвижного состава : учебник / под ред. А. Н. Савоськина. – Москва : Транспорт, 1990. – 311 с. – Текст : непосредственный.
2. Универсальная система автоведения электровозов пассажирского движения УСАВП: Руководство по эксплуатации КНГМ.466451.001 РЭ. – Москва : АВП «Технология», 2016. – 127 с. – Текст : непосредственный.
3. Каштанов, А. Л. Оценка эффективности использования УСАВП в грузовом движении / А. Л. Каштанов, А. Н. Ларин, А. В. Пономарев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2010. – № 4. – С. 49–54.
4. Стенд для проверки систем автоведения ЧС-100С: Руководство по эксплуатации СВТИ.468222.021 РЭ. – Москва : «АВП Технология», 2019. – 98 с. – Текст : непосредственный.
5. Розенфельд, В. Е. Теория электрической тяги : учебник / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. – Москва : Транспорт, 1983. – 328 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.
7. Вершинский, С. В. Динамика вагона : учебник / С. В. Вершинский, В. Н. Данилов, И. И. Чесноков. – Москва : Транспорт, 1991. – 360 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Savos'kin A.N., Baranov L.A., Plaks A.V., Feoktistov V.P. *Avtomatizatsiya elektropodvizhnogo sostava* [Automation of Electric Rolling Stock]. Moscow, Transport Publ., 1990, 311 p. (In Russian).
2. *Universalnaya sistema avtovedenia elektrovozov passajirskogo dvizhenia USAVPP* [Universal system of automatic driving of electric locomotives of passenger traffic UAPTDS]. User manual KNGM.466451.001 RE, Moscow, AVP «Technologia» Publ., 2016, 127 p. (In Russian).
3. Kashtanov A.L., Larin A.N., Ponomarev A.V. Evaluation of the effectiveness of USAVP use in freight traffic [Ochenka effektivnosti ispolzovaniya USAVP v gruzovom dvizhenii]. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2010, no. 4 (4), pp. 49-54 (In Russian).
4. *Stend dilya proverki system avtovedenia CHS100S* [Stand for checking the automatic train control systems CHS100S]. User manual SVTI.468222.021 RE, AVP «Technologia» Publ., 2019, 98 p. (In Russian).
5. Rosenfeld V.E., Isaev I.P., Sidorov N.N. *Teoria elektricheskoi tyagi: uchebnik* [Theory of electric traction: textbook]. Moscow, Transport Publ., 1983, 328 p. (In Russian).
6. Blokhin E.P., Manashkin L.A. *Dinamica poezda (nestacionarnie prodolnie kolebania)* [Train dynamics (unsteady longitudinal oscillations)]. Moscow, Transport Publ., 1982, 222 p. (In Russian).
7. Vershinskii S.V., Danilov V.N., Husidov V.D. *Dinamica vagona* [The dynamics of the car]. Moscow, Transport Publ., 1991, 360 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Жухин Никита Олегович

Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ)).

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

Ассистент кафедры «Электропоезда и локомотивы», ПУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (916) 859-49-37.

E-mail: rzd1997@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Zhukhin Nikita Olegovich

Russian University of Transport (RUT(MIIT)).

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

Assistant of the department «Locomotives and multiple-unit trains», RUT (MIIT).

Phone: +7 (916) 859-49-37.

E-mail: rzd1997@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Жухин, Н. О. Применение модели поезда для исследования работы системы автоведения / Н. О. Жухин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 1 (53). – С. 27 – 36.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Zhukhin N.O. Application of the train model to research the operation of the automatic train driving system. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 1 (53), pp. 27-36 (In Russian).

УДК 656.25

А. Р. Азизов, Э. К. Аметова

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

МЕТОД МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ БЛОКОВ НАБОРНОЙ ГРУППЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

Аннотация. В статье приведены результаты теоретических исследований в организации построения системы диагностирования, микропроцессорных блоков наборной группы железнодорожной автоматики и телемеханики. Проведен анализ известных способов диагностирования технических устройств, таких как субъективные способы, которые основаны на определении состояния объекта человеком с использованием слуха, зрения, осязания и обоняния. Применение данного способа диагностирования в устройствах, содержащих

микропроцессоры, не является эффективным. Показана актуальность для условий железнодорожного транспорта с его высокими требованиями по обеспечению безопасного движения поездов, решения задач, технического исследования и разработки модели. Исследованию подлежали изделия, выполненные с применением микроконтроллеров, математических выражений для определения критериев оценки процесса диагностирования. Рассмотрена возможность осуществления операции по диагностированию устройств при использовании микропроцессорной техники в оборудовании, не отвечающем за безопасность движения поездов системы блочной маршрутной релейной централизации в период отсутствия действий по заданию либо по отмене маршрутов, при этом с целью достижения максимальной эффективности в процессе диагностирования необходимо учитывать особенности каждой конкретной станции в отдельности.

Разработан и проанализирован граф сетей Петри переходов системы диагностирования блоков наборной группы для определения показателя готовности системы. В результате анализа функционирования системы блочной маршрутной централизации получены математические выражения для определения критериев оценки процесса диагностирования. Разработан и проанализирован граф переходов системы диагностирования блоков наборной группы для определения показателя готовности использованы программируемые микроконтроллеры, повышающие возможности разработки и применения полностью автоматических систем диагностики.

Показано, что момент времени, определяющий фактический заступ области с рабочими параметрами, является случайной величиной и подчиняется гауссову закону распределения.

Предложен метод получения коэффициента готовности и его математического выражения с использованием аппарата полумарковских процессов при законе распределения времени до возникновения отказов.

Ключевые слова: методы диагностирования, области исследования, автоматизированные процессы, железнодорожная автоматика и телемеханика, микроконтроллеры, коэффициент готовности, теория вероятности, качество и эффективность систем, марковские процессы.

Asadulla R. Azizov, Elnara K. Ametova

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

METHOD OF MATHEMATICAL MODELING OF ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL DIAGNOSTICS SYSTEM OF MICROPROCESSOR UNITS OF RAILWAY AUTOMATION AND TELEMCHANICS SETTING GROUP

Abstract. The article presents the results of theoretical research in the organization of the construction of a diagnostic system, microprocessor blocks of a typesetting group of railway automation and telemechanics. The analysis of known methods of diagnosing technical devices, such as subjective methods that are based on determining the state of an object by a person using hearing, sight, touch and smell. The use of this diagnostic method in devices containing microprocessors is not effective. The relevance for the conditions of railway transport, with its high requirements for ensuring the safe movement of trains, problem solving, technical research and development, models is shown. The products made with the use of microcontrollers, using mathematical expressions to determine the criteria for evaluating the diagnostic process, were subject to research. The possibility is considered to carry out operations for diagnosing devices when using microprocessor technology in equipment that is not responsible for the safety of trains of the block route relay centralization system during the absence of actions on the assignment or cancellation of routes, while in order to achieve maximum efficiency in the process of diagnosis, it is necessary to take into account the specifics of each specific station separately.

A graph of Petri nets of transitions of the diagnostic system of blocks of a set group has been developed and analyzed to determine the readiness indicator. As a result of the analysis of the functioning of the block route centralization system, mathematical expressions were obtained to determine the criteria for evaluating the diagnostic process. The graph of transitions of the diagnostic system of the blocks of the set group was developed and analyzed, programmable microcontrollers were used to determine the readiness indicator, increasing the possibilities of developing and using fully automatic diagnostic systems.

It is shown that the moment of time determining the actual spade of the area with operating parameters is a random variable and obeys the Gaussian distribution law.

A method is proposed for obtaining the readiness coefficient and its mathematical expression using the apparatus of semi-markov processes with the law of time distribution before the occurrence of failures.

Keywords: diagnostic methods, research areas, automated processes of railway automation and telemechanics, microcontrollers, availability coefficient, probability theory, quality and efficiency of systems, markov processes.

Большие возможности в повышении эффективности технологической системы железнодорожной автоматики и телемеханики зарезервированы в организации их эксплуатации и обслуживании по действительной потребности. При этом необходимость в

техническом обслуживании объектов определяется по их действительному состоянию, а не по наработке или истекшему сроку эксплуатации. Однако внедрение подобного принципа в практику обслуживания технических объектов связано с необходимостью оценки их состояния. Процесс оценки состояния технических объектов получил название диагностирования.

Известны несколько способов проведения диагностирования – органолептические (субъективные) и инструментальные (объективные) [9]. Субъективные способы основаны на определении состояния объекта человеком с использованием слуха, зрения, осязания и обоняния. Использование данного способа диагностирования в устройствах, содержащих микропроцессоры, не является эффективным. В данной статье рассматривается объективный способ диагностирования, базирующийся на резервных вычислительных мощностях микропроцессора. Процедура диагностирования, в которой часть заранее определенных функций выполняет человек-оператор, предусматривает существенное взаимодействие объекта и технических средств, подверженных диагностированию, как правило, такие системы входят в состав автоматизированной. В настоящее время, когда в автоматических системах широко применяются программируемые микроконтроллеры, имеются возможности разработки и применения полностью автоматических систем диагностики, что весьма актуально для условий железнодорожного транспорта с его высокими требованиями по обеспечению безопасного движения поездов [1, 4]. Использование микроэлектронных технологий в блоках наборной группы системы маршрутной релейной централизации позволяет возложить функции диагностирования на встроенные программируемые устройства, которые помимо управления объектами имеют возможность проводить операции диагностирования в период между поездными операциями. Анализ технологического процесса железнодорожных станций показывает, что имеется достаточное количество времени для диагностирования устройств между операциями по замыканию и размыканию маршрутов, даже если предположить, что межпоездной интервал составляет минимальное время, равное 8 – 10 минут.

Высокая эффективность процесса диагностирования может быть достигнута только в том случае, когда в процессе диагностирования будет максимально учтена специфика технологического процесса работы станции железнодорожного транспорта, в нашем случае это график движения поездов и межпоездной интервал, что требует тщательного анализа программного обеспечения, перечня оборудования его состояния в период между заданиями маршрутов.

Можно предположить, что процесс создания системы диагностирования состоит из нескольких этапов. На первом этапе предполагается рассматривать процесс диагностирования с учетом выбранных критериев и на их основе определять требования к алгоритмам действия процесса диагностирования [6 – 10].

На втором этапе осуществляется процесс проектирования программного обеспечения микроконтроллера [4].

Наконец, на третьем этапе должны быть оценены эффективность диагностирования и его программного обеспечения [5, 10].

Рассмотрим один из способов оценки эффективности процесса диагностирования элементов наборной группы системы блочной маршрутной релейной централизации. Для этого в качестве критерия оценки организации взаимодействия элементов системы диагностирования предложено использовать вероятность отсутствия отказа в произвольный момент времени при нахождении блоков наборной группы в рабочем состоянии (период установки и размыкания маршрутов либо период между процедурой задания маршрутов). Этот критерий принято называть показателем готовности и обозначать K_r [10 – 13]. Логично предположить, что указанный показатель находится в прямой зависимости от суммарной вероятности пребывания элементов блоков наборной группы в произвольный момент времени в подмножестве n состояний, включающем в себя все ситуации, когда в блоках, находящихся

в рабочем режиме, отсутствуют отказы. Следует предположить, что имеет место исследование вопроса, как часто необходимо проводить процедуру диагностирования.

Для расчета частоты диагностирования в работах [6, 9] предложены следующие выражения:

$$\begin{aligned} \nu_0 &= 1 / T_{\text{опт}} = \sqrt{\lambda / t_d} - \xi; \\ R &= R_p / R_d; \\ \lambda_{\Sigma} &= \lambda + R\lambda'; \\ \nu_0 &= \sqrt{\frac{\lambda_{\Sigma}}{t_d}} (1 + R), \end{aligned} \quad (1)$$

где ν_0 – частота диагностирования;

$T_{\text{опт}}$ – период оптимального опроса диагностируемого блока;

λ – интенсивность отказов элементов блока в период задания/размыкания маршрутов;

t_d – время диагностирования исследуемого блока;

ξ – интенсивность использования блоков (задание/размыкание маршрутов);

R_p – вероятность пребывания блока в период задания/размыкания маршрутов;

R_d – вероятность пребывания блока в период отсутствия задания/размыкания маршрутов;

λ' – интенсивность возникновения отказов в период отсутствия задания/размыкания маршрутов (специальный режим).

Известен близкий к коэффициенту готовности показатель – коэффициент использования ($K_{\text{и}}$) [5 – 8]. Это значение вероятности застать объект в произвольный момент времени t в работоспособном состоянии с учетом того, что исправные объекты по графику ставятся на профилактику, т. е. исключаются из рабочего цикла. Статистически коэффициент использования $K_{\text{и}}(t)$ интерпретируется выражением

$$K_{\text{и}}(t) = \frac{\sum_{r=1}^l T_{\text{пр}}}{\sum_{r=1}^l T_{\text{пр}} + \sum_{j=1}^m T_{\text{пж}} + \sum_{i=1}^n T_i}, \quad (2)$$

где n – число отказов объекта в интервале времени $(0, t)$;

m – число профилактик в интервале времени $(0, t)$;

l – число рабочих циклов в интервале времени $(0, t)$;

$T_{\text{пр}}$ – время сохранения работоспособности объекта в R -м цикле;

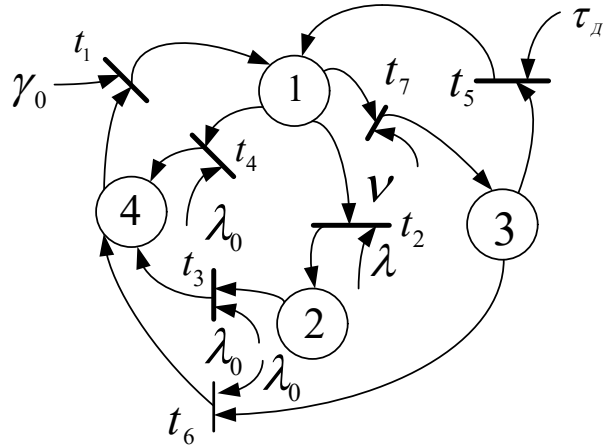
$T_{\text{пж}}$ – длительность j -й проверки;

T_i – длительность ремонта после i -го отказа объекта.

При этом следует иметь в виду, что $K_{\text{и}}(t) \rightarrow 1$. Определимся с численными значениями – к примеру, интервал времени $(0, t)$ для блоков наборной группы может достигать нескольких лет, переменная n определяется по результатам статистического наблюдения, m определяется нормативными значениями профилактических работ блоков наборной группы, $T_{\text{пр}}$ определяется по результатам статистического анализа, численные значения переменных $T_{\text{пж}}$ и T_i определяются нормативными документами по проведению профилактических работ и ремонту оборудования, переменная l определяется интенсивностью работы станции в предположении, что в течение года с интервалом времени 8 – 10 мин будут задаваться маршруты, эта переменная может достигнуть значений $(24 \times 365 \times 60) / 8 = 65700$ циклов.

Так как устройства наборной группы системы блочной маршрутной централизации предназначены для непрерывного использования, то они могут быть продиагностированы в период отсутствия поездной работы на станции, т.е. в специальном режиме. Граф переходов системы диагностирования из состояния в состояние, выполненный на основе теории сетей Петри, показан на рисунке [3].

Позиции графа, изображенного на рисунке, представляют собой следующие состояния: 1 – объект используется по назначению и в нем отсутствуют отказы; 2 – наборный блок используется по назначению и в нем возник отказ, который обнаружен в процессе задания маршрута; 3 – испытуемое устройство в специальном режиме диагностирования и в нем обнаружен отказ; 4 – наборный блок не функционирует, так как возник отказ в результате неисправностей внешних устройств, не входящих в состав объектов диагностирования (к примеру, кнопка, излом контактов кнопки, отсутствие питания на клеммах кнопки и т. д.).



Граф переходов системы диагностирования блоков наборной группы для определения показателя готовности τ_d

Показатель готовности для этого случая оценивается по вероятности нахождения объекта в состоянии 1 ($r=1$) и вычисляется по формуле (1), где λ_0 и γ_0 – интенсивности отказов и восстановления блоков наборной группы; τ – интенсивность проведения диагностирования блоков наборной группы:

$$K_r = \nu / \left[(1/\tau_d)\nu^2 + (1 + \lambda/\tau_d)\nu + \lambda \right]. \quad (3)$$

Из выражения (3) видно, что показатель готовности системы диагностирования блоков наборной группы зависит от организации диагностирования и ν – частоты диагностирования, интенсивности возникновения отказов λ , а также его контроле пригодности τ_d , т. е. более полно характеризует предлагаемую систему диагностирования.

Рассмотрим процедуру смены состояния объекта диагностирования, выполненную на основе графа сети Петри, где λ_0 и γ_0 – интенсивности отказов и восстановления блоков наборной группы:

$$\begin{aligned} I(1) &= \{t_1, t_5\}; O(1) = \{t_4, t_7, t_2\}; \\ I(2) &= \{t_2\}; O(2) = \{t_3\}; \\ I(3) &= \{t_7\}; O(3) = \{t_5, t_6\}; \\ I(4) &= \{t_3, t_4, t_6\}; O(4) = \{t_1\}; \\ I(t_1) &= \{\gamma_0, 4\}; O(t_1) = \{1\}; \\ I(t_2) &= \{\lambda, 1\}; O(t_2) = \{2\}; \\ I(t_3) &= \{2, \lambda_0\}; O(t_3) = \{4\}; \\ I(t_4) &= \{\lambda_0, 1\}; O(t_4) = \{4\}; \\ I(t_5) &= \{\tau_d, 3\}; O(t_5) = \{1\}; \\ I(t_6) &= \{\lambda_0, 3\}; O(t_6) = \{4\}; \\ I(t_7) &= \{\nu, 1\}; O(t_7) = \{3\}. \end{aligned} \quad (4)$$

Согласно системе уравнений (4) блок наборной группы, находясь в нормальном исправном работающем состоянии 1 (т. е. идет процесс по установке или размыканию маршрута), может перейти в другое состояние 3 при выполнении условий перехода t_7 , т. е. зависит от организации диагностирования согласно переменной ν , что способствует переходу системы в позицию 3, а также возможно изменение состояния по переходу t_4 в соответствии с показателями интенсивностей возникновения отказов наборных блоков λ_0 , что способствует переходу системы в позицию 4, кроме этого система может перейти в позицию 2 по переходу t_2 в соответствии с показателями интенсивности возникновения отказов наборных блоков λ . Элементами, которые обеспечивают выполнение условий переходов из одного состояния в другое, являются переменные t_i (где $i = 7$). Рассмотрим значения этих переменных: входной функцией переменной t_1 является выражение $I(t_1) = \{\gamma_0, 4\}$, из которого следует, что с учетом интенсивности восстановления блоков наборной группы γ_0 устройство из состояния 4 (с наличием отказа) после восстановления перейдет в нормальный режим работы; переменная t_2 , входные воздействия которой описывается формулой $I(t_2) = \{\lambda, 1\}$, из которой следует, что при наличии значения интенсивности возникновения отказов блока наборной группы устройство способно перейти из нормального рабочего состояния 1 в позицию 2, когда в устройстве возникает отказ; переменная t_3 , входные воздействия которой описываются формулой $I(t_3) = \{2, \lambda_0\}$, из которой следует, что с учетом интенсивностей возникновения отказов блоков наборной группы и согласно его выходной функции $O(t_3) = \{4\}$ диагностируемое устройство перейдет из состояния 2, когда наборный блок используется по назначению и в нем возник отказ, в состояние 4, соответствующее наличию отказа в диагностируемом устройстве; переменная t_4 определяется входной функцией $I(t_4) = \{\lambda_0, 1\}$, из которой следует, что при нахождении объекта диагностирования в позиции 1 и при наличии переменной интенсивности возникновения отказов наборных блоков λ_0 диагностируемый объект согласно выходной функции $O(t_4) = \{4\}$ должен переместиться в позицию 4; переменная t_5 в соответствии с ее входной функцией $I(t_5) = \{\tau_d, 3\}$ способна изменить состояние диагностируемого объекта и при наличии составляющей контролепригодности τ_d перевести диагностируемый объект согласно выходной функции $O(t_5) = \{1\}$ из состояния объекта в режиме диагностирования при возникновении в нем устранимого отказа в позицию 1; переменная t_6 в соответствии с ее входной функцией $I(t_6) = \{\lambda_0, 3\}$ при наличии известной переменной интенсивности возникновения отказов наборных блоков λ_0 , способная перевести диагностируемый объект из состояния в режиме диагностирования при возникновении в нем отказа, который устраняется, в позицию 4, соответствующую наличию отказа в наборном блоке; переменная t_7 в соответствии с ее входной функцией $I(t_7) = \{\nu, 1\}$ при наличии составляющей, отражающей организацию диагностирования ν , согласно выходной функции $O(t_7) = \{3\}$ переводит устройство в состояние режима диагностирования блока наборной группы.

Выход характеристик и составляющих элементов блока за границы области, ограничивающей пространство допустимых отклонений, дает основание сделать предположение о возможном возникновении отказа. Отрезок времени, определяющий момент до первого пересечения границ области с рабочими параметрами, является случайной величиной, вероятность значения которой соответствует гауссову закону распределения, который и характеризует надежность показатели блока наборной группы.

Если периодически, с постоянным периодом времени (Т), с помощью надежных микроэлектронных средств в специальном режиме производится диагностирование элементов блока наборной группы при условии, что блок находится в режиме постоянного

использования, то процесс взаимодействия элементов диагностирования может находиться в одной из трех позиций, а именно: блоки наборной группы находятся в рабочем режиме, в них возможен отказ; диагностируется исправный блок; составные элементы находятся в состоянии диагностирования и по результатам этого действия, при необходимости, восстанавливаются. При этом математическая формула определения вероятности возникновения отказа в наборном блоке за интервал времени T примет вид:

$$F(T) = 0,5 + \int_m^T \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}\right] dt, \quad (5)$$

где m и σ – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение случайной величины времени до возникновения отказа в диагностируемом устройстве.

Известно [8], что полумарковский процесс – это случайный процесс, который меняет свои состояния в соответствии с заранее известным законом распределения вероятностей, при этом время нахождения случайного процесса в одном из состояний, которое является также случайной характеристикой, закон распределения которой зависит как от текущего состояния, так и от состояния, в которое оно перейдет в следующий момент времени.

Следующие постулаты приняты за основу построения модели, они позволяют считать функционирование блоков наборной группы системы маршрутной централизации полумарковскими:

изменение состояний блоков наборной группы происходит случайным образом (стохастический процесс);

изменение состояний и длительность нахождения элементов наборной группы обеспечиваются двумя независимыми множествами потоков с произвольными распределениями вероятностей (время перехода из состояния ожидания в рабочее носит случайный характер, время нахождения в рабочем состоянии также носит случайный характер, так как зависит от типа маршрута и количества стрелок в маршруте);

статистические свойства процессов блоков наборной группы, происходящих в процессе их изменения (задание или отмены маршрутов) и определяющих время пребывания системы в состояниях, которые определяется временем действия дежурного по станции в период задания или отмены маршрутов и не зависят от числа уже установленных маршрутов (система является однородной) и от способа попадания системы в каждое из возможных состояний;

действия, при которых происходит изменение состояния элементов системы при выполнении управляющих функций, происходят в течение времени, равного нескольким секундам.

Используя аппарат теории полумарковских процессов, получим выражение для определения коэффициента готовности:

$$K_r = \omega_1(T + [1 - F(T)]\tau_d + F(T)\tau_b), \quad (6)$$

где τ_d – контролепригодность;

τ_b – ремонтпригодность;

ω_1 – среднее время пребывания объекта в исправном состоянии за период времени T ,

$$\omega_1 = \int_0^T [1 - F(t)] dt. \quad (7)$$

Используя выражения (5–7) и в силу того, что вероятность возникновения неисправности в блоках наборной группы пренебрежимо мала, получим:

$$K_r = \frac{m - 3\sigma + \int_{m-3\sigma}^T \left\{ 0,5 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_m^t \exp\left[-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}\right] dt \right\} dt}{T + 0,5(\tau_b + \tau_d) + \frac{(\tau_b - \tau_d)}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_m^T \exp\left[-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}\right] dt}. \quad (8)$$

Выражение (8) отражает зависимость K_r от показателей контролепригодности τ_d , ремонтпригодности τ_b , безотказности m , σ и периодичности диагностирования T .

Приближенное значение оптимального периода диагностирования, при котором достигается максимум K_r , можно рассчитать по формуле

$$T = -x + \sqrt{(x+m)^2 + \sqrt{2\pi}\sigma(x-m) - 1,5\sigma^2},$$

где

$$x = \frac{\sqrt{2\pi\sigma(\tau_d + \tau_b) - 2m(\tau_b - \tau_d)}}{2(\sqrt{2\pi}\sigma + \tau_b - \tau_d)}. \quad (9)$$

Рассмотрен способ анализа, организации и построения системы диагностирования блоков наборной группы железнодорожной автоматики и телемеханики с учетом применения в каждом блоке индивидуального программируемого микроконтроллера. Введение в программное обеспечение контроллеров дополнительных функций диагностирования потребовало изменения принципов построения обслуживания этих устройств работниками дистанции сигнализации и связи. Применение процедуры диагностирования предполагает использовать автоматическую систему, так как исключает функции, выполняемые специалистами, рассмотрены известные критерии оценки системы диагностирования, основанные на использовании известных статистических характеристик устройств наборных блоков. В результате анализа функционирования системы блочной маршрутной централизации получены математические выражения для определения критериев оценки процесса диагностирования. Разработан и проанализирован граф переходов системы диагностирования блоков наборной группы для определения показателя готовности. Метод получения K_r и его математического выражения с использованием аппарата полумарковских процессов при законе распределения времени до возникновения отказов (гауссовом) носит общий характер и поэтому может быть использован при других исходных данных. Оговоренный выше способ позволяет с достаточной достоверностью рассчитать максимальное значение K_r и соответствующий оптимальный период диагностирования при различных значениях статистических показателей. Анализ полученного для K_r выражения позволяет определить зависимость этого показателя от переменных τ_d , τ_b , безотказности и периодичности диагностирования.

Список литературы

1. Azizov A.R., Ametova E.K. Developing of microelectronic block HCC. *IJARSET*, India, vol. 6, issue3, March 2019, pp. 8563-8567.
2. Азизов, А. Р. Контроль технического состояния микроэлектронного блока НСС как задача распознавания образов / А. Р. Азизов, Э. К. Аметова. – Текст : непосредственный // Технические науки и инновация. – 2019. – № 1. – С. 20–25.
3. Аметова, Э. К. Теория сетей Петри при разработке и исследовании математической модели блока НСО / Э. К. Аметова, А. Р. Азизов. – Текст : непосредственный. – Фергана : Научно-технический журнал ФарПИ. – 2020. – Том 24. – № 5. – С. 218–221.

4. Ametova E., Azizov A., Yuldashev Sh. Microprocessor technology in the devices railway automation and telemechanics. *Asian Journal of Research*, 2020, SJIF 6,1, IFS 3,7.
5. Ефанов, Д. В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : монография / Д. В. Ефанов. – Санкт-Петербург : Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2016. – 171 с. – Текст : непосредственный.
6. Васильев, Б. В. Надежность и эффективность радиоэлектронных устройств / Б. В. Васильев, Б. А. Козлов, Л. Г. Ткаченко. – Москва : Советское радио, 1964. – 151 с. – Текст : непосредственный.
7. Вульман, И. Д. Определение оптимальной периодичности профилактического контроля радиотехнических устройств при стационарном потоке отказов / И. Д. Вульман. – Текст : непосредственный // Радиотехника. – 1973. – № 9. – С. 41–45.
8. Гнеденко, Б. В. Математические методы в теории надежности (основные характеристики надежности и их статистический анализ) / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. – Москва : Наука, 1965. – 254 с. – Текст : непосредственный.
9. Волков, Ю. В. Системы технического диагностирования, автоматического управления и защиты : учебное пособие / Ю. В. Волков. – Санкт-Петербург : Высшая школа технологии и энергетики СПб ГУПТД, 2019. – Часть 1. – 115 с. – Текст : непосредственный.
10. Койда, А. Н. Организация диагностирования объектов сложной структуры / А. Н. Койда, А. В. Мозгалеvский. – Текст : непосредственный // Техническая диагностика, эксплуатация управляющих вычислительных машин : сборник научных трудов. – Киев : Наукова думка, 1980. – С. 63–71.

References

1. Azizov A.R., Ametova E.K. Developing of microelectronic block HCC. *IJARSET*, India, vol. 6, issue 3, March 2019, pp. 8563-8567.
2. Azizov A.R., Ametova E.K. Monitoring of the technical condition of the NSS microelectronic unit as an image recognition task. *Tekhnicheskie nauki i innovacija – Technical sciences and innovation*, 2019, no. 1, pp. 20-25.
3. Ametova E.K., Azizov A.R. The theory of Petri nets in the development and research of the mathematical model of the NSO block. *Scientific and Technical Journal of FarPI*, Fergana, 2020, vol. 24, no. 5, pp. 218-221.
4. Ametova E., Azizov A., Yuldashev Sh. Microprocessor technology in the devices railway automation and telemechanics. *Asian Journal of Research*, 2020, SJIF 6,1, IFS 3,7.
5. Efanov D.V. *Funkcional'nyj kontrol' i monitoring ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemehaniki: monografija* [Functional control and monitoring of railway automation and telemechanics devices : monograph]. Saint Petersburg, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University Publ., 2016, 171 p. (In Russian).
6. Vasil'ev B.V., Kozlov B.A., Tkachenko L.G. *Nadezhnost' i jeffektivnost' radiojelektronnyh ustrojstv* [Reliability and efficiency of electronic devices]. Moscow, Soviet radio Publ., 1964, 151 p. (In Russian).
7. Vul'man I.D. Determination of the optimal frequency of preventive monitoring of radio engineering devices with a stationary flow of failures. *Radiotekhnika – Radio engineering*, 1973, no. 9, pp. 41-45 (In Russian).
8. Gnedenko B.V. Beljaev Ju.K., Solov'ev A.D. *Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti (osnovnye harakteristiki nadezhnosti i ih statisticheskij analiz)* [Mathematical methods in reliability theory (main reliability characteristics and their statistical analysis)]. Moscow, Science Publ., 1965, 254 p. (In Russian).
9. Volkov Ju.V. *Sistemy tehničeskogo diagnostirovanija, avtomatičeskogo upravlenija i zashhity: učebnoe posobie* [Systems of technical diagnostics, automatic control and protection : textbook]. St. Petersburg, Higher School of Technology and Energy of St. Petersburg GUPTD Publ., 2019, part 1, 115 p. (In Russian).

10. Kojda A.N., Mozgalevskij A.V. Organization of diagnostics of objects of complex structure. Technical diagnostics, operation of control computers: collection of scientific papers. Kiev, Naukova dumka Publ., 1980, pp. 63-71.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Азизов Асадулла Рахимович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

Темирйулчилар ул., д. 1, г. Ташкент, 100167, Республика Узбекистан.

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

Тел.: + 998 (93) 539-54-21.

E-mail: azizov_asadulla@mail.ru

Аметова Элнара Куандиковна

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

Темирйулчилар ул., д. 1, г. Ташкент, 100167, Республика Узбекистан.

Доктор философии (Ph. D.) по техническим наукам, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика», ТГТрУ.

Тел.: + 998 (90) 975-88-82.

E-mail: elnara.ametova.84@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Азизов, А. Р. Метод математического моделирования организационно-технологической системы диагностирования микропроцессорных блоков наборной группы железнодорожной автоматики и телемеханики / А. Р. Азизов, Э. К. Аметова. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 1 (53). – С. 36 – 45.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Azizov Asadulla Rakhimovich

Tashkent State Transport University (TSTU).

1, Temiryulchilar st., Tashkent, 100167, Republic of Uzbekistan.

Ph. D. in Engineering, professor of the department «Automation and telemechanics», TSTU.

Phone: + 998 (93) 539-54-21.

E-mail: azizov_asadulla@mail.ru

Ametova Elnara Kuandikovna

Tashkent State Transport University (TSTU).

1, Temiryulchilar st., Tashkent, 100167, Republic of Uzbekistan.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Automation and telemechanics», TSTU.

Phone: + 998 (90) 975-88-82.

E-mail: elnara.ametova.84@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Azizov A.R., Ametova E.K. Method of mathematical modeling of organizational and technological diagnostics system of microprocessor units of railway automation and telemechanics setting group. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 1 (53), pp 36-45 (In Russian).

УДК 656.259.12:681.518.52:517.54

М. М. Соколов, А. Г. Ходкевич

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

КЛАССИФИКАЦИИ СОСТОЯНИЯ РЕЛЬСОВОЙ ЦЕПИ НА ОСНОВАНИИ ЗНАЧЕНИЯ ЕЕ ВХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Аннотация. На железных дорогах Российской Федерации основным устройством определения свободности или занятости путевого участка является электрическая рельсовая цепь. В статье представлены результаты моделирования влияния параметров рельсовой линии на область входного сопротивления рельсовой цепи в различных режимах. В качестве математического аппарата применены теории четырехполюсников и конформных отображений. В качестве объекта исследования выбрана современная рельсовая цепь тональной частоты частотой 420 Гц. Для наглядности в работе приведено изменение номограмм входных сопротивлений при отклонении параметров рельсовой линии, а также при внесении продольных и поперечных неисправностей.

Приведенные результаты моделирования позволяют утверждать, что графическое представление области входного сопротивления дает возможность однозначно определить состояние, в котором находится исследуемая рельсовая цепь, а области входных сопротивлений для контрольного и шунтового режимов работы рельсовой цепи полностью разделены во всем диапазоне изменения параметров рельсовой линии. Данный факт позволяет использовать значение входного сопротивления в качестве дополнительного критерия уточнения

состояния рельсовой цепи. Комплексные значения входных сопротивлений могут быть использованы в качестве диагностического признака для автоматизации классификации состояния рельсовых цепей и интеллектуальной поддержки процессов управления движением поездов. Развитие предлагаемой системы классификации позволит перейти на полную автоматизацию систем управления технологическим процессом движения поездов и в дальнейшем увязать их в единую систему сбора и обработки данных и оперативного управления. В перспективе применение комплексного значения входного сопротивления позволит отказаться от классической схемы рельсовой цепи с путевым приемником.

Ключевые слова: рельсовая цепь, рельсовая линия, конформное отображение, диагностирование.

Maxim M. Sokolov, Anton G. Khodkevich

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

THE STATE OF THE TRACK CIRCUIT CLASSIFICATION BASED ON THE VALUE OF THE INPUT RESISTANCE

Abstract. On the railways of the Russian Federation, the main device for determining the vacancy or occupancy of a track section is an electric track circuit. The article presents the results of modeling the influence of the parameters of the rail line on the region of the input resistance of the rail circuit in various modes. Theories of quadripoles and conformal mappings are applied as a mathematical apparatus. As an object of study, a modern rail circuit with a voice frequency of 420 Hz was chosen. For clarity, the paper shows the change in the input resistance nomograms when the parameters of the rail line deviate, as well as when longitudinal and transverse faults are introduced.

The presented simulation results allow us to assert that the graphical representation of the input resistance area gives you the opportunity to unambiguously determine the state in which the track circuit under study is located, and the input resistance areas for the control and shunt modes of operation of the track circuit are completely separable over the entire range of changes in the parameters of the rail line. This fact allows us to use the value of the input resistance as an additional criterion for clarifying the state of the track circuit. The complex values of the input resistances can be used as a diagnostic feature to automate the classification of the state of track circuits and intelligently support train control processes. The development of the proposed classification system will make it possible to switch to full automation of train traffic process control systems and in the future to link them into a single system for collecting and processing data and operational management. In the future the use of the complex value of the input resistance will make it possible to abandon the classical scheme of a track circuit with a track receiver.

Keywords: rail circuit, rail line, conformal mapping, diagnostics.

Одним из базисов построения систем, обеспечивающих безопасность движения поездов (систем автоматики и телемеханики) на железных дорогах мира, является информация о свободности или занятости участка пути [1].

В настоящее время существуют разнообразные способы определения местоположения подвижной единицы: датчики колес точечного типа, датчики колес и колесных пар линейного типа, системы с излучением электромагнитных волн, магнитные индуктивные шлейфы, системы видеонаблюдения и др. На железных дорогах Российской Федерации основным устройством определения свободности или занятости путевого участка является электрическая рельсовая цепь. Одним из преимуществ рельсовых цепей по отношению к альтернативным устройствам определения состояния участка пути является возможность контроля целостности рельсовой линии, что в целом повышает безопасность движения поездов за счет предотвращения схода подвижного состава вследствие излома или изъятия рельса.

В настоящее время определение координаты нахождения подвижной единицы нашло широкое применение на участках подгорочных путей сортировочных горок с помощью напольных технических средств: точечных путевых датчиков, рельсовых цепей, индуктивно-проводных датчиков, устройств импульсного зондирования. Наличие недостатков этих технических средств, а также трудностей, связанных с их эксплуатацией, привели к необходимости поиска альтернативных решений.

Рассмотрим возможность организации непрерывного контроля состояния рельсовой линии с применением существующей аппаратуры рельсовых цепей тональной частоты.

Современная тональная рельсовая цепь, широко применяемая на железных дорогах Российской Федерации, в общем состоит из генератора тональной частоты, устройств согласования на питающем конце, рельсовой линии, устройств согласования на релейном конце и путевого приемника (рисунок 1).

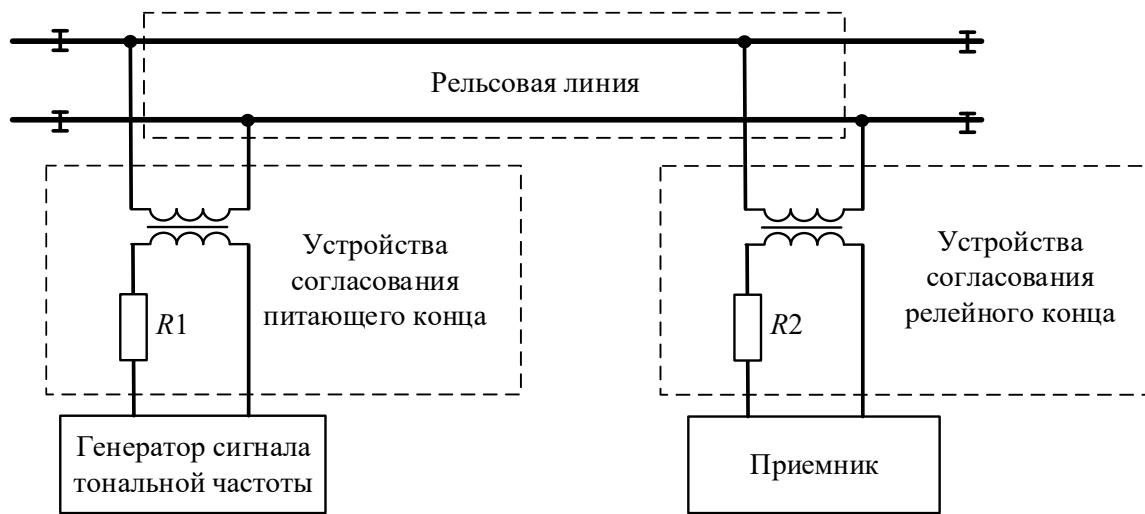


Рисунок 1 – Схема тональной рельсовой цепи

Существующий подход контроля уровня сигнала на входе приемника состояния позволяет определить, является ли рельсовая цепь свободной и исправной или нет. Таким образом, приемник не может сообщить по какой причине параметры сигнала на его входе не соответствуют нормальному режиму. В то же время снижение уровня сигнала может быть вызвано

- изломом рельса, а значит, въезд подвижного состава на рельсовую цепь недопустим;
- изменением состояния сопротивления изоляции рельсовой линии, и тогда движение поездов может быть допустимо, пусть и с некоторыми ограничениями.

При анализе состояния рельсовой цепи принято использовать математический аппарат теории четырехполюсников, так как схема замещения рельсовой цепи представляет собой каскадное соединение схем замещения входящих в нее элементов. При этом каждый элемент схемы замещения по рисунку 1 представляет собой четырехполюсник [2].

С целью уточнения состояния рельсовой цепи при снижении уровня сигнала на входе путевого приемника авторами предлагается воспользоваться математическим аппаратом конформных отображений, который позволяет выполнить преобразование области сопротивлений нагрузки рельсовой цепи в область входных сопротивлений [3].

Для дробно-линейного преобразования по виду уравнения (1) в результате конформного преобразования правой полуплоскости значений комплексных сопротивлений нагрузки (Z_n) получается множество значений входного сопротивления, имеющих форму окружности или сектора, лежащих в правой полуплоскости. Радиус (ρ) и координаты центра (ω_0) этих окружностей будут рассчитываться по формулам (2) и (3) [4]:

$$Z_{\text{вх}} = \frac{A \cdot Z_n + B}{C \cdot Z_n + D}; \quad (1)$$

$$\omega_0 = \frac{A \cdot \bar{D} + B \cdot \bar{C}}{2 \cdot \text{Re}(C \cdot \bar{D})}; \quad (2)$$

$$\rho = \left| \frac{A}{C} - \omega_0 \right| = \left| \frac{(A \cdot D - B \cdot C)}{2 \cdot \operatorname{Re}(C \cdot \bar{D})} \right|, \quad (3)$$

где A, B, C, D – A -параметры эквивалентной схемы замещения, включающей в себя устройства согласования на питающем конце, рельсовую линию и устройства согласования на релейном конце (ЭСЗ);

$\bar{C}, \bar{D}$ – сопряженные комплексные величины.

При этом на значения A, B, C, D согласно классической теории работы рельсовых цепей [2] будут влиять следующие параметры: сопротивление изоляции рельсовой линии ($R_{\text{и}}$), сопротивления рельсов, ордината наложения шунта или проявления поперечной неисправности ($L_{\text{ш}}$) и ордината места полного электрического разрыва рельсовой линии ($L_{\text{к}}$).

Рассмотрим характер изменения полученных областей входных сопротивлений ЭСЗ в различных режимах работы рельсовой цепи.

В качестве предмета анализа рассмотрим рельсовую цепь длиной 500 м и частотой сигнального тока 420 Гц. В качестве трансформаторов релейного и питающего концов использованы трансформаторы марки ПОБС-2А с коэффициентом трансформации $n = 38$.

Номограммы, представленные на рисунках 2 – 5, получены в среде математического моделирования MathCad на основании выражений (1) – (3) и схем замещения рельсовой цепи в нормальном, шунтовом и контрольном режимах [5].

Нормальный режим работы рельсовой цепи характеризуется ее свободным и исправным состоянием, он должен выполняться в широком диапазоне изменения сопротивления изоляции рельсовой линии.

Изменение области входных сопротивлений ЭСЗ в нормальном режиме работы рельсовой цепи при различных сопротивлениях изоляции ($R_{\text{и}}$) приведено на рисунке 2.

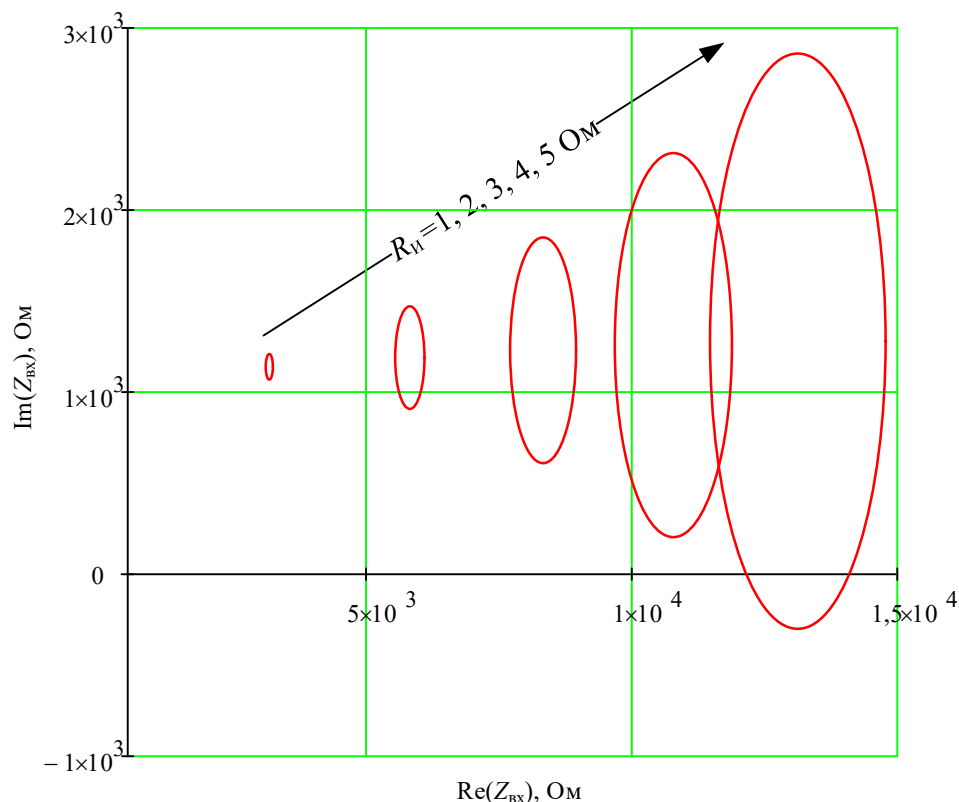


Рисунок 2 – Области входных сопротивлений ЭСЗ в нормальном режиме работы рельсовой цепи

Из рисунка 2 видно, что область входных сопротивлений ЭСЗ в нормальном режиме работы рельсовой цепи зависит от сопротивления изоляции рельсовой линии следующим образом: с увеличением сопротивления изоляции центр окружности смещается в сторону увеличения активного сопротивления, а радиус самой области увеличивается.

Шунтовой режим работы рельсовой цепи характеризуется ее исправным состоянием в случае, когда рельсовая линия шунтируется в любой точке сопротивлением со значением не менее 0,06 Ом.

Изменение области входных сопротивлений ЭСЗ в шунтовом режиме работы рельсовой цепи при сочетании различных сопротивлений изоляции и координате наложения шунта значением 0,06 Ом ($L_{ш}$) приведено на рисунке 3.

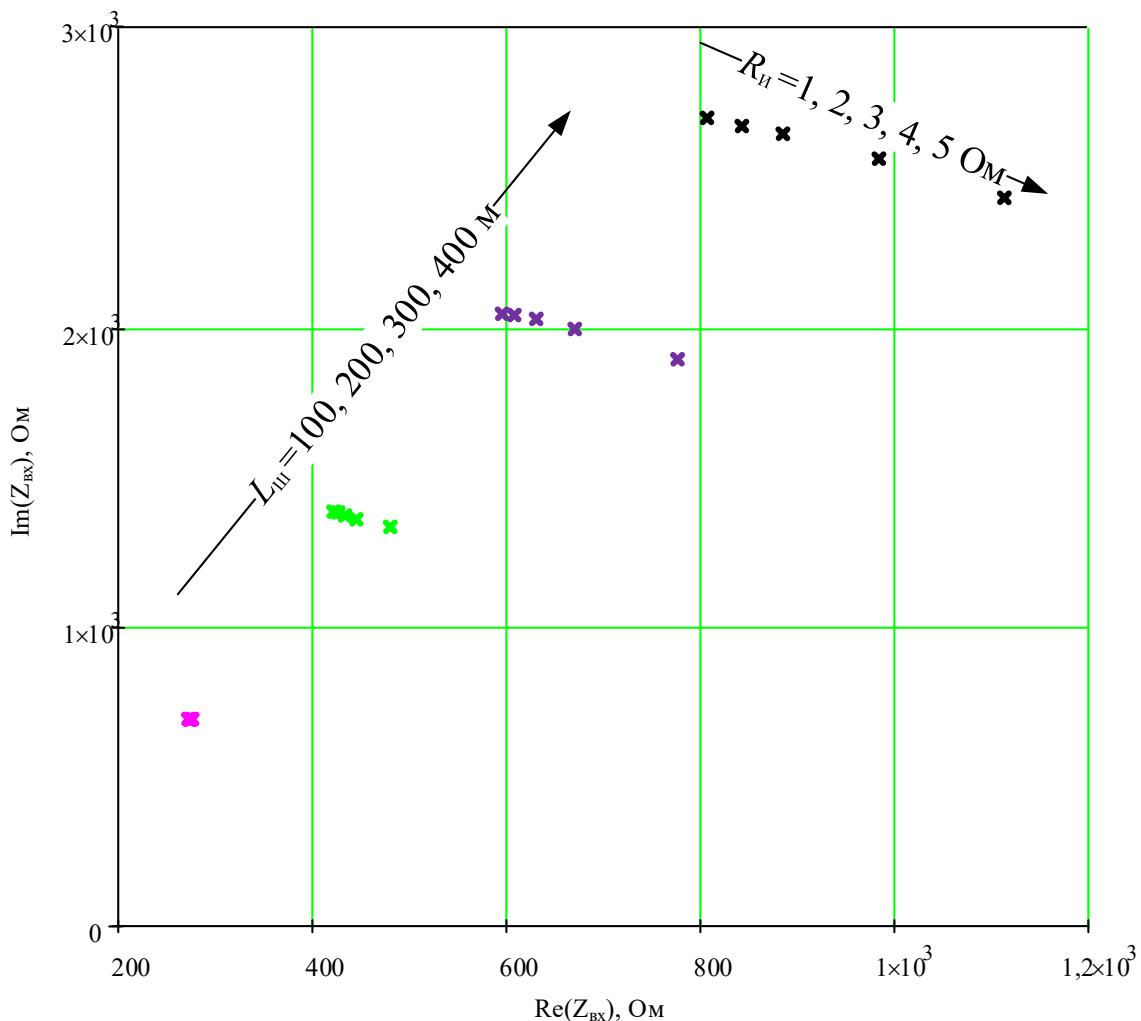


Рисунок 3 – Область входных сопротивлений ЭСЗ в шунтовом режиме работы рельсовой цепи

Из рисунка 3 видно, что область входных сопротивлений ЭСЗ в шунтовом режиме работы рельсовой цепи зависит от сопротивления изоляции рельсовой линии и координаты наложения шунта следующим образом:

радиус окружности значительно меньше радиуса окружности, характеризующей нормальный режим;

значения координаты центра окружности значительно меньше значения координаты центра окружности, характеризующей нормальный режим;

радиус окружности значительно меньше значений координаты ее центра (поэтому вместо окружности на рисунке крестиком обозначен ее центр);

с увеличением сопротивления изоляции область смещается в сторону увеличения активного сопротивления и в сторону уменьшения индуктивного сопротивления;

по мере удаления места наложения шунта от питающего конца область смещается в сторону увеличения активного и индуктивного сопротивлений.

Контрольный режим работы рельсовой цепи характеризуется ее свободным состоянием и полным электрическим разрывом рельсовой линии в любой ее точке.

Изменение области входных сопротивлений ЭСЗ в контрольном режиме работы рельсовой цепи при сочетании различных сопротивлений изоляции и координат полного электрического разрыва рельсовой линии (L_k) приведено на рисунке 4.

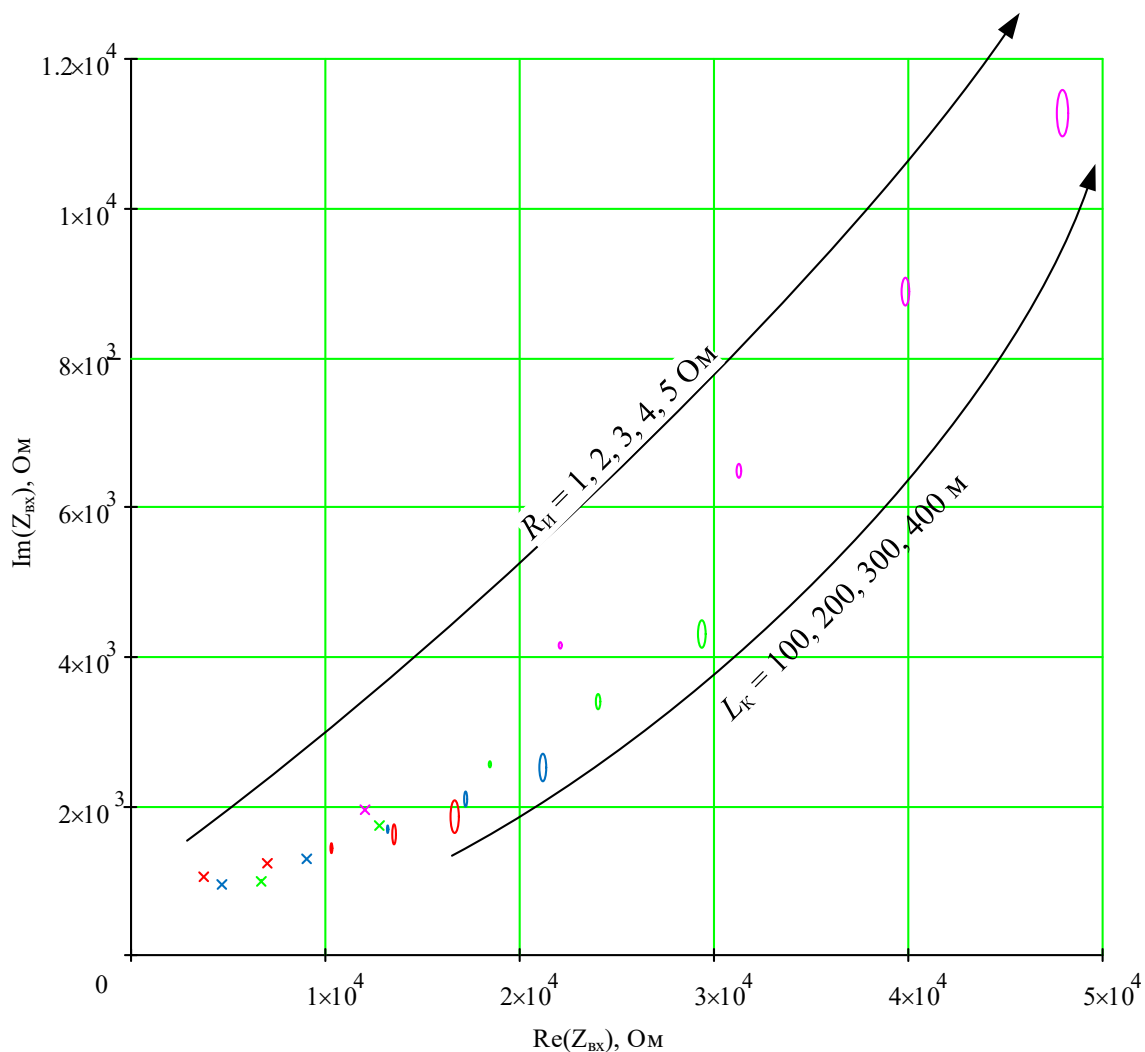


Рисунок 4 – Области входных сопротивлений ЭСЗ в контрольном режиме работы рельсовой цепи

Из рисунка 4 видно, что область входных сопротивлений ЭСЗ в контрольном режиме работы рельсовой цепи зависит от сопротивления изоляции рельсовой линии и координаты наложения шунта следующим образом:

радиус окружности значительно меньше радиуса окружности, характеризующей нормальный режим;

значения координаты центра окружности значительно больше значения координаты центра окружности, характеризующей нормальный режим;

радиус окружности значительно меньше значений координаты ее центра;

с увеличением сопротивления изоляции область смещается в сторону увеличения активного и индуктивного сопротивлений;

по мере удаления места полного электрического разрыва рельсовой линии от питающего конца область смещается в сторону увеличения активного сопротивления.

Оценим, насколько различимы области входных сопротивлений ЭСЗ в шунтовом и контрольном режимах работы рельсовой цепи.

На рисунке 5 представлено взаимное расположение областей входных сопротивлений рельсовой цепи в шунтовом и контрольном режимах.

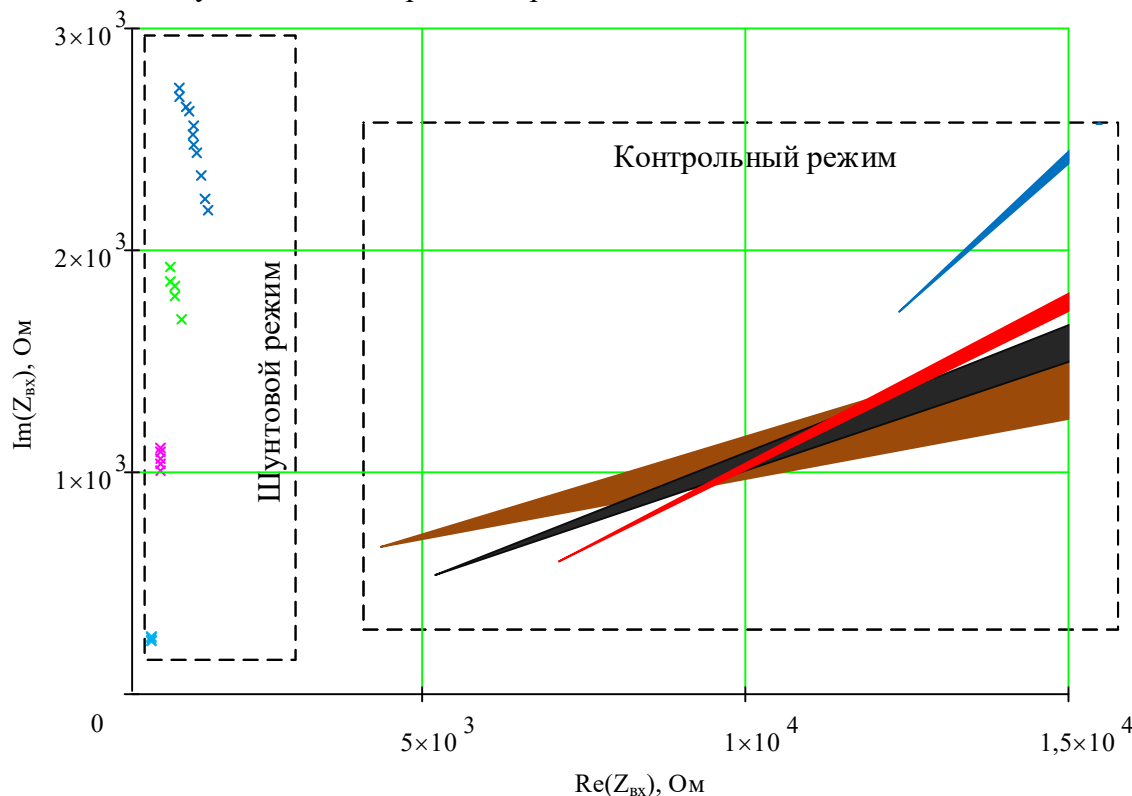


Рисунок 5 – Области входных сопротивлений ЭСЗ в шунтовом и контрольном режимах работы рельсовой цепи

Как показано на рисунке 5, области входных сопротивлений ЭСЗ полностью различимы во всем диапазоне изменения сопротивления изоляции рельсовой линии, координаты наложения шунта и координаты полного электрического разрыва рельсовой линии.

Графическое представление области входного сопротивления позволяет однозначно определить состояние, в котором находится исследуемая рельсовая цепь.

Характер изменения этой области позволяет оценить степень изменения параметров указанного состояния (сопротивление изоляции, координата наложения шунта, координата полного электрического разрыва рельсовой линии) и может использоваться в качестве диагностического признака в системах мониторинга и диагностики рельсовых цепей.

Развитие предлагаемой системы классификации позволит перейти на полную автоматизацию систем управления технологическим процессом движения поездов и в дальнейшем увязать их в единую систему сбора и обработки данных и оперативного управления.

Список литературы

1. Theeg G., Vlasenko S. ed. Railway Signalling & Interlocking: international Compendium. Hamburg: DVV Media Group GmbH, 2019, 552 p.
2. Волков, Е. А. Теория линейных электрических цепей железнодорожной автоматики, телемеханики и связи / Е. А. Волков, Э. И. Санковский, Д. Ю. Сидорович. – Москва : Маршрут, 2005. – 507 с. – Текст : непосредственный.

3. Лунев, С. А. Контроль технического состояния элементов системы электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог / С. А. Лунев, Р. Ш. Аюпов, М. М. Соколов. – Текст : непосредственный // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2010. – № 1. – С. 254–257.
4. Seroshtanov S.S., Sokolov M.M., Khodkevich A.G. Mathematical processing of the signal in the track circuit for determining the location of the rolling stock. *J. Phys. Conf. Ser.* 1901, 012025 (2021). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1901/1/012025>.
5. Лаврентьев, М. А. Методы теории функций комплексного переменного / М. А. Лаврентьев, Б. В. Шабат. – Москва : Лань, 2002. – 688 с. – Текст : непосредственный.
6. Тарасов, Е. М. Принцип инвариантности в системах контроля состояний рельсовых линий : монография / Е. М. Тарасов, Д. В. Железнов, А. С. Белоногов. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2016. – 213 с. – Текст : непосредственный.
7. Соколов, М. М. Построение условного алгоритма диагностирования станционных рельсовых цепей тональной частоты / М. М. Соколов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2018. – № 2 (34). – С. 150–158.
8. Соколов, М. М. Локализация отказов в аппаратуре релейного конца станционных рельсовых цепей тональной частоты / М. М. Соколов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2019. – № 3 (39). – С. 118–125.
9. Патент № 184692 Российская Федерация, МПК B61L25/00. Рельсовая цепь : 2018121913/22 : заявлено 13.06.2018 : опубликовано 06.11.2018 / Лунев С. А., Соколов М. М. – 4 с.: ил. – Текст : непосредственный.

References

1. Theeg G., Vlasenko S. ed. Railway Signalling & Interlocking: international Compendium. Hamburg: DVV Media Group GmbH, 2019, 552 p.
2. Volkov E.A., Sankovskiy E.I., Sidorovich D.Y. *Teoriya lineynykh ehlektricheskikh cepej zheleznodorozhnoj avtomatiki, telemekhaniki i svyazi* [Theory of linear electrical circuits of railway automatics, telemechanics and communication]. Moscow, Marshrut Publ., 2005, 507 p. (In Russian).
3. Lunev S.A., Ayupov R.Sh., Sokolov M.M. Control of the technical condition of the elements of the power supply system of non-hauling railways consumers. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka – Scientific problems of transport in Siberia and the Far East*, 2010, no. 1, pp. 254-257 (In Russian).
4. Seroshtanov S.S., Sokolov M.M., Khodkevich A.G. Mathematical processing of the signal in the track circuit for determining the location of the rolling stock. *J. Phys. Conf. Ser.* 1901, 012025 (2021). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1901/1/012025>.
5. Lavrent'ev M.A., Shabat B.V. *Metody teorii funktsij kompleksnogo peremennogo* [Methods of the theory of functions of a complex variable]. Moscow, Lan' Publ., 2002, 688 p. (In Russian).
6. Tarasov E.M., Zheleznov D.V., Belonogov A.S. *Princip invariantnosti v sistemah kontrolya sostoyanij rel'sovykh linij: monografiia* [The principle of invariance in the systems of state control of rail lines: monograph]. Moscow, Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport Publ., 2016, 213 p. (In Russian).
7. Sokolov M.M. Construction of conditional algorithm for diagnostics of tonal rail circuits on station. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2018, no. 2 (34), pp. 150-158 (In Russian).
8. Sokolov M.M. Search for failures of receiver end devices of tonal rail circuits on station. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2019, no. 3 (39), pp. 118-125 (In Russian).
9. Lunev S. A., Sokolov M. M. *Patent RU 184692 C2*, 31.06.2011.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Соколов Максим Михайлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-72.

E-mail: SokolovMM@mail.ru

Ходкевич Антон Геннадьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-72.

E-mail: ait-omgups@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Соколов, М. М. Классификации состояния рельсовой цепи на основании значения ее входного сопротивления / М. М. Соколов, А. Г. Ходкевич. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 1 (53). – С. 45 – 53.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sokolov Maxim Mikhailovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Automatics and telemechanics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-72.

E-mail: SokolovMM@mail.ru

Khodkevich Anton Gennad'evich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, head of department «Automatics and telemechanics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-72.

E-mail: ait-omgups@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Sokolov M.M., Khodkevich A.G. The state of the track circuit classification based on the value of the input resistance. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 1 (53), pp. 45-53 (In Russian).

УДК 656.212.5

**С. А. Бессоненко¹, А. А. Гунбин¹, А. А. Климов¹,
К. И. Корниенко^{2,3}, И. А. Ольгейзер^{2,4}, А. Н. Шабельников⁴**

¹Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС), г. Новосибирск, Российская Федерация;

²Ростовский филиал АО «НИИАС», г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация;

³Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация;

⁴Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОСНОВНОГО УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ ВАГОНОВ ПРИ СКАТЫВАНИИ С СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ

Аннотация. Представлены результаты исследования случайной величины основного удельного сопротивления движению вагонов при скатывании с сортировочной горки для современных условий эксплуатации с учетом обновления конструкции подвижного состава и появления новых типов вагонов. Предметом исследования являются параметры плотности распределения основного удельного сопротивления движению вагонов различных весовых категорий, перерабатываемых на сортировочной горке. Целью исследования является актуализация параметров основного удельного сопротивления движению вагонов, используемых для выполнения конструктивных и технологических расчетов сортировочных горок, предусмотренных правилами и нормами проектирования сортировочных устройств. Исследование выполнено на основании обработки статистических данных о фазовых траекториях скатывания вагонов Комплекса компьютерного зрения для контроля занятости сортировочных путей (КЗСП), разработанного специалистами Ростовского филиала НИИАСа. Статистические данные принимались для одиночных вагонов, скатывающихся

на прямых в плане участках сортировочных путей и при положительной температуре наружного воздуха, с целью исключения дополнительных сил сопротивления движению от стрелочных переводов и кривых, снега и инея для повышения точности получаемых результатов. На основании выполненных исследований определены плотности распределения основного удельного сопротивления движению вагонов для рассматриваемой сортировочной горки. Установлено значительное смещение области допустимых значений и плотности распределения случайной величины основного удельного сопротивления движению вагонов в сторону уменьшения. В том числе установлено, что значительная доля вагонопотока имеет значение основного удельного сопротивления движению вагонов менее минимально установленного по существующей методике расчета. Максимальное значение сопротивления, используемое при выполнении технологических расчетов, также является избыточным для современных условий. Средние значения величины основного удельного сопротивления движению, используемые при выполнении конструктивных расчетов, также существенно снизились. Таким образом, полученные результаты показали необходимость корректировки правил и норм проектирования сортировочных устройств в части определения расчетных значений случайной величины основного удельного сопротивления движению вагонов.

Ключевые слова: сортировочная горка, основное удельное сопротивление движению вагона, комплекс «Компьютерное зрение».

Sergey A. Bessonenko¹, Anton A. Gunbin¹, Aleksandr A. Klimov¹,
Konstantin I. Kornienko^{2,3}, Ivan A. Olgeyser^{2,4}, Alexandr N. Shabelnikov⁴

¹Siberian Transport University, Novosibirsk, the Russian Federation;

²Rostov Branch of JSC NIIAS, Rostov-on-Don, the Russian Federation;

³St. Petersburg State University of Communications of Emperor Alexander I, St. Petersburg, the Russian Federation;

⁴Rostov State University of Communications, Rostov-on-Don, the Russian Federation

INVESTIGATION OF THE PARAMETERS OF THE MAIN SPECIFIC RESISTANCE TO THE MOVEMENT OF CARS WHEN ROLLING DOWN A MARSHALLING YARD

Abstract. The results of a study of the random value of the main specific resistance to the movement of cars when rolling down a gravity hump for modern operating conditions are presented, taking into account the renewal of the rolling stock design and the emergence of new types of cars. The subject of the study is the distribution density parameters of the main specific resistance to the movement of cars of various weight categories processed on a gravity hump. The purpose of the study is to update the parameters of the main specific resistance to the movement of wagons used to perform structural and technological calculations of gravity hump, provided for by the rules and regulations for the design of marshalling devices. The study was carried out on the basis of the processing of statistical data on the phase trajectories of rolling cars of the Computer Vision Complex for monitoring the occupancy of marshalling tracks (KZSP), developed by specialists from the Rostov branch of NIIAS. Statistical data were taken for single cars rolling on straight sections of sorting tracks and at a positive outside temperature in order to exclude additional forces of resistance to movement from turnouts and curves, snow and hoarfrost to improve the accuracy of the results obtained. On the basis of the performed studies, the distribution densities of the main specific resistance to the movement of cars for the considered gravity hump were determined. A significant shift in the range of permissible values and distribution density of the random value of the main specific resistance to the movement of cars to the left side along the abscissa axis has been established. In particular, it was found that a significant proportion of the car traffic has a value of the main specific resistance to the movement of cars less than the minimum established by the existing calculation method. The maximum resistance value used when performing process calculations is also redundant for today's conditions. The average values of the value of the main specific resistance to motion, used in the performance of structural calculations, also decreased significantly. Thus, the results obtained showed the need to adjust the rules and norms for the design of sorting devices in terms of determining the calculated values of the random value of the main specific resistance to the movement of cars.

Keywords: gravity hump, the main specific resistance to the movement of the car, the complex «Computer vision».

На сети железных дорог общего пользования в настоящее время функционирует более 100 сортировочных горок разной мощности, имеющих различные техническое оснащение и структуру перерабатываемого вагонопотока. Значительное число сортировочных горок эксплуатируется также на крупных предприятиях промышленного транспорта, расположенных на железнодорожных путях необщего пользования. Для повышения перерабатывающей способности важнейших сортировочных станций и уровня безопасности сортировочного процесса на сети железных дорог ОАО «РЖД» реализована Программа модернизации сортировочных горок. В результате на основных сортировочных станциях сортировочные горки были оборудованы современными техническими средствами

механизации и системами горочной автоматики. При этом конструктивные параметры сортировочных горок (высота, конфигурация продольного профиля, длина и уклоны элементов профиля) в основном были оставлены на расчетных значениях по ранее разработанным проектам.

Расчет параметров продольного профиля сортировочных горок производится с использованием положений и методов, изложенных в Правилах и нормах проектирования сортировочных устройств. Последние Правила и нормы 2003 г. [1] в настоящее время отменены, а требования к проектированию сортировочных горок изложены в ряде действующих нормативных документов, при этом подробный порядок расчета сортировочных устройств на данный момент в действующих нормативах не изложен. В результате при разработке проектов новых или реконструкции существующих сортировочных горок используются положения и методы расчета, в том числе изложенные в уже не действующих нормативах.

Необходимо отметить, что в используемой методике расчета сортировочных горок используются параметры основного удельного сопротивления движению вагонов при скатывании, разработанные в 70-х – 80-х гг. прошлого столетия [2]. Очевидно, что за последующий период произошло существенное обновление вагонного парка, обращающегося на сети железных дорог, в том числе в части конструктивных особенностей, влияющих на величину сопротивления движению. Появились конструкции вагонов нового типа (инновационные, сочлененного типа, длиннобазные и др.), с подшипниками «кассетного типа», в том числе с повышенными нагрузками на ось, что также повлияло на динамику скатывания вагонов с горки и, как следствие, должно найти отражение в методике расчета параметров сортировочных горок.

В настоящее время конструктивные и технологические параметры сортировочных горок, рассчитанные по существующим методикам, могут не соответствовать действующим условиям эксплуатации в части расчетных характеристик перерабатываемого вагонопотока. В результате при эксплуатации сортировочных горок, рассчитанных по ранее действующим нормативам, могут возникать отклонения фактических скоростей движения отцепов на участках горки и в сортировочном парке от расчетных значений скорости скатывания.

Отклонение скоростного режима скатывания отцепов от расчетного может являться причиной возникновения случаев нарушения пространственно-временных интервалов на разделительных элементах, а также нагона одного отцепа другим, в том числе с превышением допустимых скоростей соударения вагонов и, как следствие, повреждения подвижного состава и находящихся в нем грузов. В реальных условиях эксплуатации фактические отклонения скоростей скатывания отцепов от расчетных значений корректируются устройствами горочной автоматики, в том числе за счет использования адаптивных систем управления. Однако не все сортировочные горки являются автоматизированными, а необходимость в дополнительном торможении отцепов приводит к увеличению соответствующих эксплуатационных расходов.

Таким образом, актуализация расчетных характеристик вагонопотока, перерабатываемого на сортировочных горках, в том числе параметров плотности распределения случайной величины основного удельного сопротивления движению вагонов, и соответствующая корректировка методик расчета конструктивных и технологических параметров сортировочных горок является актуальной задачей на современном этапе развития железнодорожного транспорта.

Исследования видов сопротивления движению вагонов при скатывании с сортировочной горки в нашей стране начались в 30-х гг. прошлого столетия [3] и к началу 80-х гг. были сформулированы основные положения по методике их расчета, которые применяются и в настоящее время. Так, при скатывании с сортировочной горки на отцеп могут действовать неуправляемые и управляемые силы сопротивления [4]. При этом к управляемым относят удельное сопротивление движению вагона при торможении (w_T) на механизированных или

немеханизированных тормозных позициях. Величина суммарного удельного сопротивления движению вагона при скатывании с горки определяется по формуле, Н/кН:

$$W_{\text{сум}} = W_0 + W_{\text{св}} + W_{\text{ск}} + W_{\text{сн}} + W_{\text{т}}, \quad (1)$$

где W_0 , $W_{\text{св}}$, $W_{\text{ск}}$, $W_{\text{сн}}$ – неуправляемые силы удельного сопротивления движению вагона соответственно основного, от среды и ветра, от стрелочных переводов и кривых, от снега и инея.

При решении задачи определения основного удельного сопротивления движению вагонов в реальных условиях эксплуатации принимались следующие условия проведения экспериментов, направленные на повышение точности получаемых результатов:

рассматривались траектории скатывания только одиночных вагонов, так как в отцепах из нескольких вагонов выделение данного вида сопротивления для каждого вагона является отдельной исследовательской задачей, решение которой в данном случае не целесообразно;

процесс движения вагонов рассматривался в пределах прямых в плане участков сортировочных путей, что позволило не учитывать значение удельного сопротивления движению от стрелочных переводов и кривых, $W_{\text{ск}}$;

рассматривалось движение вагонов на участках сортировочных путей после парковых тормозных позиций, что позволило не учитывать значение удельного сопротивления движению от торможения, $W_{\text{т}}$;

исследования проводились в летний и осенний периоды, когда температура наружного воздуха была положительной, что позволило не учитывать значение удельного сопротивления движению от снега и инея, $W_{\text{сн}}$.

Таким образом, для определения основного удельного сопротивления движению при принятых условиях проведения экспериментов использовалась формула, Н/кН:

$$W_0 = W_{\text{сум}} - W_{\text{св}}. \quad (2)$$

Известно, что общий запас энергии движения вагона складывается из потенциальной и кинетической энергии в начальной точке рассматриваемого маршрута и при решении уравнения движения отцепа в аналитическом виде может выражаться через начальную скорость движения вагона ($v_{\text{вх}}$, м/с). Скорость движения вагона в конечной точке маршрута ($v_{\text{вых}}$, м/с) определяется как разность общего запаса энергии движения вагона в начале участка и работы сил суммарного сопротивления движению. Таким образом, расчет суммарного удельного сопротивления движению вагона производился на основании изменения скоростей движения вагона на рассматриваемом участке по формуле (в данном случае производится сравнение численных показателей, а не физические значения расчетных величин):

$$w_{\text{сум}} = i - \frac{v_{\text{вых}}^2 + v_{\text{вх}}^2}{2 \cdot g' \cdot l \cdot 10^{-3}}, \quad (3)$$

где $W_{\text{сум}}$ – суммарное удельное сопротивление движению вагона при скатывании по расчетному участку, Н/кН; g' – ускорение свободного падения (с учетом инерции вращающихся частей вагона), м/с²; l – длина расчетного участка скатывания, м; i – уклон расчетного участка скатывания, ‰.

Расчет удельного сопротивления движению вагона от среды и ветра производился по существующей методике, при этом значения температуры наружного воздуха, а также направления и скорости ветра принимались по данным метеостанции за временной период скатывания конкретного вагона. Здесь необходимо отметить, что принятые условия проведения экспериментов – выполнение измерений на участках путей сортировочных парков – в данном случае приводили к наличию определенной погрешности получаемых

результатов вследствие наличия в определенных периодах скатывания отцепов искусственной защиты отдельных путей сортировочного парка от ветровых нагрузок, за счет расположения на соседних путях накапливаемых групп вагонов.

Исследования проводились на эксплуатируемой сортировочной горке средней мощности в два этапа.

1. Проведение натурных наблюдений за скатыванием одиночных вагонов с сортировочной горки [5, 6], по результатам которых было установлено значительное смещение области допустимых значений основного удельного сопротивления движению в левую сторону по оси абсцисс. Однако для получения более устойчивой функции распределения случайной величины и соответственно более точных результатов потребовалось значительно увеличить объем выборки, что связано со значительной трудоемкостью выполнения исследований. Поэтому был произведен анализ статистических данных о траекториях скатывания одиночных вагонов для тех же условий проведения эксперимента.

2. Обработка статистических данных производилась с использованием Комплекса компьютерного зрения для контроля занятости сортировочных путей (КЗСП), разработанного специалистами Ростовского филиала НИИАСа [7 – 9] и установленного на исследуемой сортировочной горке. Полученные результаты подтвердили тенденции изменения области допустимых значений случайной величины w_0 , выявленные на первом этапе исследований.

В результате проведенных исследований определены плотности распределения случайной величины w_0 для каждой весовой категории вагонов – легкой, легко-средней, средней, средне-тяжелой и тяжелой (согласно установленным в существующей методике градациям массы перерабатываемого вагонопотока), а также для разных типов вагонов [10]. Из указанных весовых категорий наиболее интересным представляется соотношение существующих и полученных по результатам выполненных исследований плотностей распределения случайной величины w_0 для следующих весовых категорий.

1. Легкой категории – так как по данным числовым значениям плотности распределения производится расчет высоты горки – важнейшего конструктивного параметра, определяющего начальный запас энергии скатывания отцепа и дальнейшую динамику его скатывания по расчетному маршруту. Кроме того, с использованием числовых значений данного распределения производится решение следующих задач:

- выбор «трудного» и «легкого» расчетных путей горочной горловины;
- установление расчетных параметров метеорологических условий, при которых производятся дальнейшие конструктивные и технологические горочные расчеты;
- определение расчетной высоты сортировочной горки;
- выполнение технологических расчетов по проверке расчетной высоты сортировочной горки и интервалов между скатыванием смежных расчетных бегунов.

2. Тяжелой категории – так как по данным числовым значениям плотности распределения производятся:

- расчет конструктивной высоты сортировочной горки;
- технологические расчеты по проверке мощности тормозных позиций.

Соотношение существующих (приведенных в правилах и нормах [1]) и полученных по результатам выполненных исследований плотностей распределения случайной величины w_0 для легкой и тяжелой весовых категорий вагонов приведено соответственно на рисунках 1 и 2 (функции распределения представлены для одиночных вагонов).

Плотности распределения для легко-средней, средней и средне-тяжелой весовых категорий имеют промежуточные значения между графиками функций, приведенными на рисунках 1 и 2, и также могут быть использованы при выполнении горочных расчетов или моделировании скатывания с сортировочной горки перерабатываемого вагонопотока.

Сравнительные результаты выполненных исследований с существующими значениями числовых характеристик плотностей распределения основного удельного сопротивления движению вагонов при скатывании с горки приведены в таблице.

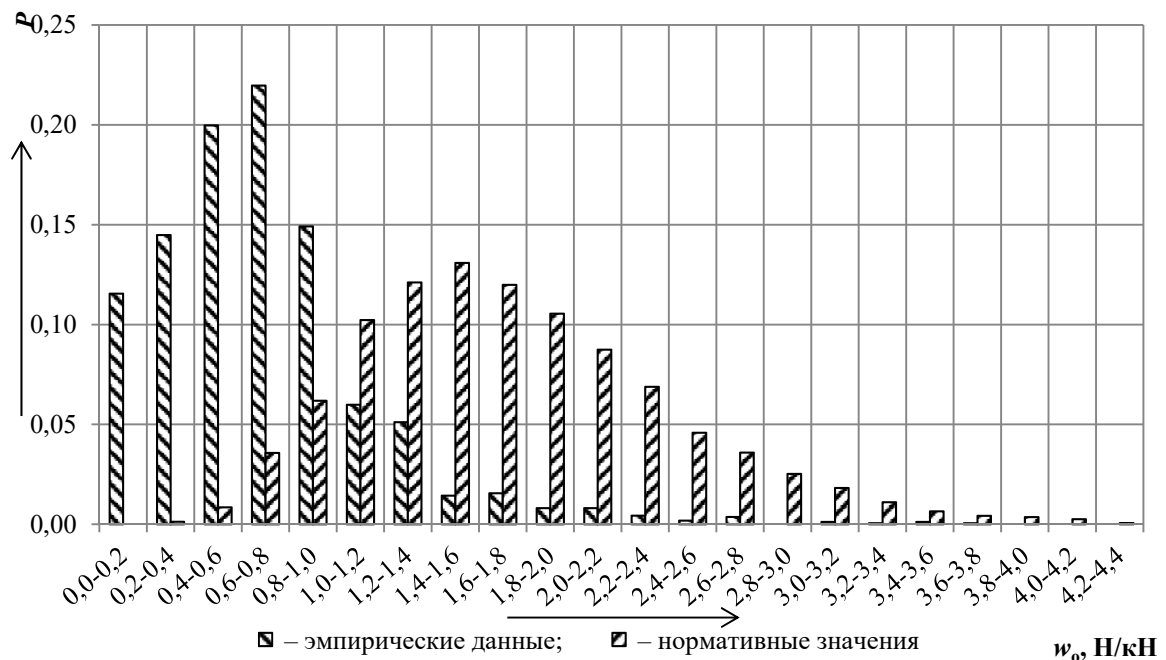


Рисунок 1 – Соотношение существующих и полученных по результатам выполненных исследований плотностей распределения случайной величины w_0 для легкой весовой категории вагонов

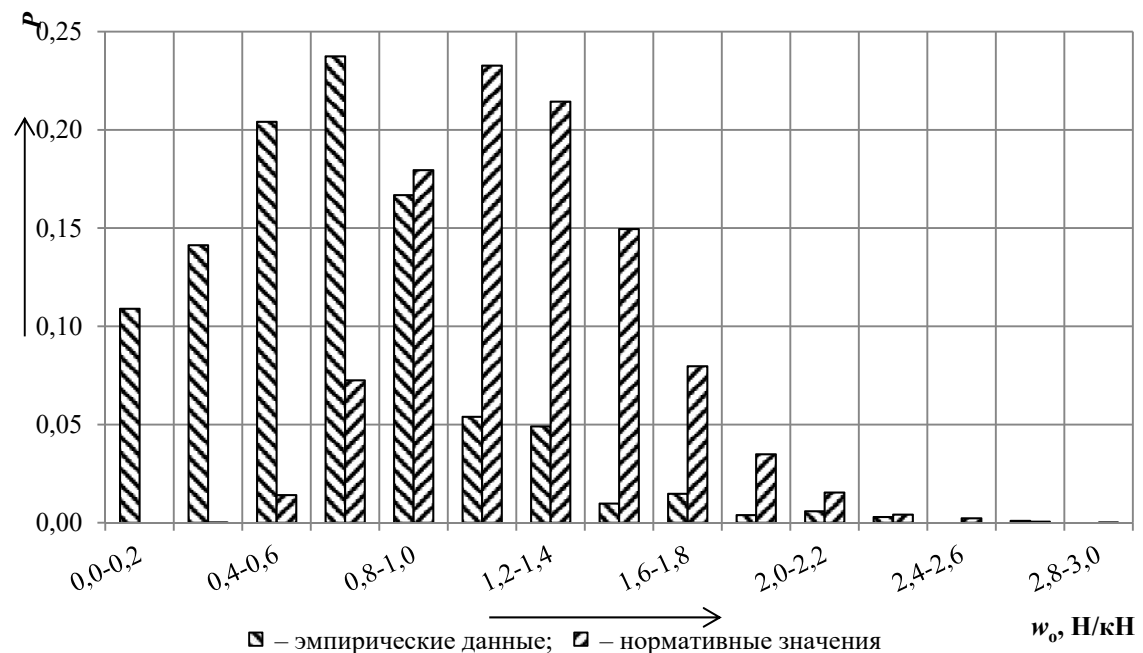


Рисунок 2 – Соотношение существующих и полученных по результатам выполненных исследований плотностей распределения случайной величины w_0 для тяжелой весовой категории вагонов

Результаты выполненных исследований позволяют сделать следующие выводы.

1. Согласно графикам функций, приведенным на рисунках 1 и 2, установлено:

значительное смещение области допустимых значений основного удельного сопротивления в левую сторону по оси абсцисс;

сокращение диапазона допустимых значений случайной величины w_0 для всех весовых категорий вагонов.

В частности, следует отметить изменение расчетных диапазонов следующих числовых характеристик плотности распределения (существующие значения/результаты исследований), Н/кН: среднее значение – $(1,23 - 1,75) / (0,63 - 0,83)$; среднее квадратическое отклонение – $(0,35 - 0,67) / (0,39 - 0,56)$.

Параметры плотности распределения случайной величины основного удельного сопротивления движению вагонов при скатывании с сортировочной горки, существующие данные/результаты выполненных исследований, Н/кН

Весовая категория вагонов		Диапазон массы вагона, т	Среднее значение w_0 , Н/кН	Среднее квадратическое отклонение, Н/кН
наименование	обозначение			
Легкая	Л	До 28	1,75 / 0,83	0,67 / 0,56
Легко-средняя	ЛС	28 – 44	1,54 / 0,71	0,59 / 0,52
Средняя	С	44 – 60	1,39 / 0,71	0,50 / 0,45
Средне-тяжелая	СТ	60 – 72	1,25 / 0,66	0,38 / 0,44
Тяжелая	Т	Свыше 72	1,23 / 0,63	0,35 / 0,39

2. Установлено, что в современных условиях существенно увеличилась доля вагонов, имеющих значение величины w_0 менее 0,5 Н/кН (минимальное установленное в существующей методике значение). Следовательно, при определении динамики скатывания таких вагонов с горок по существующей методике скорость их движения будет превышать расчетные значения. Необходимо отметить, что в реальных условиях эксплуатации увеличение скоростного режима полностью или частично может компенсироваться корректировкой режимов торможения вагонов:

- на автоматизированных сортировочных горках: за счет использования систем автоматического регулирования скорости скатывания отцепов;
- на механизированных горках: операторами тормозных позиций;
- на немеханизированных горках: регулировщиками скорости движения.

В двух последних случаях результаты скатывания отцепов фактически будут зависеть от уровня квалификации персонала (человеческий фактор). При этом во всех случаях будут возникать дополнительные эксплуатационные расходы на торможение.

3. Согласно рисунку 1 доля вагонов легкой весовой категории, которые имеют значение величины w_0 более 3,0 Н/кН, незначительная. Следовательно, использование при выполнении технологических расчетов максимального значения основного сопротивления на уровне 4,5 Н/кН в настоящее время является избыточным как при выполнении проверки высоты сортировочной горки, так и при проверке соблюдения пространственно-временных интервалов на разделительных элементах.

В заключение необходимо отметить, что полученные результаты исследований требуют более детальной проработки, в том числе с проведением подобных исследований на большем числе сортировочных горок разной мощности, расположенных в различных регионах. Приведенные в данной статье результаты доказывают существенное изменение числовых характеристик основного удельного сопротивления движению вагонов при скатывании с горки на современном этапе и необходимость корректировки правил и норм проектирования сортировочных устройств.

Список литературы

1. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах колеи 1520 мм : утв. МПС РФ 10.10.03. – Москва : Техинформ, 2003. – 168 с. – Текст : непосредственный.
2. Сопротивление движению грузовых вагонов при скатывании с горок : тр. ЦНИИ МПС / ред. Е. А. Сотников. – Москва : Транспорт, 1975. – Вып. 545. – 102 с. – Текст : непосредственный.

3. Фролов, А. Н. Сопротивление вагонов при скатывании с горки / А. Н. Фролов, Б. В. Ботсманов // Труды ВНИИЖТа. – 1939. – № 63. – 133 с. – Текст : непосредственный.
4. Пособие по применению правил и норм проектирования сортировочных устройств / Л. Б. Тишков, В. П. Шейкин [и др.]. – Москва : Транспорт, 1994. – 220 с. – Текст : непосредственный.
5. Климов, А. А. Метод определения сопротивлений движению отцепов при скатывании с сортировочной горки на основе натурных наблюдений и цифровых баз данных / А. А. Климов. – Текст : непосредственный // Цифровые технологии транспорта: проблемы и перспективы : материалы междунар. науч.-практ. конф. «Цифровые технологии транспорта и логистики». – Москва : Российский университет транспорта, 2022. – С. 300–305.
6. Бессоненко, С. А. Исследование основного удельного сопротивления движению отцепов при скатывании с сортировочной горки на основе натурных наблюдений / С. А. Бессоненко, А. А. Гунбин, А. А. Климов. – Текст : непосредственный // Вестник СГУПС. – 2022. – № 4 (63) – С. 62–68.
7. Компьютерное зрение для контроля занятости сортировочных путей / А. Е. Хатламаджиян, В. В. Борисов, И. А. Ольгейзер, А. В. Суханов. – Текст : непосредственный // Автоматика, связь, информатика. – 2021. – № 3. – С. 8–11.
8. Компьютерное зрение как способ интеллектуализации систем горочной автоматизации / Д. В. Глазунов, А. М. Лященко, И. А. Ольгейзер, А. В. Суханов. – Текст : непосредственный // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2022. – № 1. – С. 46–53.
9. Сортировочная станция – из прошлого в будущее / А. Н. Шабельников, В. А. Кобзев, И. А. Ольгейзер, С. А. Рогов. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2020. – № 9. – С. 18–21.
10. Распределение вероятностей удельного сопротивления движению разных типов вагонов в сортировочном парке / С. А. Бессоненко, А. А. Гунбин [и др.]. – Текст : непосредственный // Проблемы перспективного развития железнодорожных станций и узлов. – 2022. – Вып. 4. – С. 12–16.

References

1. Rules and norms for the design of marshalling devices on 1520 mm gauge railways: approved. Ministry of Railways of the Russian Federation 10.10.03. Moscow, Tekhinform, 2003. 168 p. (In Russian).
2. Sotnikov E.A. Resistance to the movement of freight cars when rolling down hills: tr. Central Research Institute of MPS. Moscow, Transport Publ., 1975, issue. 545, 102 p. (In Russian).
3. Frolov A.N., Botsmanov B.V. Resistance of cars when rolling down a hill. *Trydi VNIIZhTa – Proceedings of VNIIZhT*, 1939, no. 63, 133 p. (In Russian).
4. Tishkov L.B. *Posobie po primeneniu pravil i norm proektirovaniya sortirovochnix ystroistv* [A manual on the application of rules and norms for the design of sorting devices]. Moscow, Transport Publ., 1994, 220 p. (In Russian).
5. Klimov A.A. Method for determining the resistance to the movement of cuts when rolling down a sorting hill based on field observations and digital databases. *Cifrovie texnologii transporta: problemi i perspektivy. Materiali mezhdynarodnoi naychno-prakticheskoi konferentsii «Cifrovie texnologii transporta i logistiki»* [Digital transport technologies: problems and prospects. Materials International scientific-practical. conf. «Digital technologies of transport and logistics»]. Moscow, 2022, pp. 300-305 (In Russian).
6. Bessonenko S.A., Gunbin A.A., Klimov A.A. Study of the main specific resistance to the movement of cuts when rolling down a sorting hill based on field observations. *Vestnik Sibirskogo gosydarstvennogo yniversiteta pytei soobschenia – The Siberian Transport University Bulletin*, 2022, no. 4 (63), pp. 62-68 (In Russian).
7. Khatlamadzhian A.E., Borisov V.V., Olgezyer I.A., Sukhanov A.V. Computer vision for monitoring the occupancy of marshalling lanes. *Avtomatika, sviaz', informatika – Automation, communication, informatics*, 2021, no. 3, pp. 8-11 (In Russian).

8. Glazunov D.V., Lyashchenko A.M., Olgeyzer I.A., Sukhanov A.V. Computer vision as a way to intellectualize hump automation systems. *Problemi mashinostroenia i avtomatizacii – Problems of mechanical engineering and automation*, 2022, no. 1, pp. 46-53 (In Russian).

9. Shabelnikov A.N., Kobzev V.A., Olgeyzer I.A., Rogov S.A. Marshalling yard – from the past to the future. *Zheleznodorozhny Transport – Railway Transport*, 2020, no. 9, pp. 18-21 (In Russian).

10. Bessonenko S.A., Gunbin A.A., Klimov A.A., Kornienko K.I., Olgeyzer I.A. Probability distribution of specific resistance to the movement of different types of cars in the marshalling yard. *Problemy perspektivnogo razvitiia zheleznodorozhnykh stancii i yzlov – Problems of railway stations and junctions perspective development*, 2022, issue 4, pp. 12-16 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бессоненко Сергей Анатольевич

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).

Дуси Ковальчук ул., д. 191, г. Новосибирск, 630049, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой», СГУПС.

Тел.: +7 (383) 328-04-33.

E-mail: bessonenko@stu.ru

Гунбин Антон Андреевич

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).

Дуси Ковальчук ул., д. 191, г. Новосибирск, 630049, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Железнодорожные станции и узлы», СГУПС.

Тел.: +7 (383) 328-04-46.

E-mail: gunbin_gdsu@mail.ru

Климов Александр Александрович

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).

Дуси Ковальчук ул., д. 191, г. Новосибирск, 630049, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Железнодорожные станции и узлы», СГУПС.

Тел.: +7 (383) 328-05-46.

E-mail: aklimov@ngs.ru

Корниенко Константин Ильич

Ростовский филиал АО «НИИАС».

Ленина ул., д. 44/13, г. Ростов-на-Дону, 344038, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник отделения инновационных и интеллектуальных технологий цифровой станции.

E-mail: k.kornienlo@vniias.ru

Ольгейзер Иван Александрович

Ростовский филиал АО «НИИАС».

Ленина ул., д. 44/13, г. Ростов-на-Дону, 344038, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, начальник Отделения инновационных и интеллектуальных технологий цифровой станции.

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Bessonenko Sergey Anatolievich

Siberian Transport University (STU).

191, Dusi Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor of the department «Track Maintenance Management», STU.

Phone: +7 (383) 328-04-33.

E-mail: bessonenko@stu.ru

Gunbin Anton Andreevich

Siberian Transport University (STU).

191, Dusi Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Railway Stations and Junctions», STU.

Phone: +7 (383) 328-04-46.

E-mail: gunbin_gdsu@mail.ru

Klimov Alexander Alexandrovich

Siberian Transport University (STU).

191, Dusi Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Railway Stations and Junctions», STU.

Phone: +7 (383) 328-05-46.

E-mail: aklimov@ngs.ru

Kornienko Konstantin Ilyich

JSC NIIAS Rostov branch.

44/13, Lenina st., Rostov-on-Don, 344038, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, senior research fellow, department of Innovative and Intelligent Technologies, Digital Station.

E-mail: k.kornienlo@vniias.ru

Olgeyzer Ivan Alexandrovich

JSC NIIAS Rostov branch.

44/13, Lenina st., Rostov-on-Don, 344038, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor, head of the department of Innovative and Intelligent Technologies of the Digital Station.

Rostov State University of Communications (RSTU).

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

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

Доцент кафедры «Вычислительные машины,
комплексы, системы и сети», РГУПС.

E-mail: i.olgezer@vniias.ru

Шабельников Александр Николаевич

Ростовский государственный университет путей
сообщения (РГУПС).

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

Доктор технических наук, профессор кафедры
«Информатика», РГУПС.

Тел. +7 (863) 255-32-83.

2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo
Opolcheniya Sq., Rostov-on-Don, 344038, the Russian
Federation.

Associate professor of the department of Computers,
Complexes, Systems and Networks, RSTU.

E-mail: i.olgezer@vniias.ru

Shabelnikov Alexander Nikolaevich

Rostov State University of Communications
(RSTU).

2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo
Opolcheniya Sq., Rostov-on-Don, 344038, the Russian
Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor of the
Department of Informatics, RSTU.

Phone: +7 (863) 255-32-83.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Исследование параметров основного удельного
сопротивления движению вагонов при скатывании с
сортировочной горки / С. А. Бессоненко, А. А. Гунбин
[и др.]. – Текст : непосредственный // Известия
Транссиба. – 2023. – № 1 (53). – С. 53 – 62.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Bessonenko S.A., Gunbin A.A., Klimov A.A.,
Kornienko K.I., Olgezyer I.A., Shabelnikov A.N.
Investigation of the parameters of the main specific
resistance to the movement of cars when rolling down a
marshalling yard. *Journal of Transsib Railway Studies*,
2023, no. 1 (53), pp. 53-62 (In Russian).

УДК 539.3, 625.03

А. Ю. Абдурашитов¹, Д. В. Овчинников², В. П. Сычев³, А. В. Сычева³

¹Проектно-конструкторское бюро по инфраструктуре – филиал ОАО «РЖД», г. Москва, Российская Федерация;

²Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС), г. Самара, Российская Федерация;

³Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), г. Москва, Российская Федерация

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РЕЛЬСОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Аннотация. Приведены результаты моделирования оценки напряженно-деформированного состояния наиболее дорогостоящего элемента верхнего строения пути – рельса – при различных условиях эксплуатации на основе моделирования методом конечных элементов для разных эксплуатационных и технических характеристик железнодорожного пути. В отличие от существующих методик прогнозирования срока службы рельсов, базирующихся на величинах вертикальных осевых и боковых динамических сил, учтено влияние напряженно-деформированного состояния системы «рельс – колесо» при идентичном нагружении. Переход от усилий, передаваемых от подвижного состава непосредственно на путь, к напряжениям, возникающим в процессе воздействия подвижного состава, является уточняющим фактором, дополняющим известные методики прогнозирования отказа рельсов, в то время как механические напряжения являются количественным показателем долговечности материала. Разработаны трехмерные модели системы «колесо – рельс» и участка пути на балласте с толщиной под шпалой 45 см, промежуточными рельсовыми скреплениями ЖБР-65ППР, шпалами Ш-3Д с прутковым армированием, рельсами типа Р65 с целью получения исходных данных для методики расчета жизненного цикла рельсов. Намечены пути расширения применения моделирования для оценки напряжений в рельсах при наличии отступлений от норм содержания в плане, профиле и износе. Необходимость оценки напряжений в зоне контакта колеса и рельса вызвана переходом на тяжеловесное движение с повышенными осевыми нагрузками. Предложенная модель напряженно-деформированного состояния элементов верхнего строения пути в зависимости от осевой нагрузки, плана линии, скорости движения, наличия отступлений от норм содержания пути в плане и профиле может быть использована для выбора участков, подлежащих реконструкции, капитальному ремонту пути.

Ключевые слова: железнодорожный путь, рельс, моделирование, метод конечных элементов, долговечность рельса, пропущенный тоннаж, напряженно-деформированное состояние.

Anatoliy Yu. Abdurashitov¹, Dmitriy V. Ovchinnikov², Vyacheslav P. Sychev³,
Anna V. Sycheva³

¹Design Bureau for Infrastructure – branch of JSC «Russian Railways», Moscow, the Russian Federation;

²Samara State Transport University (SSTU), Samara, the Russian Federation;

³Russian University of Transport (RUT (MIIT)), Moscow, the Russian Federation

ESTIMATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF RAILS UNDER VARIOUS OPERATING CONDITIONS BASED ON FINITE ELEMENT MODELING

Abstract. The results of modeling the assessment of the stress-strain state of the most expensive element of the superstructure of the track – the rail – under various operating conditions based on finite element modeling for various operational and technical characteristics of the railway track are presented. In contrast to the existing methods for predicting the service life of rails, based on the values of vertical axial and lateral dynamic forces, the influence of the stress-strain state of the «rail – wheel» system under identical loading is taken into account. The transition from the forces transmitted from the rolling stock directly to the track, to the stresses that arise during the impact of the rolling stock, is a clarifying factor that complements the known methods for predicting rail failure, while mechanical stresses are a quantitative indicator of material durability. Three-dimensional models of the «wheel – rail» system and the track section on the ballast with a thickness under the sleeper of 45 cm, intermediate rail fastenings ZhBR-65PShR, sleepers Sh-3D with bar reinforcement, rails of the R65 type were developed in order to obtain initial data for the method of calculating the life cycle of rails. Ways are outlined to expand the use of modeling to assess stresses in rails in the presence of deviations from the norms of content in plan, profile, and wear. The need to assess the stresses in the contact zone of the wheel and the rail is caused by the transition to heavy traffic with increased axial loads. The proposed model of the stress-strain state of the elements of the superstructure of the track, depending on the axial load, the line plan, the speed of movement, the presence of deviations from the norms of track maintenance in the plan and profile, can be used to select sections to be reconstructed, overhauled the track.

Keywords: railway track, rail, modeling, finite element method, rail durability, throughput tonnage, stress-strain state.

Переход на тяжеловесное движение направлен на увеличение длины поезда и нагрузки на ось подвижного состава, что требует оценки напряжений в зоне контакта колеса и рельса, а также анализа долговечности рельса [1, 2]. Большинство разрабатываемых моделей по оценке срока службы элементов верхнего строения пути в настоящее время опираются на статистические данные [3, 4]. Причем существующие методики прогнозирования срока службы рельсов, базирующиеся на величинах вертикальных осевых и боковых динамических сил [5, 6], не учитывают напряженно-деформированное состояние системы «рельс – колесо» при идентичном нагружении. То есть переход от усилий, передаваемых от подвижного состава непосредственно на путь, к напряжениям, возникающим в процессе воздействия подвижного состава, выглядит вполне оправданным как фактор, уточняющий и дополняющий существующие методики прогнозирования отказа рельсов, в то время как механические напряжения являются количественным показателем долговечности материала.

Разрабатываемая модель напряженно-деформированного состояния элементов верхнего строения пути в зависимости от осевой нагрузки, плана линии, скорости движения, наличия отступлений от норм содержания пути в плане и профиле может быть использована для выбора участков, подлежащих реконструкции, капитальному ремонту пути.

Известно [7, 8], что основные причины появления дефектных рельсов (ДР), это дефекты первой (10, 11, 14, 19) и четвертой (44) групп.

Ресурс рельсов определяется как объем тоннажа T в млн т брутто, который может быть пропущен по рельсу до появления критического значения его контактно-усталостной прочности.

Усталостная кривая металлов определяется так [9]:

$$\sigma_0^m \cdot n_0 = G = \text{const}, \quad (1)$$

где σ_0 – напряжения в материале, возникающие при нагружении;

m – показатель, зависящий от материала. Для сталей колеблется в пределах 3 – 5;

n_0 – число циклов нагрузки для достижения усталостного ресурса материала;

G – ресурс усталостной прочности металла.

Зная, что $n_i = T_i / \langle P_i \rangle$; $n_0 = T_0$, получим:

$$\overline{\sigma}_0 \cdot n_0 = \overline{\sigma}_0 \cdot \frac{T_0}{\langle P_0 \rangle} = \overline{\sigma}_i \cdot n_i = \overline{\sigma}_i \cdot \frac{T_i}{\langle P_i \rangle}, \quad (2)$$

где $\overline{\sigma}_i$ – средневзвешенные механические напряжения (эквивалентные – контактная задача, нормальные – изгиб рельса) в рельсах, возникающие на участке i ;

$\overline{\sigma}_0$ – средневзвешенные механические напряжения (эквивалентные – контактная задача, нормальные – изгиб рельса) в рельсах, возникающие на опытном участке;

T_i – тоннаж брутто, пропущенный по участку i до исчерпания ресурса контактно-усталостной прочности рельсов;

T_0 – тоннаж брутто, пропущенный по опытному участку до исчерпания ресурса контактно-усталостной прочности рельсов;

$\langle P_i \rangle$ – средняя нагрузка от колес подвижного состава на участке i ;

$\langle P_0 \rangle$ – средняя нагрузка от колес подвижного состава на опытном участке.

Примем в первом приближении весовые коэффициенты равными соотношению выявленного количества дефектов в головке и подошве к общему числу дефектов. Тогда

$$\overline{\sigma} = \sum \sigma_j \cdot \sum k_j, \quad (3)$$

где σ_j – напряжения в материале, образующиеся в головке и подошве рельса при воздействии подвижного состава;

k_j – весовой коэффициент, зависящий от количества выявленных дефектов в головке и подошве рельса.

Таким образом, тоннаж брутто, который можно пропустить по участку i с заданными эксплуатационными характеристиками, при известном тоннаже брутто, пропущенном на опытном участке,

$$T_i = T_0 \cdot \frac{\overline{\sigma}_0}{\overline{\sigma}_i} \cdot \frac{\langle P_i \rangle}{\langle P_0 \rangle} \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3, \quad (4)$$

где α_1 – коэффициент, учитывающий влияние шлифовки рельсов;

α_2 – коэффициент, учитывающий кратность тяги, рекуперативное торможение и горно-перевальные условия;

α_3 – коэффициент, учитывающий влияние климатических условий.

Коэффициенты α_1 , α_2 и α_3 известны и получены эмпирическим путем [8, 10, 11]. Протяженность участка пути 1 км принята аналогично оценке содержания пути.

Таким образом, алгоритм вычисления ресурса прочности рельсов (тоннаж брутто) по заданному участку пути, следующий:

определение напряженно-деформированного состояния рельсов на заданном участке σ_0 и значения $\langle P_0 \rangle$;

определение множества значений n_0 при различной интенсивности выхода 1, 2, 3, 4 и т. д., шт./км;

вычисление $T_0 = n_0 \cdot \langle P_0 \rangle$;

определение напряженно-деформированного состояния рельсов на расчетном участке σ_i и значения $\langle P_i \rangle$.

вычисление по формуле (4) прогнозного значения T_i , объема тоннажа.

При расчетах учитываются следующие параметры: тип подвижного состава (нагрузка на ось); план линии; скорость движения подвижного состава; наличие отступлений в профиле; поправочные коэффициенты по влиянию шлифовки рельсов и климатических условий; кратность тяги, рекуперативное торможение и горно-перевальные условия; введение весовых коэффициентов дефектов головки и подошвы.

В первую очередь определяются зависимости контактных напряжений в системе «колесо – рельс» при различных осевых и боковых силах, величины изгибных напряжений, возникающих в рельсах при прохождении подвижного состава с учетом плана линии и осевых нагрузок. Применение контактной теории Герца для оценки напряженно-деформированного состояния «колесо – рельс» возможно со следующими допущениями: колесо и рельс имеют неизношенное поперечное сечение и контактируют по осевым выкружкам, как два скрещающихся цилиндра (рисунок 1).

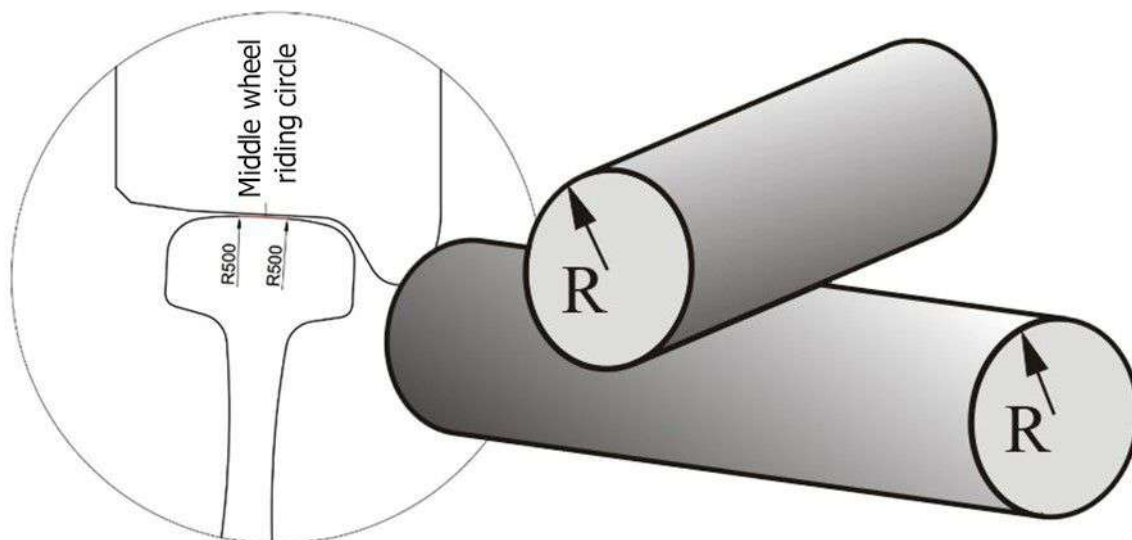


Рисунок 1 – Расчетное положение «колесо – рельс» для определения контактных напряжений по теории Герца

В реальных условиях количественная оценка параметров взаимодействия основана на применении численных методов моделирования, в частности, метода конечных элементов [12]. Суть метода заключается в том, что область поиска дифференциальных уравнений разбивается на конечное количество элементов и в каждом из элементов произвольно выбирается вид аппроксимирующей функции, в простейшем случае – полином первой степени. Вне своего элемента аппроксимирующая функция равна нулю. Значения функций на границах элементов, так называемых узлах, неизвестны. Количество уравнений равно количеству неизвестных значений в узлах и их объем ограничен лишь возможностями используемой ЭВМ.

Исходные данные для расчета конечно-элементной модели «колесо – рельс»:

- колесо вагонное новое диаметром 950 мм;
- нагрузка на колесо – 3, 6, 9, 12 и 15 т;
- боковая сила – 4, 8 и 12 т;
- ось колеса находится в вертикальном положении;
- рельс Р65 новый;
- ось рельса нового с наклоном 1/20, 1/12 и 1/60;
- контактирующие поверхности заданы в соответствии с профилями.

Разработаны трехмерные модели с полным геометрическим подобием (рисунок 2) и объемные конечно-элементные модели (рисунок 3).

Мощность расчетных моделей – 500 тыс. – 2 млн узлов. Для уменьшения узлов использованы свойства симметрии модели. В зоне контакта сетка элементов сгущается до 0,2 мм при гребневом контакте. Установлено, что дальнейшее уменьшение размера элемента не приводит к увеличению точности расчета, увеличивая продолжительность вычислений.

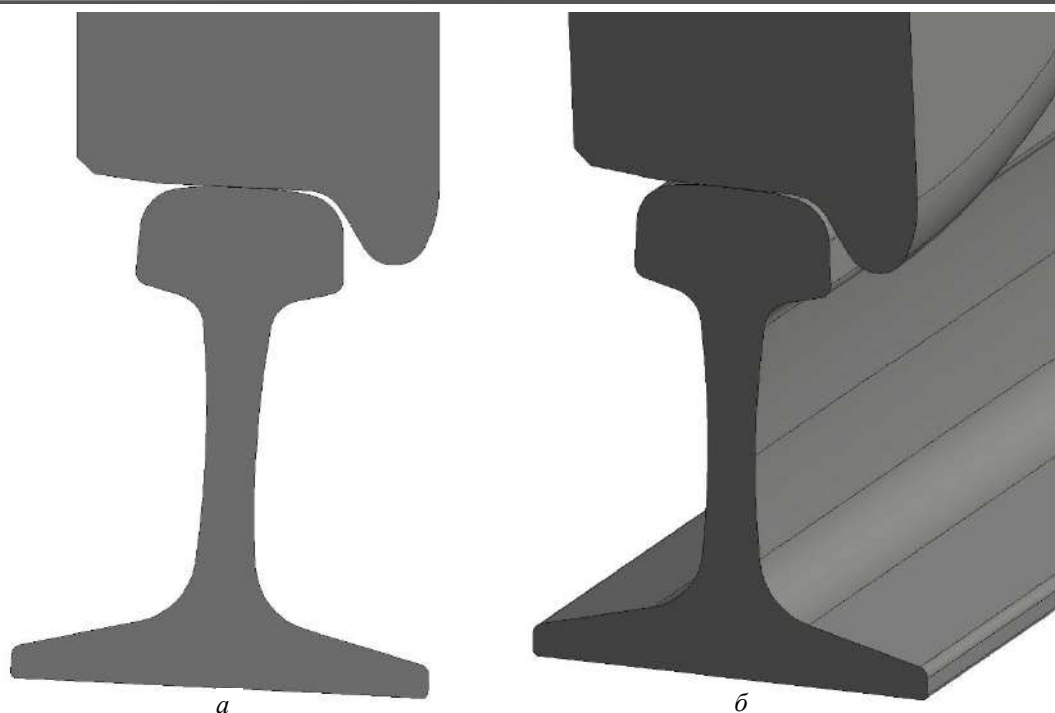


Рисунок 2 – Трехмерная модель системы «колесо – рельс» при вертикальном контактировании

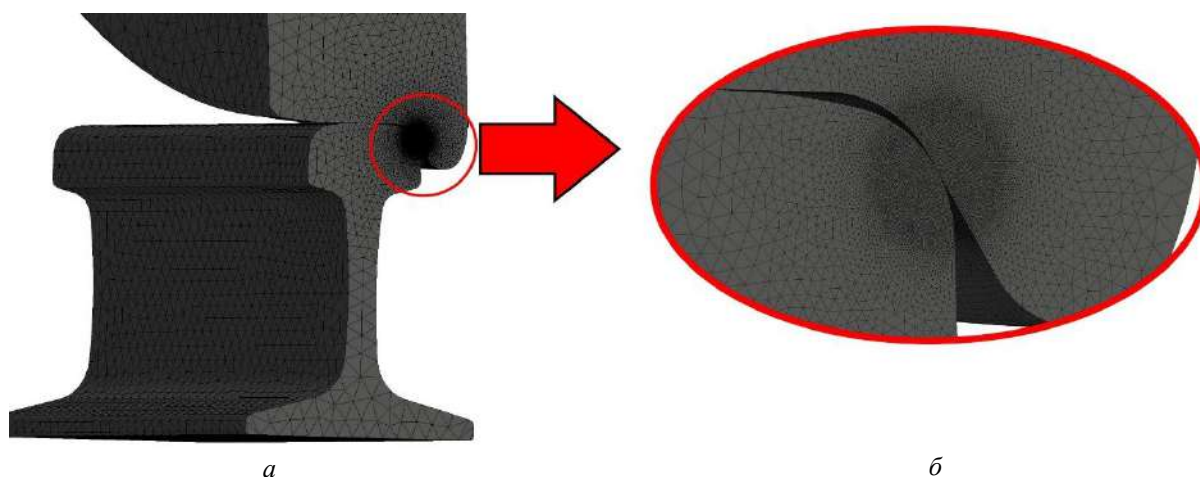


Рисунок 3 – Конечно-элементная модель системы «колесо – рельс» при боковом контактировании

Исходные данные для трехмерной геометрической модели с полным подобием реальным элементам типовой конструкции железнодорожного пути (рисунок 4):

- толщина балласта под шпалой 45 см;
- промежуточные рельсовые скрепления ЖБР-65ПШР;
- шпалы Ш-3Д с прутковым армированием;
- рельсы типа Р65.

На базе модели (см. рисунок 4) разработана конечно-элементная модель данного участка пути (рисунок 5).

Мощность модели составляет порядка 3 млн узлов, применяются элементы в виде тетраэдров. В местах концентрации напряжений сетка элементов сгущается от 0,5 до 1 мм. Для описания нелинейных свойств слоистой структуры балластной призмы применялась модель пластичности Мора – Кулона; между деталями элементов железнодорожного пути заданы контактные взаимодействия; для удержания рельса в скреплениях задана затяжка шурупов крутящим моментом 250 Н·м согласно требованиям Инструкции [13]. Расчетные значения нагрузок на рельсы от подвижного состава заданы в виде усилий, передаваемых непосредственно от колес через точки контактирования на основе исследований [6, 8, 14]

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

напряженного состояния элементов верхнего строения пути при прохождении подвижного состава с различными осевыми нагрузками (таблица 1).

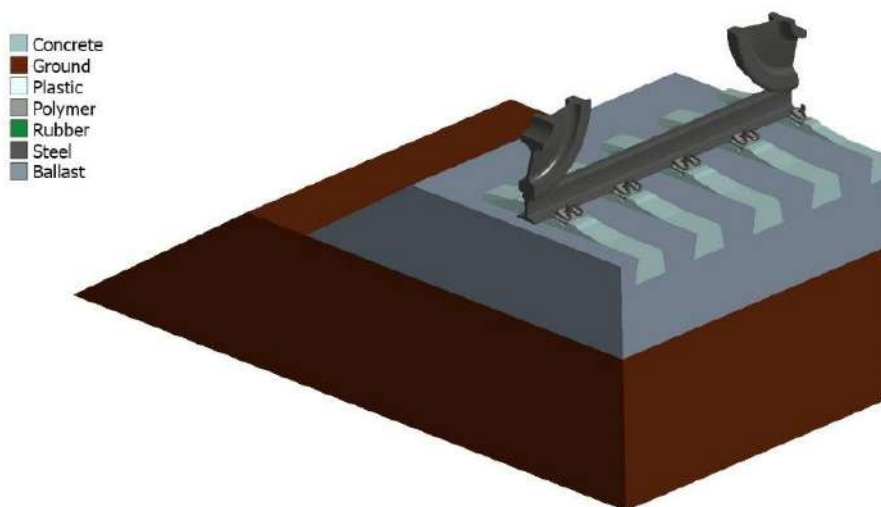


Рисунок 4 – Трехмерная модель участка пути на балласте с толщиной под шпалой 45 см, промежуточные рельсовые крепления ЖБР-65ППШР, шпалы III-3Д с прутковым армированием, рельсы типа Р65

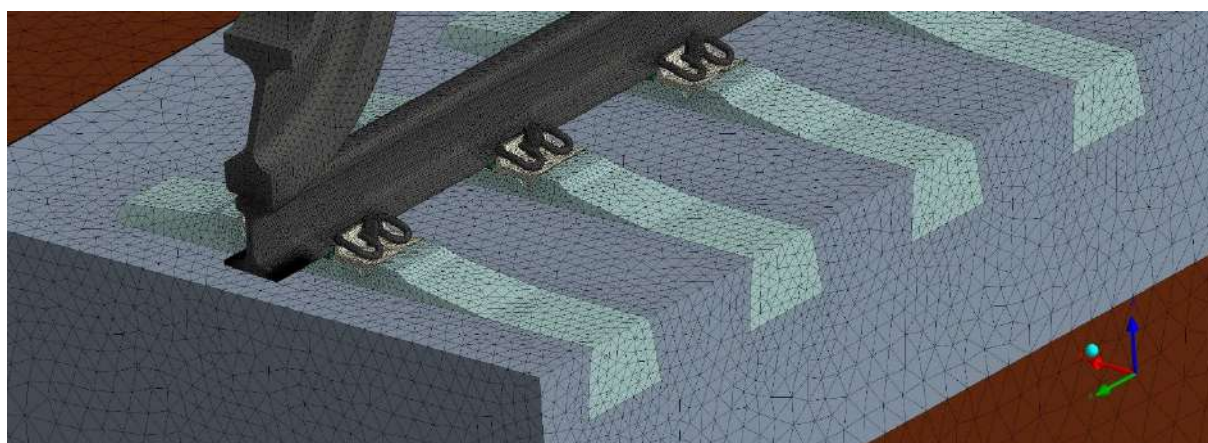


Рисунок 5 – Элементы модели

Таблица 1 – Нагрузки от подвижного состава, используемые при моделировании

Тип подвижного состава, план линии	Вертикальная нагрузка от колеса, Н	Боковая нагрузка от колеса, Н
Вагон с осевой нагрузкой 23,5 тс, прямой участок пути	116950	3067
Вагон с осевой нагрузкой 23,5 тс, кривая 650 м	115750	22750
Вагон с осевой нагрузкой 23,5 тс, кривая 350 м	115326	34250
Вагон с осевой нагрузкой 25 тс, прямой участок пути	121876	6125
Вагон с осевой нагрузкой 25 тс, кривая 650 м	123376	10925
Вагон с осевой нагрузкой 25 тс, кривая 350 м	123400	39100
Вагон с осевой нагрузкой 27 тс, прямой участок пути	151000	37700
Вагон с осевой нагрузкой 27 тс, кривая 650 м	156500	47700
Вагон с осевой нагрузкой 27 тс, кривая 350 м	160600	70300

Физико-механические свойства изотропных однородных материалов верхнего строения пути заданы в соответствии с их реальными прочностными характеристиками [15]. Моделирование осуществляется поэтапно: затяжка рельсовых прикрепителей, приложение сил тяжести, воздействие подвижного состава.

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Результаты исследования приведены на рисунках 6 и 7 в виде контуров напряжений в рельсе и колесе при нагрузке на колесо 15 т без боковых сил и при нагрузке на колесо 15 т с боковой силой 8 т.

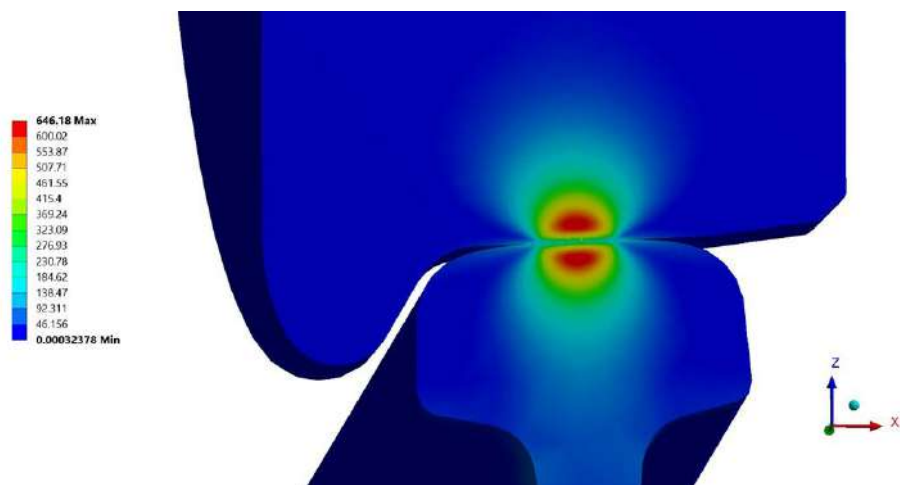


Рисунок 6 – Напряженно-деформированное состояние системы «колесо – рельс» при нагрузке на колесо 15 т и положении колеса по оси катания, МПа

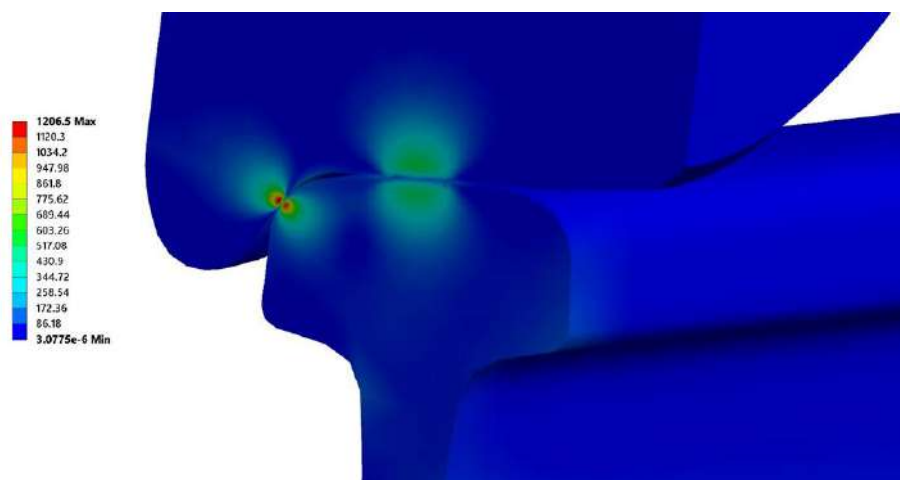


Рисунок 7 – Напряженно-деформированное состояние системы «колесо – рельс» при нагрузке на колесо 15 т и боковой силе 8 т, МПа

В таблице 2 приведены результаты расчетов величины контактных напряжений для различных условий взаимодействия и количественная оценка изменения интенсивности контактных напряжений от осевой нагрузки и изменения условий контактирования.

Таблица 2 – Контактные напряжения в рельсе, МПа (кгс/см²)

Нагрузка на колесо, т	Подуклонка рельса			Боковые силы, т		
	1/20	1/60	1/12	4	8	12
3	354,31	652,97	710,7	846	1206,5	1447,3
6	462,27	825,98	887,54			
9	535,19	944,62	1005,2			
12	594,26	1033,9	1094,1			
15	646,18	1108,7	1170,5			

На рисунке 8 показаны результаты моделирования в виде уравнений аппроксимации напряженного состояния рельсов в мегапаскалях (МПа) при воздействии колес подвижного

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

состава, уложенных с различным уклоном (подуклонка) от осевых нагрузок в тоннах по оси абсцисс.

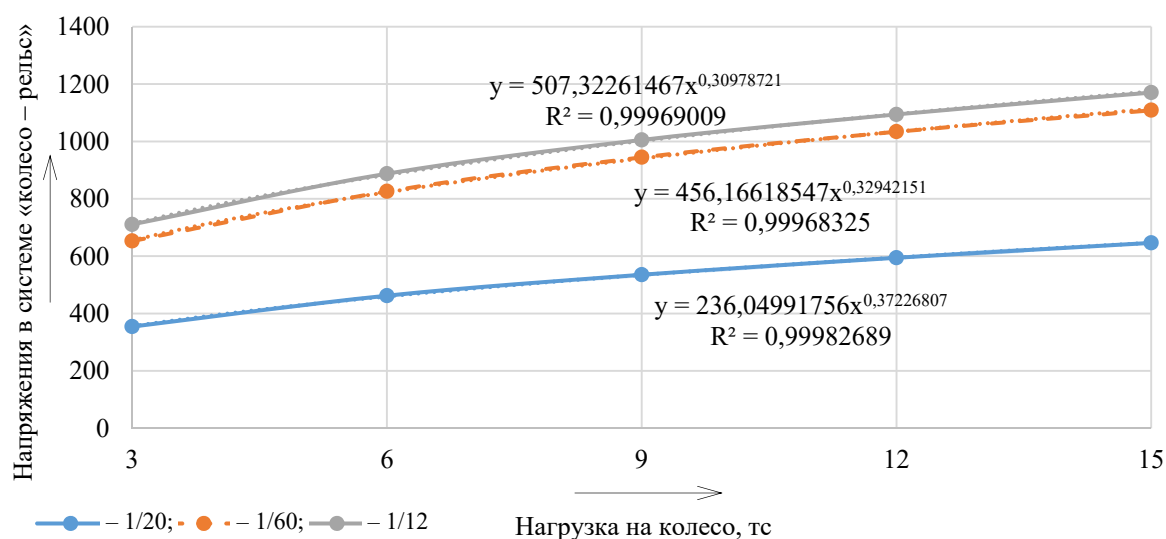


Рисунок 8 – Зависимость напряжений в рельсах от вертикальной нагрузки, передаваемой от колеса при различной подуклонке рельсов (1/20; 1/60; 1/12)

На рисунке 9 приведена зависимость напряжений в рельсах от боковой силы (по оси абсцисс), передаваемой от колеса подвижного состава.

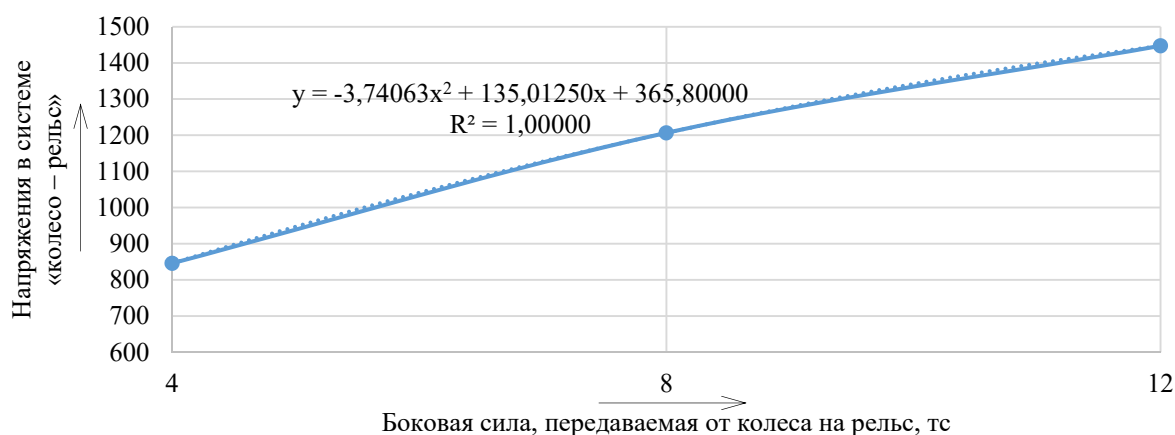


Рисунок 9 – Зависимость напряжений в рельсах от боковой силы, передаваемой от колеса

В результате моделирования получены нормальные растягивающие напряжения на внешней кромке подошвы рельса. Результаты моделирования представлены в табличной форме (таблица 3), а также в виде контуров напряжений (рисунок 10).

Таблица 3 – Результаты моделирования воздействия на путь подвижного состава

Тип подвижного состава, план линии	Нормальные напряжения в наружной кромке, МПа
Вагон с осевой нагрузкой 23,5 тс, прямой участок пути	31,53
Вагон с осевой нагрузкой 23,5 тс, кривая 650 м	50,96
Вагон с осевой нагрузкой 23,5 тс, кривая 350 м	62,41
Вагон с осевой нагрузкой 25 тс, прямой участок пути	35,88
Вагон с осевой нагрузкой 25 тс, кривая 650 м	41,06
Вагон с осевой нагрузкой 25 тс, кривая 350 м	69,29
Вагон с осевой нагрузкой 27 тс, прямой участок пути	74,62
Вагон с осевой нагрузкой 27 тс, кривая 650 м	86,02
Вагон с осевой нагрузкой 27 тс, кривая 350 м	109,73

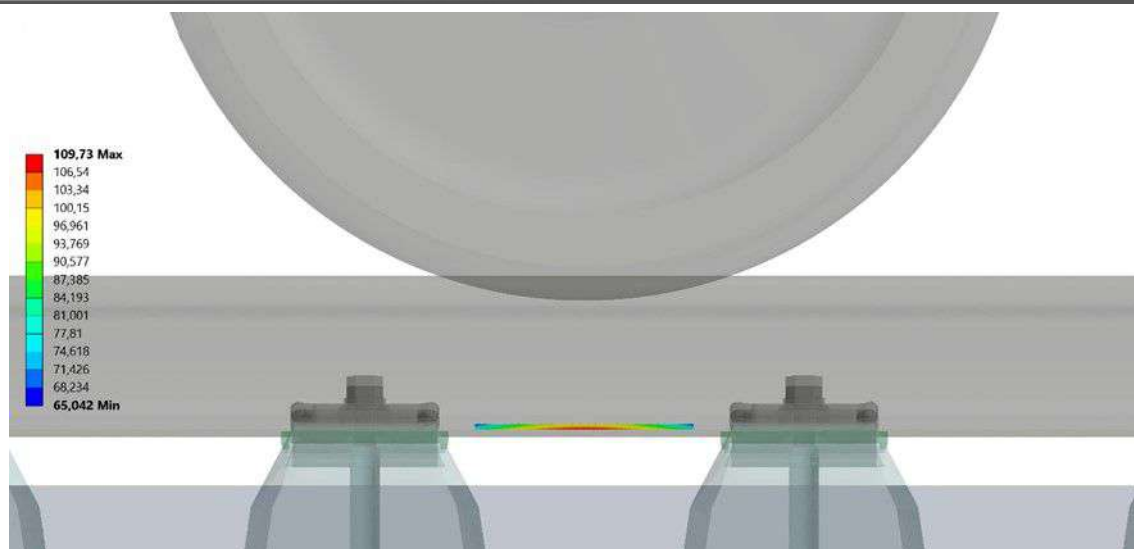


Рисунок 10 – Нормальные растягивающие напряжения на внешней кромке подошвы рельса при прохождении вагона с осевой нагрузкой 27 тс в кривой радиусом 350 м, МПа

Таким образом, можно сделать следующие выводы: проведено моделирование напряженно-деформированного состояния рельсов методом конечных элементов и получены данные для методики оценки напряженно-деформированного состояния рельсов при различных условиях эксплуатации и величины пропущенного тоннажа до критических величин развития дефектов, не допускающих дальнейшей эксплуатации рельсов.

Перспективой работы является оценка напряжений в рельсах в зависимости от наличия отступлений от норм содержания в плане, профиле и износе профилей.

Список литературы

1. Лисицын, А. И. Перспективы развития конструкции верхнего строения пути и его элементов / А. И. Лисицын. – Текст : непосредственный // Путь и путевое хозяйство. – 2019. – № 10. – С. 2–7.
2. Шур, Е. А. Дифференцированно-термоупрочненные рельсы : опыт применения и перспективы развития на российских железных дорогах / Е. А. Шур, А. И. Борц, К. Л. Заграничек. – Текст : непосредственный // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2017. – № 3. – С. 40.
3. Makhutov N.A., Kossov V.S., Oganyan E.S., Volokhov G.M., Ovechnikov M.N., Protopopov A.L. Prediction of contact-fatigue damage to rails using computational-experimental methods. Industrial laboratory. *Diagnostics of materials*, 2020, no. 86 (4), pp. 46-55 (In Russian), <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-4-46-55>.
4. Исследование математической модели прогнозирования технического состояния железнодорожного пути / О. В. Дружинина, А. А. Локтев, А. В. Дмитрашко, П. В. Сычев. – Текст : непосредственный // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2019. – № 4. – С. 3–11.
5. Абдурашитов, А. Ю. Прогнозирование ресурса верхнего строения пути в процессе эксплуатации / А. Ю. Абдурашитов, П. В. Сычев. – Текст : непосредственный // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2017. – Т. 11. – № 11 (11). – С. 62–67.
6. Исследование и моделирование возникновения поверхностных контактно-усталостных повреждений в рельсах / И. Г. Горячева, А. И. Борц [и др.]. – Текст : непосредственный // Трибология – машиностроению: труды XII Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию ИМАШ РАН. – 2018. – С. 146–149.

7. Кузнецова, Н. В. Статистический анализ изъятия рельсов с контактно-усталостными видами дефектов / Н. В. Кузнецова. – Текст: непосредственный // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2021. – Т. 17. – № 17 (17). – С. 41–47.

8. Исследование механизмов повреждаемости рельсов нового поколения и моделирование их возникновения / И. Г. Горячева, Е. А. Шур, А. И. Борц, С. М. Захаров. – Текст : непосредственный // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2017. – № 4. – С. 25–27.

9. Феодосьев, В. И. Сопротивление материалов / В. И. Феодосьев. – Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. – 592 с. – Текст : непосредственный.

10. Shur E.A., Borts A.I., Bazanova L.V. Fatigue life of damaged rails. *Journal of Physics: Conference Series. VIII International Conference «Deformation and Fracture of Materials and Nanomaterials»*, 2020, pp. 012071.

11. Ovchinnikov D.V., Pokatsky V.A., Gallyamov D.I. Factors Affecting the Dynamic Rail Canting of the Railway Track, *Transportation Research Procedia*, vol. 54, 2021, pp. 544-551, doi: 10.1016/j.trpro.2021.02.106.

12. Деклу, Ж. Метод конечных элементов / Ж. Деклу. – Москва : Мир, 1976. – 95 с. – Текст : непосредственный.

13. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути. Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14.11.2016 № 2288р. – Москва : ОАО «РЖД», 2016. – Текст : непосредственный.

14. Расчеты предельного состояния рельсов на основе моделирования их ресурса по дефектам 21.1, 21.2, 53.1, 69 / А. Ю. Абдурашитов, Д. В. Овчинников, В. А. Покацкий, П. В. Сычев. – Текст : непосредственный // Путь и путевое хозяйство. – 2019. – № 6. – С. 24–29.

15. Илларионова, Л. А. Анизотропные конструкции при строительстве и ремонте железнодорожной инфраструктуры / Л. А. Илларионова, А. А. Локтев. – Текст : непосредственный // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2021. – Т. 17. – № 17 (17). – С. 55–60.

References

1. Lisitsin A.I. Prospects for the development of the structure of the upper structure of the track and its elements. *Railway Track and Facilities*, 2019, no. 10, pp. 2-7 (In Russian).

2. Shur E.A., Borts A.I., Zagranichek K.L. [Differentiated heat-strengthened rails: application experience and development prospects on Russian railways]. *Bulletin of the Joint Scientific Council of JSC «Russian Railways»*, 2017, no. 3, p. 40 (In Russian).

3. Makhutov N.A., Kossov V.S., Oganyan E.S., Volokhov G.M., Ovechnikov M.N., Protopopov A.L. Prediction of contact-fatigue damage to rails using computational-experimental methods. Industrial laboratory. *Diagnostics of materials*, 2020, no. 86 (4), pp. 46-55 (In Russian), <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-4-46-55>.

4. Druzhinina O.V., Loktev A.A., Dmitrashko A.V., Sychev P.V. Study of a mathematical model for predicting the technical condition of a railway track. *Transport: science, technology, management. Scientific information collection*, 2019, no. 4, pp. 3-11 (In Russian).

5. Abdurashitov A.Yu., Sychev P.V. Forecasting the resource of the superstructure of the track in the process of operation. *Introduction of modern structures and advanced technologies in the track facilities*, 2017, vol. 11, no.11 (11), pp. 62-67 (In Russian).

6. Goryacheva I.G., Borts A.I., Zakharov S.M., Zagranichek K.L., Shur E.A. Research and modeling of the occurrence of surface contact fatigue damage in rails. *In the collection: Tribology - mechanical engineering. Proceedings of the XII International Scientific and Technical Conference dedicated to the 80th anniversary of IMASH RAS*, 2018, pp. 146-149 (In Russian).

7. Kuznetsova N.V. Statistical analysis of the withdrawal of rails with contact-fatigue types of defects. *Introduction of modern designs and advanced technologies in track facilities*, 2021, vol. 17, no. 17 (17), pp. 41-47 (In Russian).

8. Goryacheva I.G., Shur E.A., Borts A.I., Zakharov S.M. Study of the mechanisms of damage to rails of a new generation and modeling their occurrence. *Bulletin of the Joint Scientific Council of JSC «Russian Railways»*, 2017, no. 4, pp. 25-27 (In Russian).
9. Feodosiev V.I. Resistance of materials. Moscow, MSTU im. N. E. Bauman Publ., 1999, 592 p. (In Russian).
10. Shur E.A., Borts A.I., Bazanova L.V. Fatigue life of damaged rails. *In the collection: Journal of Physics: Conference Series. VIII International Conference «Deformation and Fracture of Materials and Nanomaterials»*, 2020, pp. 012071.
11. Ovchinnikov D.V., Pokatsky V.A., Gallyamov D.I. Factors Affecting the Dynamic Rail Canting of the Railway Track, *Transportation Research Procedia*, vol. 54, 2021, pp. 544-551, doi: 10.1016/j.trpro.2021.02.106 (In Russian).
12. Descloux, Jean. Methode des elements finis. Moscow, Mir Publ., 1976, 95 p. (In Russian).
13. Instructions for the current maintenance of the railway track, approved by the Order of Russian Railways OJSC dated 11/14/2016 № 2288r (In Russian).
14. Abdurashitov A.Yu., Ovchinnikov D.V., Pokatsky V.A., Sychev P.V. Calculations of the limit state of rails based on the simulation of their resource for defects 21.1, 21.2, 53.1, 69. *Railway Track and Facilities*, 2019, no. 6, pp. 24-29 (In Russian).
15. Illarionova L.A., Loktev A.A. Anisotropic structures in the construction and repair of railway infrastructure. *Implementation of modern structures and advanced technologies in track facilities*, 2021, vol.17, no. 17 (17), pp. 55-60 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Абдурашитов Анатолий Юрьевич

Проектно-конструкторское бюро по инфраструктуре – филиал ОАО «РЖД» (ПКБ И).
Космонавта Волкова ул., д. 6, г. Москва, 127299, Российская Федерация.
Кандидат технических наук, доцент, начальник отдела, доцент.
Тел.: +7 (499) 260-46-29.
E-mail: abdran@ya.ru

Овчинников Дмитрий Владиславович

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС).
Свободы ул., д. 2 в, г. Самара, 443066, Российская Федерация.
Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Железнодорожный путь и строительство», СамГУПС.
Тел.: +7 (846) 255-68-62.
E-mail: ovchinnikov@samgups.ru

Сычев Вячеслав Петрович

Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ)).
Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва, ГСП-4, 127994, Российская Федерация.
Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Транспортное строительство», РУТ (МИИТ).
Тел.: +7 (495) 649-19-63.
E-mail: vp@vpm770.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Abdurashitov Anatoliy Yur'evich

Design Bureau for Infrastructure – branch of JSC «Russian Railways» (PKB I).
6, Cosmonaut Volkov st., Moscow, 127299, the Russian Federation.
Ph. D. in Engineering, docent, head of department, associate professor.
Phone: +7 (499) 260-46-29.
E-mail: abdran@ya.ru

Ovchinnikov Dmitriy Vladislavovich

Samara State Transport University (SamSTU).
2 v, Svoboda st., Samara, 443066, the Russian Federation.
Ph. D. in Engineering, docent, associate professor of the department «Railway track and construction», SamSTU.
Phone: +7 (846) 255-68-62.
E-mail: ovchinnikov@samgups.ru

Sychev Vyacheslav Petrovich

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).
9, b. 9, Obraztsova st., Moscow, GSP-4, 127994, the Russian Federation.
Doctor of Sciences in Engineering, docent, professor of the department «Transport construction», RUT (MIIT).
Phone: +7 (495) 649-19-63.
E-mail: vp@vpm770.ru

Сычева Анна Вячеславовна

Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва, ГСП-4, 127994, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Здания и сооружения на транспорте», РУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (495) 649-19-34.

E-mail: anna@vpm770.ru

Sycheva Anna Vyacheslavovna

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

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

Ph. D. in Engineering, docent, associate professor of the department «Buildings and structures on transport», RUT (MIIT).

Phone: +7 (495) 649-19-34.

E-mail: anna@vpm770.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Оценка напряженно-деформированного состояния рельсов при различных условиях эксплуатации на основе моделирования методом конечных элементов / А. Ю. Абдурашитов, Д. В. Овчинников, В. П. Сычев, А. В. Сычева. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 1 (53). – С. 62 – 73.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Abdurashitov A.Yu., Ovchinnikov D.V., Sychev V.P., Sycheva A.V. Estimation of the stress-strain state of rails under various operating conditions based on finite element modeling. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 1 (53), pp. 62-73 (In Russian).

УДК 656.212.5

Ю. Б. Тихонов

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

МОДЕРНИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ЗАМЕНЫ ЗАМЕДЛИТЕЛЕЙ И ДРУГИХ РАБОТ НА СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРКАХ

Аннотация. В данной статье предметом исследования является процесс замены замедлителей на сортировочных горках. Целью исследования является сокращение трудовых и временных затрат, связанных с заменой замедлителей. С этой целью исследована возможность использования на третьей тормозной позиции сортировочной горки козловых кранов вместо железнодорожных. В результате проведенных исследований было установлено, что основным конкурентным преимуществом козловых кранов с решетчатой конструкцией моста является небольшой вес крана (соответственно его цена), наличие механизмов, которые обеспечивают возможность самомонтажа, срок службы козлового крана не менее 20 лет, грузоподъемность козлового крана остается постоянной независимо от положения грузовой тележки, в то время как у стрелового крана грузоподъемность зависит от вылета (длины стрелы и угла ее наклона), что создает неудобства при замене замедлителей большой массы. Из-за ограниченной длины пролета козлового крана целесообразно использовать два козловых крана на сортировочных горках малой и средней мощности. В качестве примера рассмотрен двухбалочный козловой кран ККД с консолями с решетчатой конструкцией моста, длиной пролета 42 м. С целью повышения эффективности эксплуатации козловые краны могут быть дополнительно задействованы на погрузо-разгрузочных работах на крайних путях третьей тормозной позиции и на аварийно-восстановительных работах. Использование козловых кранов позволит сократить количество необходимых при замене замедлителей локомотивов до одного, не использовать в работе железнодорожный кран. Дополнительно использование козлового крана позволит быстро ликвидировать возникшие аварийные ситуации, сократить простой в работе сортировочной горки и избежать непроизводительных потерь.

Ключевые слова: сортировочная горка, замедлитель, козловой кран, тормозная позиция, уклон железнодорожного пути.

Yuri B. Tikhonov

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

MODERNIZATION OF RETARDER REPLACEMENT PROCESSES AND OTHER WORK ON SORTING SLIDES

Abstract. In this article, the subject of research is the process of replacing retarders on sorting slides. The aim of the study is to reduce labor and time costs associated with the replacement of retarders. For this purpose, the possibility of using gantry cranes instead of railway cranes on sorting slides has been investigated. As a result of the conducted

research, it was found that the main competitive advantage of gantry cranes with a lattice bridge structure is the low weight of the crane (respectively, its price), the presence of mechanisms that provide the possibility of self-assembly, the load capacity of the gantry crane remains constant regardless of the position of the cargo truck, while the load capacity of the boom crane depends on the departure (length of the boom and the angle of its inclination), which creates certain inconveniences when replacing the retarders. Due to the limited span length of the gantry crane, it is advisable to use two gantry cranes on sorting slides of small and medium capacity. In order to increase the profitability of the use of gantry cranes, it is proposed to additionally engage in loading and unloading operations on the extreme tracks of the third braking position and in emergency situations during emergency recovery work. The use of gantry cranes will reduce the number of locomotives necessary for the replacement of decelerators to one, not to use a railway crane in operation. Additionally, the use of a gantry crane will allow you to quickly eliminate the emergency situations that have arisen, reduce downtime in the operation of the sorting slide and avoid unproductive losses.

Keywords: sorting slide, retarder, gantry crane, braking position, railway track slope.

На Северной железной дороге совершенствуют технику замены вагонных замедлителей.

Вагонный замедлитель – это смонтированное на железнодорожном пути тормозное устройство для снижения скорости движения вагонов (отцепов). Ресурс современных замедлителей составляет 5 млн срабатываний. На напряженных участках Северной железной дороги этот ресурс вырабатывается за пять – семь лет.

Установка новых вагонных замедлителей – ресурсоемкий процесс. Самая большая сложность – это получить окно для работы на таких загруженных участках, как сортировочные горки. Следующая трудность состоит в согласовании действий всех участников производственного процесса, так как на замене замедлителей работают представители дистанции сигнализации, централизации и блокировки, путевого комплекса и восстановительного поезда с восстановительными кранами, которые нужно заказывать заранее и, как правило, транспортировать с других станций.

На Северной магистрали ведется постоянная работа по сокращению времени на замену замедлителей. Ранее здесь применялась технология «один замедлитель в одно окно». Работа занимала восемь часов. В апреле 2021 г. на СЖД впервые применили технологию «два замедлителя в одно окно». Тогда на сортировочной горке станции Кошта два замедлителя установили за 10 часов, а на первой тормозной позиции сортировочной горки Ярославль-Главный два замедлителя заменили уже в шестичасовое окно.

Чтобы уложиться в окно без нарушения технологии, сосредоточились на усовершенствовании организации процесса и выявили операции, которые могут быть совмещены.

Прежде на замене замедлителей работал один локомотив. Сначала он доставлял к месту работ железнодорожный кран. Пока кран выставлялся на аутригеры, локомотив подавал порожние платформы для последующей погрузки на них демонтированных замедлителей. Затем транспортировал их в парк и отправлялся за платформами с новыми замедлителями.

По усовершенствованной технологии работали два локомотива. Пока первый выставлял кран, второй подавал порожние платформы для демонтированных замедлителей. Затем первый локомотив после установки крана доставлял платформу с новыми замедлителями. Таким образом, одновременно могли проводиться несколько операций.

Установку замедлителей на сортировочной горке Ярославль-Главный в соответствии с технологией провели восемь работников Ярославской дистанции сигнализации, централизации и блокировки, используя для этого кран ЕДК-1000/1 восстановительного поезда станции Иваново. Он поднимал замедлители массой 28 т каждый при вылете стрелы 22 м.

Новый опыт установки замедлителей в службе автоматики и телемеханики Северной дороги намерены тиражировать по всей магистрали, так как это позволит не только почти в два раза быстрее заменить два замедлителя, но и избежать лишних маневров на напряженном участке, тем самым увеличив безопасность движения [1].

Следует также отметить, что в последнее время износ горочных сортировочных устройств, особенно на горках малой мощности, подошел к критической отметке.

В эксплуатации находятся порядка 4000 вагонных замедлителей, около 70 % из них требуют замены и капремонта [2].

Для решения этих проблем без значительных затрат времени, сказывающихся на производительности работы сортировочных горок, последние требуют оснащения дополнительным оборудованием.

В данной статье предлагается рассмотреть возможность использования козловых кранов при замене замедлителей и других видах работ на сортировочных горках.

При этом отпадает необходимость заранее заказывать грузоподъемные краны восстановительного поезда, транспортировать их к месту работы на значительные расстояния и выставлять их на аутригеры. Кроме того, в процессе замены замедлителя вместо двух достаточно будет одного локомотива с двумя платформами, который доставит к месту назначения новый замедлитель и увезет демонтированный.

Козловые краны относятся к мостовой разновидности кранового оборудования, базируются на опорах. Опоры могут быть на одной или двух стойках, перемещаются по направляющим рельсовым путям на прочном бетонном фундаменте. Эффективность и производительность крановой установки зависят от качества и параметров укладки рельсового пути.

Перемещение моста на высоких опорах обеспечивает высокую грузоподъемность, мобильность и возможность работы на обширных площадках. На мостовом пролете движется грузовая тележка, к которой прикрепляют такие устройства, как магнит, крюк, траверса. Козловые краны работают с длинномерными, штучными, крупногабаритными грузами – в зависимости от установленного грузозахватного устройства. В железнодорожной области козловые краны используются для погрузки тяжеловесов, емкостей, металла, строительных материалов, продуктов лесозаготовки [3].

Из-за достаточно большой массы козловых кранов они перемещаются по рельсам, уложенным на прочное бетонное основание. Обязательное условие обустройства подобных рельсовых путей – наличие заземления и специальных упоров на концах пути, препятствующих сходу техники с рельсов. Кроме этого тележки, на которые опирается козловой кран, оборудуются так называемыми противоугонными захватами, необходимыми для удержания крана на месте во время сильного ветра.

Самостоятельно козловые краны выполняют следующие действия:

- подъем и опускание грузов в назначенное место;
- перемещение груза вдоль кранового моста (поперек оси движения крана);
- перемещение груза вдоль рельсового пути.

Чаще всего козловые краны можно встретить на различных складских площадках и на производстве. Отмечается, что они могут использоваться как под открытым небом, так и в закрытых помещениях, к примеру в литейных или сборочных цехах. Кроме этого козловые краны успешно работают на железнодорожных станциях, в портах и на крупных энергетических объектах [4].

Козловые краны КК и ККД с решетчатой конструкцией моста, с применением на подъем и перемещение груза подвесной грузовой каретки или двухрельсовой тележки относятся к кранам среднего и тяжелого режимов работы А5-А7. Управление краном осуществляется из стационарной или подвижной кабины. Основным конкурентным преимуществом данных кранов с решетчатой конструкцией моста является небольшой вес крана (соответственно его цена) при сохранении полной грузоподъемности на краю консоли [5].

Козловые краны решетчатой конструкции рассчитаны на длительный срок службы и легко адаптируются к изменениям потребностей эксплуатации благодаря модульной конструкции. При небольшой доработке можно изменить пролет крана, высоту подъема и рабочий вылет консолей, повысить режим работы. Решетчатая конструкция крана обеспечивает

одновременно и более высокую устойчивость к кручению, и более высокую прочность на изгиб по сравнению с другими конструкторскими решениями.

Решетчатая конструкция позволяет при относительно малом общем весе и высокой грузоподъемности иметь минимальную парусность.

Решетчатая конструкция проще и удобнее для монтажа и обслуживания, меньше затраты по уходу и эксплуатации. Краны решетчатой конструкции могут подниматься в проектное положение методом самомонтажа или при помощи стреловых кранов.

Элементы крана решетчатой конструкции доступней для качественной антикоррозионной защиты, так как практически все поверхности открыты. Можно как в ходе приемки нового крана, так и в процессе эксплуатации либо при покупке не нового крана легко оценить качество антикоррозионного покрытия, состояние сварных швов и элементов металлоконструкции [6].

Для работы на сортировочной горке козловой кран должен иметь соответствующую грузоподъемность (с учетом массы замедлителя), высоту подъема грузозахватного органа исходя из максимальной высоты вагонов от уровня верха головок рельсов и величину пролета, способную охватить как можно больше путей сортировочной горки с замедлителями. Для охвата большего количества путей целесообразно использовать козловой кран с консолями.

Двухбалочный козловой кран ККД с решетчатой конструкцией моста [5] изображен на рисунке 1.

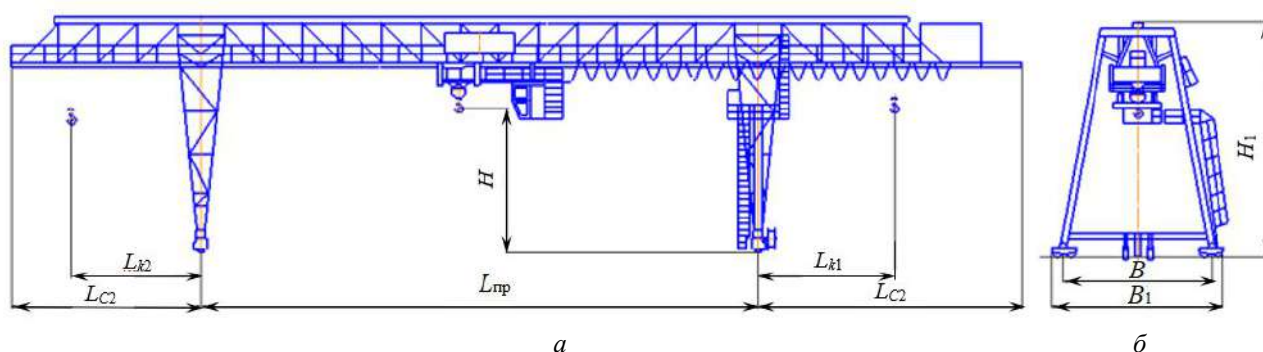


Рисунок 1 – Двухбалочный козловой кран ККД с решетчатой конструкцией моста

Основные технические характеристики козлового крана ККД приведены в таблице 1 [5].

Таблица 1 – Основные технические характеристики козлового крана ККД

Наименование параметра		Обозначение параметра	Описание или численное значение параметра
1		2	3
Грузоподъемность, т		Q	10; 12,5; 16; 20; 25; 32; 50
Пролет крана, м		$L_{пр}$	11,3; 16,0 (18,0); 20; 25; 32; 42
Высота подъема, м		H	До 14
Рабочий вылет консолей, м		L_{k1}, L_{k2}	6,3; 8,0
База крана, м		B	10,66; 15,08
Габариты крана, м	высота	H_1	14,5; 16,25
	ширина	B_1	12,5; 17,03
	длина	$L_{пр} + L_{c1} + L_{c2}$	До 59,5
Нагрузка на ходовое колесо, кН		P	До 250
Управление (кабина)			СК, ПК, радио
Тип токоподвода к крану			Кабельный барабан, кабельный карабин, троллей

Окончание таблицы 1

1	2	3
Режим работы	ИСО 4301/1	A3-A7
Тип подкранового рельса		P43, P50, P65, KP70
Диапазон рабочих температур, °C		От минус 40 до 40
Сейсмичность района установки		До 6 баллов (по СпН 11-7 – 81)
Допустимая скорость ветра		Рабочее состояние – 14 м/с Нерабочее состояние – 27 м/с

При заказе козлового крана следует выбирать максимально возможный пролет при минимально необходимой грузоподъемности.

Преимущество козлового крана перед используемыми в настоящее время железнодорожными состоит в том, что у него грузоподъемность остается постоянной независимо от положения грузовой тележки, в то время как у стрелового крана грузоподъемность зависит от вылета (длины стрелы и угла ее наклона), что создает неудобства при замене замедлителей большой массы.

Следует иметь в виду, что наибольшее число замедлителей расположено на третьем тормозном участке (рисунок 2).

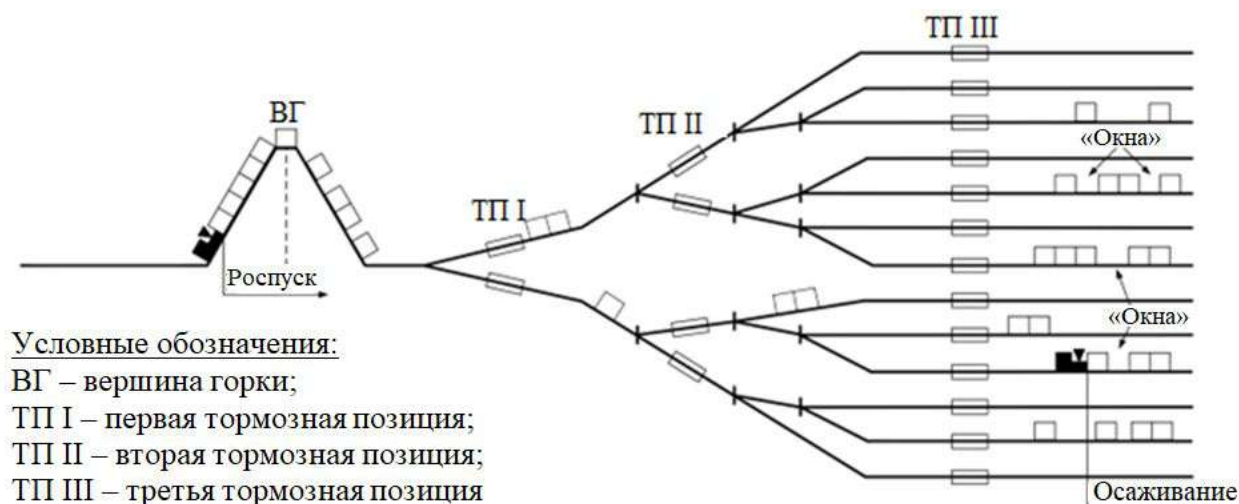


Рисунок 2 – Схема сортировочной горки

Уклон третьего тормозного участка составляет 2 ‰ (рисунок 3), что удовлетворяет условиям монтажа козлового крана по уклону кранового пути. При этом длина подкрановых путей ничем не ограничивается, что позволяет эксплуатировать козловые краны практически на всей площади третьего тормозного участка.

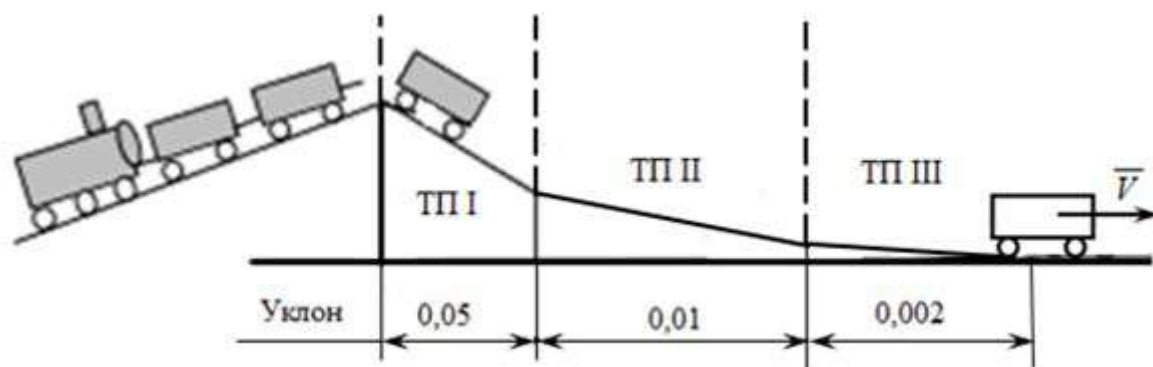


Рисунок 3 – Уклоны сортировочной горки

Учитывая, что козловые краны оборудуются консолями, обслуживаемая краном площадь, на которой можно проводить не только замену замедлителей, но и различные ремонтные работы и ликвидировать нештатные ситуации, составит:

$$S_{\text{ккс}} = (L_{\text{пр}} + L_{k1} + L_{k2}) \times L_{\text{п. п}}, \quad (1)$$

где $L_{\text{пр}}$ – пролет козлового крана;
 L_{k1} – правая консоль козлового крана;
 L_{k2} – левая консоль козлового крана;
 $L_{\text{п. п}}$ – длина подкранового пути.

Кроме замены замедлителей козловой кран для повышения эффективности его работы целесообразно использовать на погрузке и выгрузке вагонов, находящихся на крайних железнодорожных путях третьей тормозной позиции.

В соответствии с нормативными требованиями нормальные расстояния между осями смежных путей сортировочного парка принимают не менее 5,3 м, а между пучками – не менее 6,5 м, ось железнодорожных путей, прокладываемых под козловым краном, должна быть не ближе 2750 мм от оси рельсового пути крана [7].

При пролете козлового крана 42 м достигается охват семи путей сортировочной горки, плюс два пути, охватываемых консолями козлового крана.

Таким образом, один козловой кран способен обслуживать на сортировочной горке девять путей. Количество кранов определится количеством путей.

В соответствии с нормами проектирования сортировочных устройств [8, 9] сортировочные горки повышенной мощности проектируют для переработки в среднем не менее 5500 вагонов в сутки или при числе подгорочных путей 40 и более, а также в условиях структуры вагонопотока и путевого развития парков станции, обеспечивающих применение параллельного роспуска. Эти горки имеют не менее трех путей надвига и двух – четырех спускных путей.

Сортировочные горки большой мощности проектируют для переработки от 3500 до 5500 вагонов в сутки или при числе путей подгорочного парка 30 – 40, при этом параллельный роспуск составов не применяется.

Сортировочные горки средней мощности перерабатывают от 1500 до 3500 вагонов в сутки или имеют от 17 до 29 путей в подгорочном парке.

Сортировочные горки малой мощности перерабатывают от 250 до 1500 вагонов в сутки или 4 – 16 путей подгорочного парка. Эти горки имеют по одному пути надвига и спуска.

Сортировочные горки большой и средней мощности сооружаются, как правило, при числе путей в сортировочном парке не меньше 16 с двумя путями надвига и двумя спускными путями.

Горки малой мощности сооружаются при числе путей сортировочного парка меньше 16 и имеют один путь надвига [7].

Рассматриваемый в данной статье козловой кран позволяет «охватить» девять путей с учетом консолей крана. Таким образом, два козловых крана можно использовать на сортировочных горках с числом путей подгорочного парка до 16.

Для повышения эффективности эксплуатации козловых кранов целесообразно дополнительно использовать их для погрузо-разгрузочных работ на крайних путях подгорочного парка и при различных аварийных ситуациях для быстрой ликвидации таких ситуаций.

На время монтажа козлового крана сортировочная горка (или ее часть) должна быть выведена из эксплуатации. Такие работы следует проводить при строительстве новой горки или при реконструкции действующей, предварительно решив вопрос о целесообразности этого мероприятия в дальнейшем при эксплуатации применительно к конкретной станции. Здесь следует учитывать в первую очередь то обстоятельство, что простои и задержки грузовых составов, вызванные сбоями в работе сортировочной горки, недешево обходятся железной дороге.

Уклон железнодорожного пути на первом и втором тормозных участках сортировочной горки достигает соответственно 50 и 10 ‰ (см. рисунок 3). В связи с этим на таких участках усложняется монтаж козлового крана, для которого уклон не должен превышать 5 ‰. Целесообразность установки козлового крана на этих участках определяется в каждом конкретном случае.

В оценке общего экономического эффекта конкретного крана на практике следует учитывать регулярность его работы. Так, регулярно используемые краны на производстве оцениваются по производительности, а эпизодически применяемые грузоподъемные механизмы (например, только на монтажных работах) – по показателю стоимости машино-смены.

В некоторых случаях нужно учитывать особенности операции перерабатываемости груза. Так, при работе крана с крупногабаритными многотоннажными контейнерами требуются дополнительные временные затраты на переработку груза.

Другим показателем, оказывающим существенное влияние на экономическую эффективность крана, является технологичность процесса его изготовления, которая складывается из трудоемкости, себестоимости, массы наплавленного металла и количества деталей в конструкции крана, затрат на материалы и металлоемкости (расхода материала на изготовление).

Показатель экономической эффективности учитывает также стоимость монтажа козлового крана, на формирование которой влияют не только масса и габариты конструкции, но и состав электрооборудования, сложность прокладки электропроводки и кабины управления [10].

По существующей технологии процесс замены замедлителя включает в себя операции, представленные в таблице 2.

Таблица 2 – Существующая технология процесса замены замедлителя

Наименование операции	Затрачиваемое время, мин
1. Заказ заранее железнодорожного крана восстановительного поезда	20
2. Отключение заменяемого замедлителя от оборудования сортировочной горки	120
3. Доставка локомотивом к месту работ железнодорожного крана	По времени совмещена с операцией 2
4. Отправление локомотива за порожней платформой и подача порожней платформы к месту работы	40
5. Выставление железнодорожного крана на аутригеры	По времени совмещена с операцией 4
6. Погрузка железнодорожным краном на порожнюю платформу демонтированного замедлителя	20
7. Транспортирование локомотивом демонтированного замедлителя в парк	40
8. Отправление локомотива за платформой с новым замедлителем и доставка локомотивом нового замедлителя к месту работы	50
9. Установка железнодорожным краном нового замедлителя вместо заменяемого	30
10. Подключение нового замедлителя к оборудованию сортировочной горки	160

По предлагаемой технологии процесс замены замедлителя включает в себя операции, представленные в таблице 3.

Таблица 3 – Предлагаемая технология процесса замены замедлителя

Наименование операции	Затрачиваемое время, мин
1. Отключение заменяемого замедлителя от оборудования сортировочной горки	120
2. Подача локомотивом к месту работы двух платформ: порожней платформы для последующей погрузки на него демонтированного замедлителя и платформы с новым замедлителем	60
3. Погрузка козловым краном демонтированного замедлителя на порожнюю платформу	20
4. Установка козловым краном нового замедлителя вместо заменяемого	30
5. Транспортирование локомотивом демонтированного замедлителя в парк	По времени совмещена с операцией 4
6. Подключение нового замедлителя к оборудованию сортировочной горки	160

Результат проведенного исследования показывает, что по предлагаемой технологии (см. таблицы 2, 3) время, затрачиваемое на замену замедлителя, сокращается на 200 мин.

Для монтажа козлового крана не требуется выводить из эксплуатации пути сортировочного парка, но потребуются монтаж специальных крановых путей.

Ориентировочные капитальные затраты на модернизацию процесса замены вагонных замедлителей и других работ на сортировочной горке на один кран приведены в таблице 4 [11 – 13].

Таблица 4 – Ориентировочные капитальные затраты на модернизацию процесса замены вагонных замедлителей и других работ на сортировочной горке на один кран

Статья расходов	Сумма, руб.
Монтаж кранового пути	1 000 000
Козловой кран	3 000 000
Монтаж козлового крана	400 000
Итого: сумма инвестиций в проект	4 400 000

Определим ориентировочный годовой доход от эксплуатации козлового крана на погрузо-разгрузочных работах.

Удельная производительность козлового крана составляет 168 т/ч [14].

Годовой фонд рабочего времени крана составляет 2670 ч [15].

Годовая производительность козлового крана: $168 \times 2670 = 448560$ т.

Ставка сбора за производство одной операции с контейнерами массой 40 т принята равной 110 руб. [15]. Соответственно ставка сбора за производство одной тонны груза – $110/40 = 2,75$ руб./т.

Годовой доход от максимальной эксплуатации козлового крана на погрузо-разгрузочных работах составит $448560 \times 2,75 = 1\,233\,540$ руб.

На сортировочной горке на погрузо-разгрузочных работах кран загружен на 90 %, при этом годовой доход составит $1\,233\,540 \times 0,9 = 1\,110\,186$ руб.

Расходы, связанные с эксплуатацией крана, составят 20 % от дохода. Чистый доход составит $1\,110\,186 \times 0,8 = 888\,148,8$ руб.

Ориентировочные данные составляющих планируемой ежегодной прибыли на один кран приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Ориентировочные данные составляющих планируемой ежегодной прибыли на один кран

Вид прибыли	Сумма, руб.
Экономия на аренде железнодорожного крана для замены двух замедлителей	80 000
Сокращение потерь от простоя сортировочной горки, связанных как с заменой замедлителей, так и с ликвидацией нештатных ситуаций с использованием козлового крана	300 000
Чистый годовой доход от эксплуатации козлового крана на погрузо-разгрузочных работах	888 148,8
Итого: планируемая ежегодная прибыль	1 268 148,8

Срок окупаемости

$$C_{\text{ок}} = \frac{И}{П},$$

где И – сумма инвестиций в проект;

П – планируемая ежегодная прибыль.

(2)

$$C_{\text{ок}} = \frac{И}{П} = \frac{4400000}{1\,268\,148,8} = 3,47 \text{ года.}$$

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

Предлагаемая технология исключает трудовые затраты, связанные с заказом железнодорожного крана, доставкой его к месту работы и выставлением на аутригеры.

При использовании железнодорожного крана из-за его ограниченного вылета отсутствует возможность одновременной подачи к месту работы порожней платформы и платформы с новым замедлителем. Поэтому использование локомотива отдельно для доставки к месту работы порожней платформы и нового замедлителя, предусмотренное существующей технологией, по предлагаемой технологии заменяется одной операцией подачи локомотивом к месту работы сразу двух платформ: порожней платформы для последующей погрузки на него демонтированного замедлителя и платформы с новым замедлителем.

В целом экономическая эффективность от внедрения предлагаемой технологии складывается из следующих факторов:

- сокращение времени замены замедлителя и, как следствие, сокращение простоев в работе сортировочной горки;

- сокращение трудозатрат при замене замедлителя;

- получение дополнительного дохода от использования козлового крана на погрузо-разгрузочных и других работах.

В настоящее время сортировочные горки на железнодорожных станциях используются только для роспуска составов, сортировки вагонов и формирования партий для отправки по назначению. Сведения о случаях совмещения операций погрузки/разгрузки и сортировки вагонов на сортировочных горках не найдены.

Однако есть целесообразность в объединении сортировочной и грузовой операций и организации обработки грузов в технологический процесс работы сортировочной горки. Такой подход позволит использовать козловые краны как при замене замедлителей, так и на погрузо-разгрузочных операциях и других работах. В частности, вопрос поточной обработки контейнеров за счет включения контейнерного терминала в технологический процесс работы сортировочной горки рассмотрен в изобретении [16].

Список литературы

1. Солондаева, Е. Замедлителям ускорили замену. – Газета «Северная магистраль». – Выпуск № 25 от 02.07.2021 // Gudok.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://www.Gudok.ru/> (дата обращения: 18.07.2021).

2. Ершова, Е. А. Повышение эксплуатационной надежности станций путем влияния на проектные решения сортировочных горок // pandia.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://www.pandia.ru/> (дата обращения: 03.08.2021).

3. Козловые краны КК: технические характеристики. Описание, параметры и модельный ряд козловых кранов // avtokrany.guru/ : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://avtokrany.guru/vidy/kozlovye/opisanie-parametry-i-modelnyj-ryad-kozlovyh-kranov/> (дата обращения: 29.09.2022).

4. Описание, параметры и модельный ряд козловых кранов КК // kran-master74.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: https://kran-master74.ru/heavy/kozlovye_krany/ (дата обращения: 09.09.2022).
5. Грузоподъемное оборудование. Кран козловой трубчатой и решетчатой конструкции типа ККТ, КК, ККД. Главная – ООО «ВологдаТочМаш» – Производство... // tochmash35 : сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://www.tochmash35/> (дата обращения: 05.08.2022).
6. Преимущества кранов с решетчатой конструкцией // kranvologda.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: www.kranvologda.ru>article/preimusestva-kranov-s/ (дата обращения: 05.09.2022).
7. Числов, О. Н. Проектирование и расчет сортировочных горок : учебное пособие / О. Н. Числов, В. А. Лебедева, В. В. Хан. – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2017. – 83 с. – Текст : непосредственный.
8. Проектирование сортировочных устройств : учебное пособие / под ред. Е. Э. Червотенко. – Хабаровск : Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 2014. – 75 с. – Текст : непосредственный.
9. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах колеи 1520 мм. – Москва : Техинформ, 2003. – 168 с. – Текст : непосредственный.
10. Показатели экономической эффективности козлового крана // vmtechnix.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://www.vmtechnix.ru>news/pokazateli-ekonomicheskoy...krana/> (дата обращения: 06.09.2022).
11. Монтаж мостовых кранов и кран-балок // roskran.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://www.roskran.ru/katalog-oborudovaniya/uslugi-i-montazh/montazh-mostovyh-kranov-i-kran-balok/> (дата обращения: 09.11.2022).
12. Козловой кран КС 50-42 Б в кол-ве 2 единицы Б/У // oboruduy.com : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://oboruduy.com/kozlovyje-krany/> (дата обращения: 09.11.2022).
13. Монтаж козлового крана по низкой цене // <http://kran-balky.ru> : сайт. – Текст : электронный. – URL: http://kran-balky.ru/montazh_kozlovogo_krana.html (дата обращения: 09.11.2022).
14. Определение производительности козлового электрокрана // <https://studfile.net> : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://studfile.net/preview/3616555/page:7/> (дата обращения: 09.11.2022).
15. Определение годовой производительности крана // kazedu.com : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://kazedu.com/referat/107785/1/> (дата обращения: 09.11.2022).
16. Патент № 2388680 Российская Федерация, МПК В65G 63/04 (2006.01), В65G 67/60 (2006.01). Терминал для поточной обработки контейнеров на основе сортировочной горки Кузовкова : № 2008123074/11 : заявлено 2008.06 : опубликовано 10.05.2010 / Кузовков А. М. – 19 с. : 15 ил. – Текст : непосредственный.

References

1. Solondaeva, E. *Zamedlitelyam uskorili zamenu* [Retarders accelerated replacement], The newspaper «Northern Highway». Issue no. 25, dated 02.07.2021. Available at: <http://www.Gudok.ru/> (accessed 18.07.2021).
2. Ershova E.A. *Povishenie ekspluatacionnoi nadejnosti stancii putem vliyaniya na proektnie resheniya sortirovochnih gorok* [Improving the operational reliability of stations by influencing the design solutions of sorting slides]. Available at: <http://www.pandia.ru/> (accessed 03.08.2021).
3. *Kozlovie krani KK_ tehicheskie harakteristiki. Opisanie_parametri i modelnii ryad kozlovyh kranov* [Gantry cranes KK: technical characteristics. Description, parameters and model range of gantry cranes]. Available at: <https://avtokrany.guru/vidy/kozlovye/opisanie-parametry-i-modelnyj-ryad-kozlovyh-kranov/> (accessed 29.09.2022).

4. *Opisanie_parametri i modelnii ryad kozlovih kranov KK* [Description, parameters and model range of KK gantry cranes]. Available at: https://kran-master74.ru/heavy/kozlovye_krany/ (accessed 09.09.2022).

5. *Gruzopodemnoe oborudovanie. Kran kozlovoi trubchatoy i reshetchatoi konstrukcii tipa KKT_KK_KKD. Glavnaya – ООО «VologdaTochMash» – Proizvodstvo...* [Georgian equipment. Crane kozlovoy trubchatoy and lattice structures type cct, cc, ccd], – Main – LLC «Vologdatochmash» – production. Available at: <http://www.tochmash35/> (accessed 05.08.2022).

6. *Preimushchestva kranov s reshetchatoi konstrukciei* [Advantages of Lattice Valves]. Available at: <http://www.kranvologda.ru>article/preimusestva-kranov-s/> (accessed 05.09.2022).

7. Chislov O.N., Lebedeva V.A., Khan V.V. *Proektirovanie i raschet sortirovochnih gorok _uchebnoe posobie* [Design and calculation of sorting slides : textbook]. Rostov-on-Don, Rostov State University of Railway Transport Publ., 2017, 83 p. (In Russian).

8. *Proektirovanie sortirovochnih ustroystv : uchebnoe posobie* [Design of sorting devices : studies. stipend] – edited by E. E. Chervotenko. – Khabarovsk : Far Eastern State University of Railway Engineering Publ., 2014, 75 p. (In Russian).

9. *Pravila i normi proektirovaniya sortirovochnih ustroystv na jeleznih dorogah kolei 1520 mm* [Rules and regulations for the design of sorting devices on 1520 mm gauge railways], Moscow, Tekhninform, 2003, 168 p. (In Russian).

10. *Pokazateli ekonomicheskoi effektivnosti kozlovogo krana* [Indicators of economic efficiency of a gantry crane]. Available at: <http://www.vmtelnix.ru>news/pokazateli-ekonomicheskoy...krana/> (accessed 06.09.2022).

11. *Montaj mostovih kranov i kran balok* [Installation of overhead cranes and crane beams]. Available at: <https://www.roskran.ru/katalog-oborudovaniya/uslugi-i-montazh/montazh-mostovyh-kranov-i-kran-balok/> (accessed 09.11.2022).

12. *Kozlovoi kran KS 50_42 B v kol_ve 2 edinici B/U* [Gantry crane KS 50-42 B in the number of 2 units Used]. Available at: <https://www.oboruduy.com/kozlovyje-krany/> (accessed 09.11.2022).

13. *Montaj kozlovogo krana po nizkoi cene* [Installation of a gantry crane at a low price]. Available at: http://www.kran-balky.ru/montazh_kozlovogo_krana.html/ (accessed 09.11.2022).

14. *Opreделение производительности козлового электрокрана* [Determining the performance of a gantry electric crane]. Available at: <https://www.studfile.net/preview/3616555/page:7/> (accessed 09.11.2022).

15. *Opreделение годовой производительности крана* [Determination of the annual capacity of the crane]. Available at: <https://www.kazedu.com/referat/107785/1/> (accessed 09.11.2022).

16. Kuzovkov A.M. *Patent RU 2388680 C2*, 10.06.2008.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Тихонов Юрий Борисович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 44-39-01.

E-mail: tichonov_ub@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Tikhonov Yuri Borisovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, docent, associate professor of the department «Automatics and telemechanics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 44-39-01.

E-mail: tichonov_ub@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Тихонов, Ю. Б. Модернизация процессов замены замедлителей и других работ на сортировочных горках / Ю. Б. Тихонов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 1 (53). – С. 73 – 83.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Tikhonov Yu.B. Modernization of retarder replacement processes and other works on sorting slides. Journal of Transsib Railway Studies, 2023, no. 1 (53), pp. 73-83. (In Russian).

З. Г. Мухамедова, З. В. Эргашева

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

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНТЕЙНЕРНЫХ БЛОК-ПОЕЗДОВ В УЗБЕКИСТАНЕ

Аннотация. Цель: провести корреляционный анализ факторов, оказывающих влияние на увеличение числа контейнерных перевозок по железной дороге в составе контейнерных блок-поездов в Узбекистане. **Методы:** Применяются научные методы анализа, математической статистики, экономического анализа, модели регрессионного анализа. **Результаты:** Определены факторы, влияющие на величину контейнерных перевозок в составе блок-поездов по железной дороге в Республике Узбекистан. Рассмотрена динамика объема величины контейнерных перевозок по железной дороге. Из них – общенациональные показатели, например ВВП (номинальный в валюте, не испытывающей внутренних экономических изменений, например в USD); показатели общих грузоперевозок и грузоперевозок альтернативным транспортом; показатели изменения длины железнодорожных путей и альтернативной транспортной сети, экспортных и импортных грузоперевозок. Для определения степени и направления влияния регрессоров построена регрессионная модель методом наименьших квадратов. Данная модель показала высокую эффективность. **Практическая значимость:** Ежегодно объемы контейнерных импортных и экспортных перевозок грузов в составе блок-поездов в Узбекистане возрастают. Эта тенденция складывается под влиянием различных факторов, оказывающих влияние на данную сферу организации грузоперевозок. Анализ показывает, что в последние годы контейнерные перевозки имеют тенденцию роста за счет повышения объемов экспортно-импортных грузов и других факторов, включая уменьшение длины дорог с твердым покрытием и увеличение грузоперевозок автомобильным транспортом (в миллионах тонн). Для поддержания заданной тенденции и эффективной организации контейнерных перевозок требуется формирование соответствующей инфраструктуры на технологическом, коммерческом, техническом и организационном уровнях, что позволит существенно нарастить объемы контейнерных перевозок и даст толчок к развитию сопутствующих сфер и направлений.

Ключевые слова: инфраструктура, контейнерные перевозки, железнодорожные перевозки экспорт, импорт, ВВП, транзит, транспортная услуга, блок-трейн, корреляционный анализ.

Ziyoda G. Muhamedova, Zakhro V. Ergasheva

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

FACTORS AFFECTING THE USE OF CONTAINER BLOCK TRAINS IN UZBEKISTAN

Abstract. Purpose: to conduct a correlation analysis of the factors influencing the increase in the number of container transportation by rail as part of container block trains in Uzbekistan. **Methods:** Scientific methods of analysis, mathematical statistics, economic analysis, regression analysis models are applied. **Results:** The factors influencing the amount of container traffic as part of block trains by rail in the Republic of Uzbekistan were determined. The dynamics of the volume of container traffic by rail is considered. Among them – national indicators, for example, GDP (nominated in a currency that does not experience internal economic changes, for example, in USD); indicators of general cargo transportation and cargo transportation by alternative transport; export and import cargo transportation. To determine the degree and direction of influence of the regressors, a regression model was built using the least squares method. This model showed high efficiency. **Practical significance:** Every year, the volume of container import and export transportation of goods as part of block trains in Uzbekistan increases. This trend is formed under the influence of various factors that affect this area of the organization of cargo transportation. The conducted correlation analysis shows that in recent years, container traffic has been growing due to an increase in the volume of export-import cargo and other factors, including a decrease in the length of paved roads and an increase in cargo transportation by road (in million tons). To maintain the given trend and the effective organization of container traffic, it is necessary to form an appropriate infrastructure at the technological, commercial, technical and organizational levels, which will significantly increase the volume of container traffic and give impetus to the development of related areas and directions.

Keywords: infrastructure, container transportation, rail transportation export, import, GDP, transit, transport service, block train, correlation analysis.

Сегодня Азиатско-Тихоокеанский регион является одним из мировых центров формирования контейнерных потоков грузоперевозок [4]. Узбекистан также входит в число стран, наиболее активно использующих контейнерные перевозки как средство развития внешнеторговых контактов. Одно из ключевых преимуществ контейнеров в данном случае заключается в их высоком уровне мобильности, что способствует организации доставки перевозимых грузов в составе контейнерных блок-поездов «до двери» организации-заказчика [2]. Данный факт обуславливает тенденцию к увеличению числа контейнерных перевозок в блок-поездах для организации цепочки поставок предприятиями Узбекистана. Тем не менее, несмотря на такую тенденцию, контейнерные перевозки составляют менее 5 % от общего объема осуществляемых грузоперевозок в Узбекистане [5]. Цель данного исследования – провести корреляционный анализ факторов, оказывающих влияние на увеличение числа контейнерных перевозок по железной дороге в составе блок-поездов в Узбекистане.

Экономико-математический анализ использования контейнерного блок-трейна на железнодорожном транспорте основан на использовании корреляционно-регрессионного анализа и предусматривает следующее:

- 1) определение факторов, влияющих на величину контейнерных перевозок в составе блок-поездов по железной дороге в Республике Узбекистан;
- 2) построение уравнений регрессии зависимости использования контейнерного блок-трейна на железнодорожном транспорте от определяющих его факторов;
- 3) анализ динамики влияния факторов;
- 4) проведение сравнительного экономического анализа на основе системы регрессионных моделей;
- 5) определение закономерностей и тенденции изменения использования контейнерного блок-трейна на железнодорожном транспорте в исследуемом объекте.

Прежде всего рассмотрим динамику величины контейнерных перевозок по железной дороге, приведенную в таблице 1 и на рисунке 1 [1, 3].

Таблица 1 – Перевезено грузов, отправленных в крупнотоннажных контейнерах железнодорожным транспортом Республики Узбекистан за период 2000 – 2021 гг., млн т

Год	Объем перевезенных грузов в крупнотоннажных контейнерах железнодорожным транспортом, млн т
2000	0,51
2001	0,56
2002	0,57
2003	0,68
2004	0,70
2005	0,78
2006	0,88
2007	1,04
2008	1,04
2009	1,12
2010	1,02
2011	1,12
2012	1,23
2013	1,34
2014	1,45
2015	1,41
2016	1,35
2017	1,46
2018	1,51
2019	1,58
2020	1,27
2021	1,48

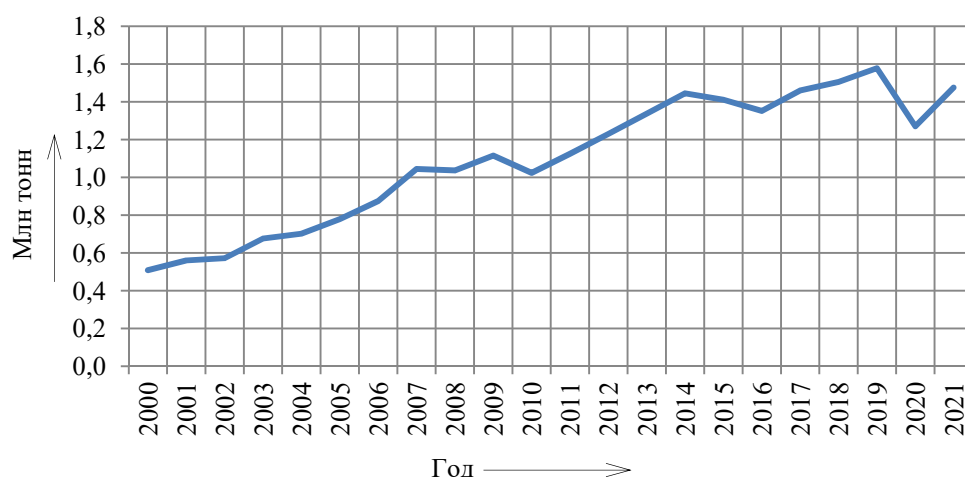


Рисунок 1 – Перевезено грузов, отправленных в крупнотоннажных контейнерах, железнодорожным транспортом Республики Узбекистан за период 2000 – 2021 гг., млн т

Далее необходимо определить факторы, влияющие на динамику грузоперевозок в контейнерах [2, 3, 6]. Обычно в роли таких факторов выступают:

- 1) общенациональные показатели, например, ВВП (номинарованный в валюте, не испытывающей внутренних экономических изменений, например, в USD);
- 2) показатели общих грузоперевозок и грузоперевозок альтернативным транспортом;
- 3) показатели изменения длины железнодорожных путей и альтернативной транспортной сети;
- 4) показатели экспортных и импортных грузоперевозок.

Статистика перечисленных факторов приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Факторы, влияющие на показатели грузоперевозок, отправленных в крупнотоннажных контейнерах, железнодорожным транспортом Республики Узбекистан

Год	ВВП, млрд USD	Перевезено грузов, млн т	Ж/д перевозка, млн т	Авто-перевозка, млн. т	Экспорт товаров и услуг и т. д., млн USD	Экспорт, млн USD	Импорт товаров и услуг, млн USD	Импорт, млн USD
2000	65,8	804,6	42,4	701,2	3264,7	384,3	2947,4	188,2
2001	70,1	763,2	41,5	658,7	3170,3	412,0	3136,9	250,8
2002	74	733,8	44,0	627,9	2988,4	426,9	2712,0	195,3
2003	78,6	707,6	45,1	596,2	3725,0	477,8	2964,2	220,7
2004	86,7	716,3	45,3	603,2	4853,0	496,9	3816,0	251,8
2005	95,7	755,9	45,8	638,6	5408,8	586,9	4091,2	250,2
2006	106,1	812,8	50,0	689,8	6389,7	664,0	4781,5	195,6
2007	119,3	879,3	58,0	745,2	8991,5	807,6	6728,1	233,2
2008	132,5	950,4	62,8	811,2	11493,3	926,5	9703,9	292,3
2009	144,2	1078,0	65,6	959,3	11771,3	692,2	9438,3	258,7
2010	156,2	763,1	56,9	652,5	13023,4	847,4	9175,8	237,1
2011	171,5	827,5	59,2	708,4	15021,3	1115,3	11344,6	281,9
2012	180,5	858,7	61,5	732,7	13599,6	1331,3	12816,5	293,5
2013	190,6	930,0	63,7	801,3	14322,7	1390,2	13946,9	335,5
2014	199,8	1000,4	65,7	868,9	13545,7	1489,1	13984,3	372,9
2015	209,1	1070,5	67,2	943,3	12507,6	1465,9	12416,6	219,4
2016	216,5	1132,5	67,6	1002,8	12094,6	1511,4	12137,6	255,8
2017	221,6	1146,2	67,9	1013,1	12553,7	1600,7	14012,4	303,0
2018	239	1243,0	68,4	1102,2	13990,7	1687,9	19439,3	383,7
2019	257,2	1319,8	70,1	1177,7	17458,7	1765,7	24292,3	415,1
2020	265,2	1366,7	70,6	1238,2	15102,3	1426,1	21153,8	165,6
2021	296,7	1420,2	72,0	1282,0	16662,8	1744,1	25507,7	211,1

Построим графики однотипных (по единице измерения) факторов (рисунки 2 – 5).

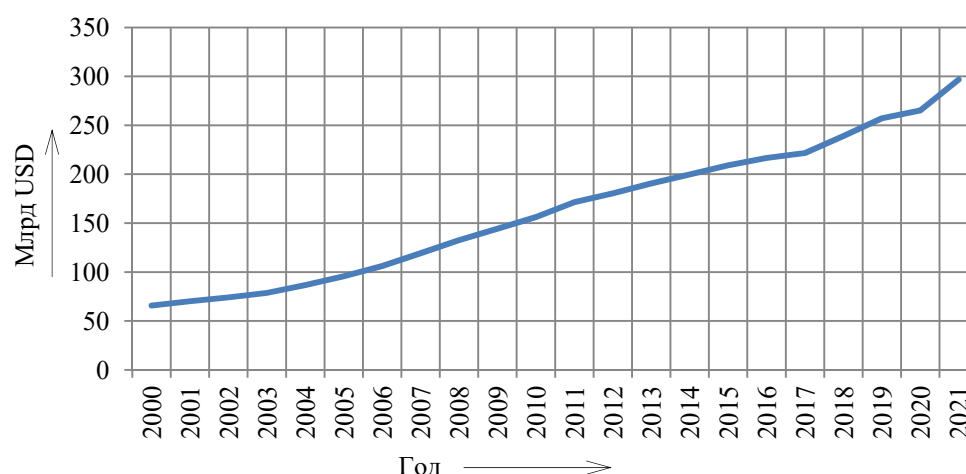


Рисунок 2 – ВВП, млрд USD

В данном случае (см. рисунок 2) наблюдается постепенное ежегодное увеличение показателя ВВП Узбекистана, что способствует дальнейшему развитию различных отраслей, в том числе грузоперевозок.

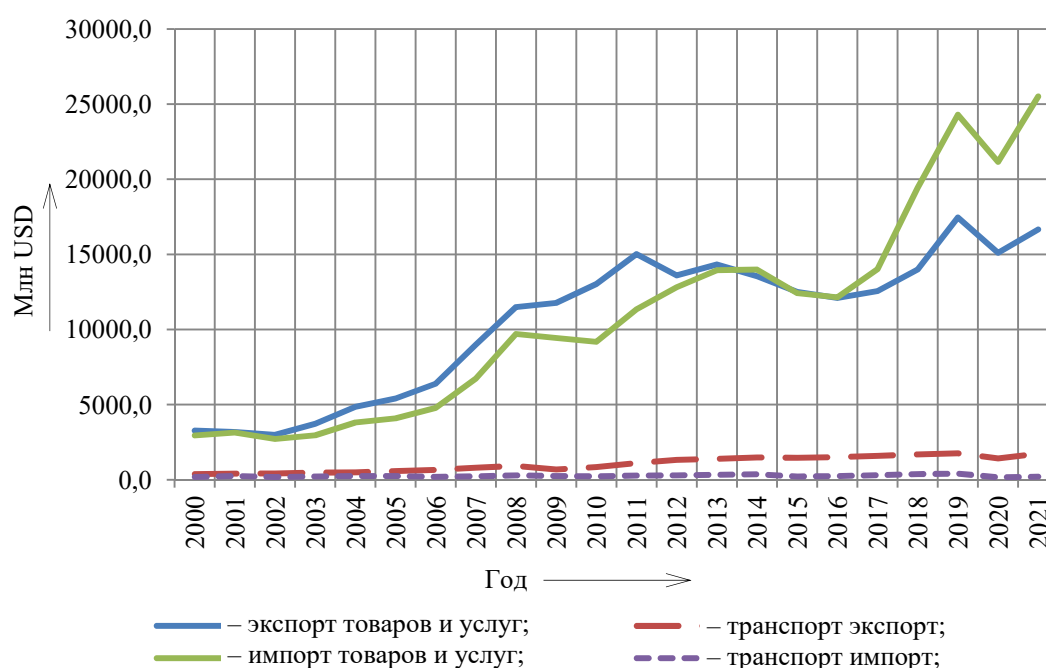


Рисунок 3 – Экспорт, импорт, млн USD

Анализ графика, представленного на рисунке 3, позволяет сделать вывод о том, что экспортные операции, как и операции импорта, имеют положительную динамику, однако объемы импорта растут несколько быстрее.

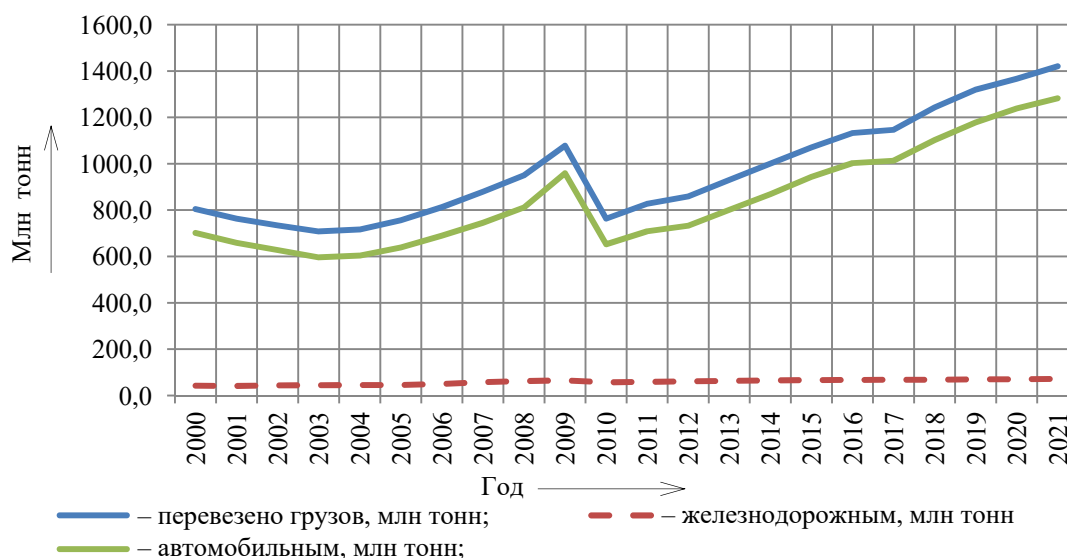


Рисунок 4 – Грузоперевозки, млн т

Анализ графика, представленного на рисунке 4, позволяет сделать вывод о том, что темпы роста объемов автомобильных перевозок превышают темпы роста объемов грузов, перевезенных железнодорожным транспортом, где динамика остается практически неизменной на протяжении длительного периода.

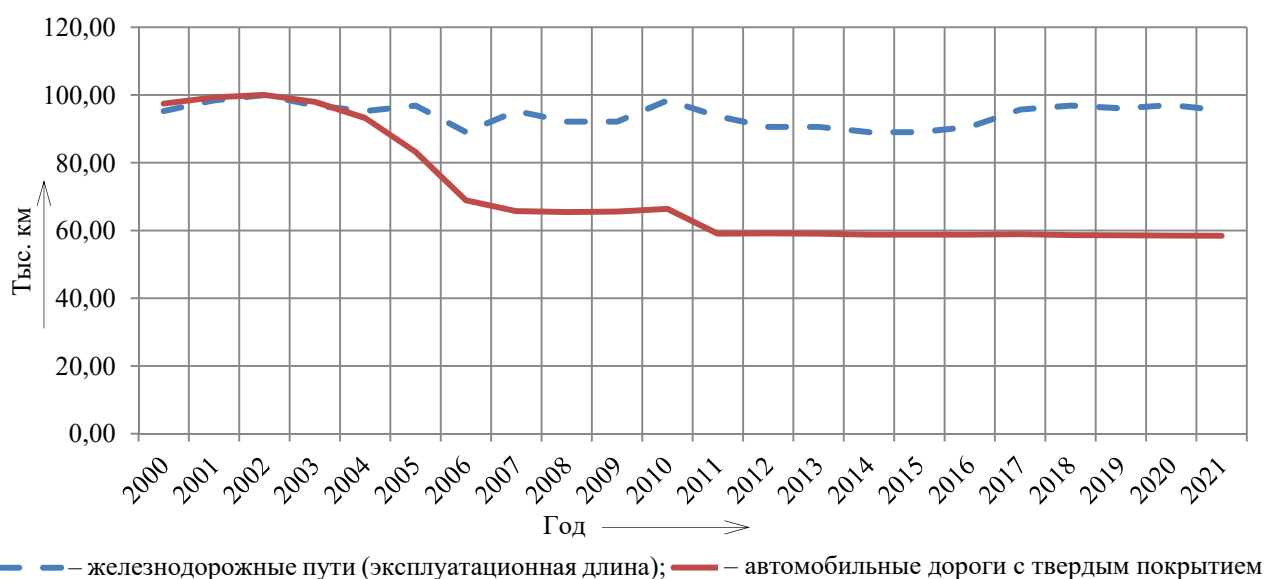


Рисунок 5 – Длина железнодорожной и автомобильной транспортной сети, тыс. км

Следует отметить увеличение эксплуатационной длины железнодорожных путей в сравнении со снижающимся объемом автомобильных дорог с твердым покрытием, что свидетельствует о дополнительных возможностях использования железнодорожного транспорта в целом и контейнерных блок-поездов в частности [7 – 9].

Установим факторы, влияющие на контейнерные перевозки по железной дороге. Вначале введем обозначения (таблица 3).

При регрессионном анализе использования контейнерного блок-трейна на железнодорожном транспорте использованы фактические данные государственного комитета статистики Республики Узбекистан.

Таблица 3 – Обозначение зависимой переменной «Железнодорожные контейнеры» и остальных регрессоров

Показатели	Регрессоры
Железнодорожные контейнеры	kont
Перевезено грузов	gr
Железнодорожные перевозки	rw
Автомобильные перевозки	av
ВВП	vvp
Длина железнодорожных путей	put
Длина дорог с твердым покрытием	dor
Экспорт товаров и услуг	exp
Экспорт	texp
Импорт товаров и услуг	imp
Импорт	timp

Формула расчета коэффициента парной корреляции (Пирсона) имеет вид:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (1)$$

где n – число наблюдений;

x_i – i -е наблюдаемое значение независимой случайной величины;

y_i – i -е наблюдаемое значение зависимой случайной величины;

Для выделения коллинеарности факторов рассчитаны коэффициенты парной корреляции между всеми показателями, включенными в анализ (таблица 4). Число от -1 до 1 характеризует тесноту линейной корреляционной связи (корреляцию) между зависимой и независимой случайными величинами.

Таблица 4 – Корреляционная матрица

Корреляции	kont	gr	rw	av	vvp	put	dor	exp	texp	imp	timp
kont	1,000	0,811	0,959	0,796	0,936	-0,400	-0,921	0,925	0,968	0,886	0,577
gr	0,811	1,000	0,868	0,999	0,908	-0,102	-0,682	0,754	0,832	0,917	0,275
rw	0,959	0,868	1,000	0,857	0,934	-0,372	-0,923	0,936	0,915	0,890	0,432
av	0,796	0,999	0,857	1,000	0,902	-0,086	-0,665	0,743	0,820	0,911	0,255
vvp	0,936	0,908	0,934	0,902	1,000	-0,211	-0,840	0,915	0,962	0,969	0,385
put	-0,400	-0,102	-0,372	-0,086	-0,211	1,000	0,519	-0,319	-0,319	-0,116	-0,194
dor	-0,921	-0,682	-0,923	-0,665	-0,840	0,519	1,000	-0,928	-0,854	-0,772	-0,435
exp	0,925	0,754	0,936	0,743	0,915	-0,319	-0,928	1,000	0,893	0,901	0,502
texp	0,968	0,832	0,915	0,820	0,962	-0,319	-0,854	0,893	1,000	0,919	0,540
imp	0,886	0,917	0,890	0,911	0,969	-0,116	-0,772	0,901	0,919	1,000	0,444
timp	0,577	0,275	0,432	0,255	0,385	-0,194	-0,435	0,502	0,540	0,444	1,000

Исходя из критерия близости по модулю корреляционных коэффициентов к 1 значимыми регрессорами для зависимой переменной kont являются rw (0,959), texp (0,968), vvp (0,936), exp (0,925), dor ($-0,921$), imp (0,886), av (0,796) и в последнюю очередь timp ($0,577 > 0,5$).

Однако выбор регрессоров rw, texp, vvp, exp, imp невозможен из-за их высокой корреляции между собой и другими регрессорами.

Следовательно, в качестве регрессоров модели выберем такие:

- dor «Длина дорог сТП»;
- av «Автомобильные перевозки»;
- timp «Импорт».

Для определения степени и направления влияния регрессоров построим регрессионную модель методом наименьших квадратов (МНК).

По своим характеристикам модель адекватна в высокой степени, поскольку коэффициент детерминации R -квадрат = 0,953 очень близок к 1, P -значение статистики Фишера для $\text{kont} \ll \alpha = 0,05$ (95 % доверительный интервал), P -значения t -статистики Стьюдента для всех регрессоров также значительно меньше 0,05, статистика Дарбина – Вотсона больше 1 (связанный с ней параметр $\rho < 0,5$), что свидетельствует о практическом отсутствии автокорреляции первого порядка, критерии же логического правдоподобия, Акаике, Шварца и Хеннана – Куинна по модулю меньше 100, что на практике также означает высокую эффективность модели [10 – 12].

Таблица 5 – Регрессионная модель

Модель 2: МНК, использованы наблюдения 2000 – 2021 (Т = 22)					
Зависимая переменная: kont					
	Коэффициент	Ст. ошибка	t-статистика	P-значение	
const	1,20115	0,216476	5,549	<0,0001	***
av	0,000547821	0,000109259	5,014	<0,0001	***
dor	–0,0168115	0,00208507	–8,063	<0,0001	***
timp	0,00120523	0,000295258	4,082	0,0007	***
Среднее значение зависимости переменной	1,094745	Стандартное отклонение зависимой переменной		0,343001	
Сумма квадратов остатков	0,116041	Стандартная ошибка модели		0,080292	
R-квадрат	0,953032	Испр. R-квадрат		0,945204	
F (3, 18)	121,7465	P-значение (F)		3,84e-12	
Логарифмическое правдоподобие	26,47671	Критерий Акаике		–44,95342	
Критерий Шварца	–40,58925	Критерий Хеннана – Куинна		–43,92535	
Параметр rho	0,395489	Статистика Дарбина – Вотсона		1,154011	
Тест Вайта (White) на гетероскедастичность -					
Нулевая гипотеза: гетероскедастичность отсутствует, поскольку					
Тестовая статистика: LM = 7,76058					
P(X-квадрат(9) = 16,9 > 7,76058					

Эти выводы подтверждаются графиками, представленными на рисунках 6 и 7.

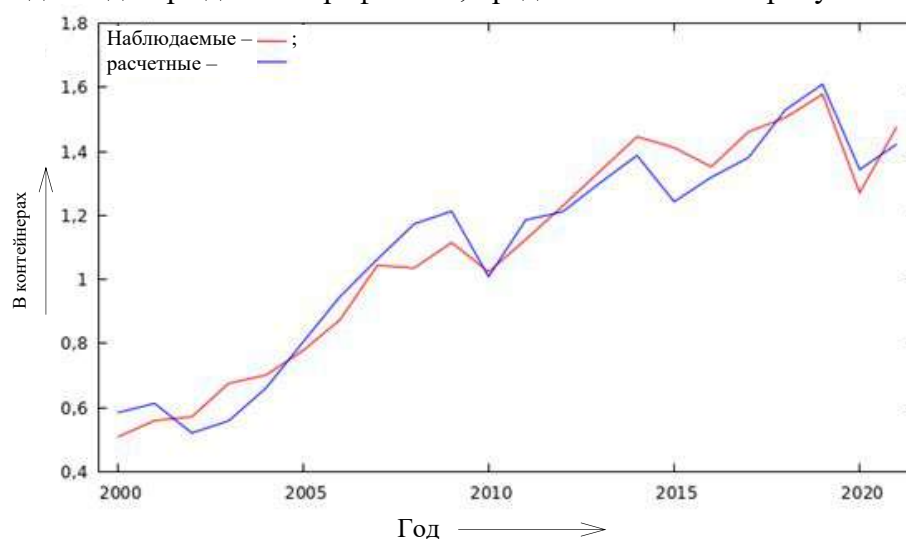


Рисунок 6 – Наблюдаемые и расчетные значения переменной kont

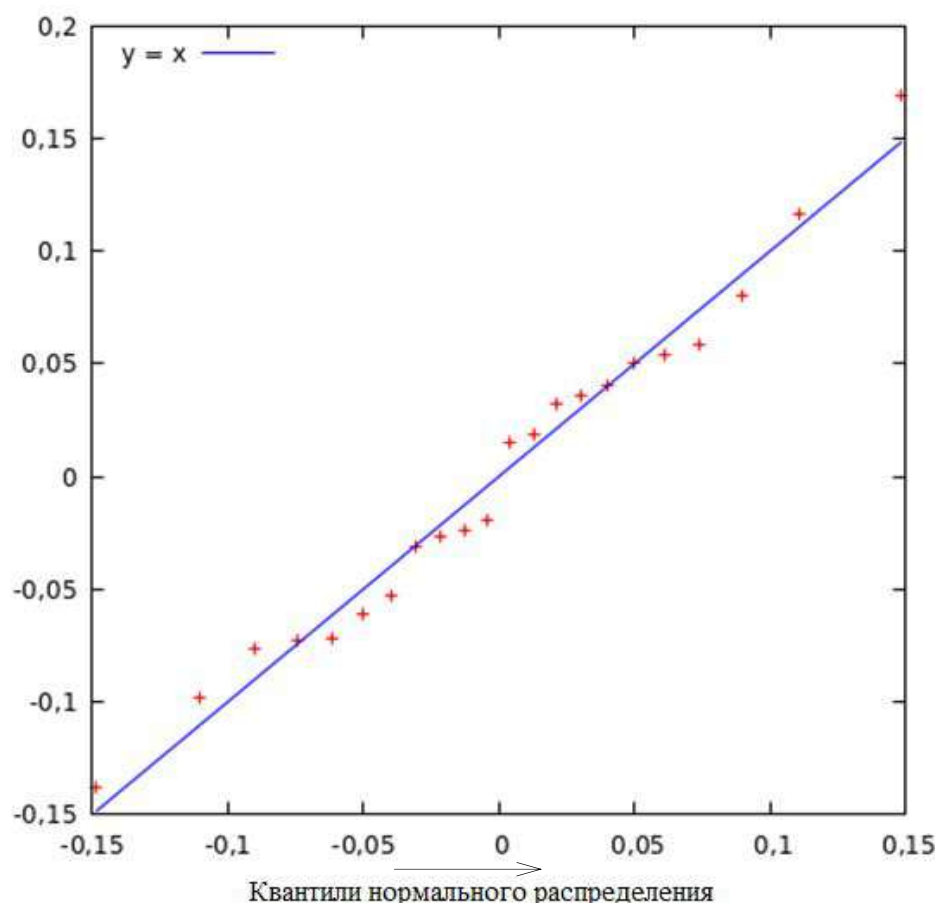


Рисунок 7 – Квантили нормального распределения (Q-Q график для $\hat{u}_{hat2}$)

Близость расчетной траектории к фактической на рисунке 6 и высокая кучность квантилей подтверждают вывод об эффективности модели.

Следовательно, регрессионное уравнение имеет вид:

$$\text{kont} = 1,201 + 0,0005 \cdot \text{av} - 0,0168 \cdot \text{dor} + 0,0012 \cdot \text{timp}. \quad (2)$$

Таким образом, возрастание контейнерных перевозок по железной дороге в составе блок-поездов (в миллионах тонн) значительно зависит от уменьшения длины дорог с твердым покрытием (в тысячах километров), зависит в средней степени от увеличения импортных транспортных услуг (в миллионах USD) и слабо зависит от увеличения грузоперевозок автомобильным транспортом (в миллионах тонн) [13 – 15].

Сегодня предприятия Узбекистана, осуществляющие грузоперевозки посредством железнодорожного транспорта, все больше обращают свое внимание на контейнерные перевозки в составе блок-поездов. На формирование такой тенденции оказывают влияние различные факторы. Проведенный корреляционный анализ показывает, что в последние годы контейнерные перевозки имеют тенденцию роста за счет повышения объемов экспортно-импортных грузов и других факторов, включая уменьшение длины дорог с твердым покрытием и увеличение грузоперевозок автомобильным транспортом (в миллионах тонн). Следовательно, для поддержания заданной тенденции и эффективной организации контейнерных перевозок требуется формирование соответствующей инфраструктуры на технологическом, коммерческом, техническом и организационном уровнях, что позволит существенно нарастить объемы контейнерных перевозок и даст толчок к развитию сопутствующих сфер и направлений. При этом необходимо учитывать также пропускную способность ключевых железнодорожных узлов, ограничения скорости движения блок-поездов, объемы грузопотоков и многие другие факторы.

Список литературы

1. Государственный комитет Республики Узбекистан по статистике : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://stat.uz/ru/ofitsialnaya-statistika/services> (дата обращения: 31.08.2022).
2. Mukhamedova Z.G. Modelling of fluctuations in the main bearing frame of railcar. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 2016, vol. VIII, no. 2, pp. 48-53.
3. Министерство транспорта Республики Узбекистан : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://mintrans.uz/ru/tarmoqlarning-xolati> (дата обращения: 31.08.2022).
4. Переслегина, Т. А. Основные направления развития железнодорожных маршрутов доставки грузов в контейнерах из Китая в Россию / Т. А. Переслегина, А. Д. Матяш. – Текст : непосредственный // Логистика – евразийский мост : материалы XIV междунар. науч.-практ. конф. / Красноярский гос. аграрный ун-т. – Красноярск, 2019. – Ч. 2. – С. 313–321.
5. Расулов, М. Х. О перспективах развития ускоренных контейнерных перевозок в Узбекистане / М. Х. Расулов, А. Ф. Исмагуллаев. – Текст : непосредственный // Инновационный транспорт. – 2021. – № 1 (39). – С. 50–54.
6. Рейтинг стран по ВВП в 2021 году. – Текст : электронный. – URL: <https://svspb.net/danmark/vvp-stran.php> (дата обращения: 31.08.2022).
7. Мухамедова, З. Г. К вопросу о развитии транспортной инфраструктуры Узбекистана / З. Г. Мухамедова, З. В. Эргашева. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 2 (46). – С.105–113.
8. Мухамедова, З. Г. Экономико-математическая модель контейнерного блок-трейна / З. Г. Мухамедова, З. В. Эргашева. – Текст : непосредственный // Технические науки. – 2021. – № 3. – С. 30–36.
9. Эргашева, З. В. Теоретические аспекты перевозок грузов в контейнерах / З. В. Эргашева. – Текст : непосредственный // Научно-технический журнал ФерПИ. – 2022. – Т. 26. – № 2. – С. 201–204.
10. Мухамедова, З. Г. Технологическая схема работы блок-трейнов / З. Г. Мухамедова, З. В. Эргашева, Э. А. Асатов. – Текст : непосредственный // Общественная безопасность. – 2021. – № 3. – С. 130–134.
11. Mukhamedova Z. Analysis and assessment of power efficiency of special self – propelled railway rolling stock. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*, 2020, 12(2), pp. 2808–2814.
12. Qobulov J.R., Mukhamedova Z.G., Barotov J.S. Regulation of departure time of freight wagons from stations and optimization of delivery time of freight wagons from stations: monografia pokonferencyjna (Barcelona, 29.04 – 30.04.2019). *Science, research, development*, 2019, no. 16, pp. 303-307.
13. Saidivaliev Sh.U., Ergasheva Z.V. Investigation of the influence of kinetic energy during the car motion along the hump retarder. *Universum: technical sciences*, 2020, no. 4 (73), pp. 17-25.
14. Саидвалиев, Ш. У. Вагоннинг саралаш тепалигининг тезлаштирадиган қиялиги бўйлаб сирпаниб тушиш динамикаси (Динамика скольжения вагона по скоростному уклону сортировочной горки) / Ш. У. Саидвалиев, З. В. Эргашева. – Текст : непосредственный // ТТЙМИ Ахбороти, 2019. – № 4. – С. 102-111.
15. Mukhamedova Z., Fayzibaev Sh., Ergasheva Z. Improving the Design Concepts of Equipment for the Assembly Platform of a Rail Service Car Considering Reliability Rates and Real State. *AIP Conference Proceedings*, 2022, 2432, 030052.

References

1. State Committee of the Republic of Uzbekistan on statistics. [web site]. Available at: <https://stat.uz/ru/ofitsialnaya-statistika/services> (accessed 31.08.2022).
2. Mukhamedova Z.G. Modelling of fluctuations in the main bearing frame of railcar. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 2016, vol. VIII, no. 2, pp. 48-53.
3. Ministry of Transport of the Republic of Uzbekistan. [web site]. Available at: <https://mintrans.uz/ru/tarmoqlarning-xolati> (accessed 31.08.2022).
4. Pereslegina T.A., Matyash A.D. The main directions of development of railway routes for the delivery of goods in containers from China to Russia. *Logistics – the Eurasian bridge: materials of the XIV International scientific and practical conference*. – Krasnoyarsk, 2019. – pp. 313-321 (In Russian).
5. Rasulov M.Kh., Ismatullaev A.F. On the prospects for the development of accelerated container transportation in Uzbekistan. *Innovative transport*, 2021, no. 1 (39), pp. 50-54 (In Russian).
6. Ranking of countries by GDP in 2021. [web site]. Available at: <https://svspb.net/danmark/vvp-stran.php> (accessed 31.08.2022).
7. Muhamedova Z.G., Ergasheva Z.V., Asatov E.A. On the development of transport infrastructure in Uzbekistan. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2021, no. 2 (46), pp. 105-114 (In Russian).
8. Mukhamedova Z.G., Ergasheva Z.V. Economic and mathematical model of a container block train. *Journal «Technical Sciences»*, 2021, no. 3, pp. 30-36 (In Russian).
9. Ergasheva Z.V. Theoretical aspects of cargo transportation in containers. *Scientific and technical journal FerPI*, 2022, vol. 26, no. 2, pp. 201-204.
10. Mukhamedova Z.G., Ergasheva Z.V., Asatov E.A. Technological scheme of block trains. *Scientific and practical journal «Public Security»*, 2021, no. 3, pp. 130-134.
11. Mukhamedova Z. Analysis and assessment of power efficiency of special self – propelled railway rolling stock. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*, 2020, 12(2), pp. 2808–2814.
12. Qobulov J.R., Mukhamedova Z.G., Barotov J.S. Regulation of departure time of freight wagons from stations and optimization of delivery time of freight wagons from stations: monografiya pokonferencyjna (Barcelona, 29.04 – 30.04.2019). *Science, research, development*, 2019, no. 16, pp. 303-307.
13. Saidivaliev Sh.U., Ergasheva Z.V. Investigation of the influence of kinetic energy during the car motion along the hump retarder. *Universum: technical sciences*, 2020, no. 4 (73), pp. 17-25.
14. Saidivaliev Sh.U., Ergasheva Z.V. Wagoning saralash tepaligining tezlashtiradigan qiyaligi b'yylab sirpanib tushish dinamashi, *TTYMI Akhboroti*, 2019, no. 4, pp. 102-111.
15. Mukhamedova Z., Fayzibaev Sh., Ergasheva Z. Improving the Design Concepts of Equipment for the Assembly Platform of a Rail Service Car Considering Reliability Rates and Real State. *AIP Conference Proceedings*, 2022, 2432, 030052.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мухамедова Зиёда Гафурджановна

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТУ).

Темирйўлчилар ул., д 1, г. Ташкент, Мирабадский район, 100067, Республика Узбекистан.

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

Тел.: +998(90)329-83-00.

E-mail: mziyoda@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mukhamedova Ziyoda Gafurdjanovna

Tashkent State of Transport University (TSTU).

Temiriylochilar st., 1, Tashkent, Mirabad district, 100167, the 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

Эргашева Захро Валижонова

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТУ).

Темирийлчилар ул., д 1, г. Ташкент, Мирабадский район, 100167, Республика Узбекистан.

Старший преподаватель кафедры «Транспортно-грузовые системы», ТГТУ.

Тел.: +998(97)716-23-22.

E-mail: zahro2@yandex.ru

Ergasheva Zakhro Valijonovna

Tashkent State of Transport University (TSTU).

Temiriyilchilar st., 1, Tashkent, Mirabad district, 100167, the Republic of Uzbekistan.

Senior lecturer of the department «Transport and cargo systems», TSTU.

Phone: +998(97)716-23-22.

E-mail: zahro2@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Мухамедова, З. Г. Факторы, влияющие на использование контейнерных блок-поездов в Узбекистане / З. Г. Мухамедова, З. В. Эргашева. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 1 (53). – С. 84 – 94.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Mukhamedova Z.G., Ergasheva Z.V. Factors affecting the use of container block trains in Uzbekistan. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 1 (53), pp. 84-94 (In Russian).

УДК 656.212.6.073.21

Б. А. Абдуллаев, Ф. С. Галимова, А. Б. Гайипов, Ш. Б. Джаббаров

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

ИННОВАЦИОННЫЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ АВТОНОМНОЙ ПЕРЕВОЗКИ СКОРОПОРТЯЩИХСЯ ГРУЗОВ

Аннотация. Перевозка скоропортящихся грузов – это особый вид перевозок, имеющий большую социальную значимость и оказывающий влияние на здоровье населения. Правильный выбор технологии перевозки и транспортного средства обеспечивает сохранение качества перевозимого скоропортящегося груза за счет соблюдения требуемых температурных режимов, что в свою очередь обеспечивает выполнение требований продовольственной безопасности. Данная статья посвящена разработке научно обоснованных рекомендаций по выбору новых систем охлаждения скоропортящихся грузов (СПГ) железнодорожным транспортом и параметров технологии, включая требования к специализированным транспортным средствам, соблюдение которых обеспечит условия для сохранения качества груза на протяжении всей перевозки. Предметом исследований является обеспечение возможности изменения состава газовой среды транспортных средств для перевозки скоропортящихся грузов за счет переоснащения. Целью работы является разработка принципов технологии автономной перевозки скоропортящихся пищевых продуктов, а именно обеспечение высоких теплотехнических параметров ограждающих конструкций транспортных средств; автономности работы установок во время перевозки СПГ при максимально простой и надежной реализации; достижение максимального КПД применяемого оборудования в части выработки тепловой энергии или энергии, затрачиваемой на охлаждение, при использовании неэнергоемких способов организации массообмена воздуха внутри грузового помещения. Посредством анализа и теоретических исследований была подтверждена возможность совместной работы газификатора и отопителя и скорректирована однолинейная схема подачи азота. За счет применения современных способов и устройств охлаждения (обогрева) гарантировано сокращение издержек при перевозке продуктов. Результатом работы является подтверждение возможности совместной работы газификатора и отопителя при реальных условиях перевозок плодовоовощной продукции на железнодорожном транспорте.

Ключевые слова: грузовое помещение, жидкий азот, автономная работа, газовая среда, перевозка, массовая доля кислорода.

Bakhrom A. Abdullaev, Farida S. Galimova, Aziz B. Gayipov, Shukhrat B. Jabbarov

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

INNOVATIVE BASES OF TECHNOLOGY OF AUTONOMOUS TRANSPORTATION OF PERISHABLE CARGO

Abstract. Transportation of perishable goods is a special type of transportation that has great social significance and has an impact on the health of the population. The correct choice of transportation technology and vehicle ensures the preservation of the quality of the transported perishable cargo due to compliance with the required temperature

conditions, which in turn ensures compliance with food safety requirements. This article is devoted to the development of scientifically sound recommendations for the selection of new cooling systems for perishable goods by rail and technology parameters, including requirements for specialized vehicles, compliance with which will provide conditions for maintaining the quality of cargo throughout the entire transportation. The subject of research is to ensure the possibility of changing the composition of the gas environment of vehicles for the transportation of perishable goods due to re-equipment. The aim of the work is to develop the principles of technology for autonomous transportation of perishable foodstuffs, namely, ensuring high thermal parameters of vehicle enclosing structures; autonomous operation of installations during LNG transportation with the simplest and most reliable implementation; achieving maximum efficiency of the equipment used in terms of generating thermal energy or energy spent on cooling when using non-energy-intensive methods organization of mass exchange of air inside the cargo area. Through analysis and theoretical studies, the possibility of joint operation of the gasifier and the heater was confirmed, the single-line nitrogen supply scheme was adjusted. Due to the use of modern methods and devices for cooling (heating), a reduction in costs for the transportation of products is guaranteed. The result of the work is confirmation of the possibility of joint operation of the gasifier and the heater under real conditions of transportation of fruit and vegetable products by rail.

Keywords: cargo space, liquid nitrogen, autonomous operation, gaseous environment, transportation, mass fraction of oxygen.

Сохранению качества перевозимых скоропортящихся грузов в условиях обедненной кислородом газовой среды посвящены многие исследования [1 – 3]. В них, в частности, предлагается доработать существующие транспортные средства (ТС) в части обеспечения возможности изменения состава газовой среды и ее поддержания или без такового. При этом ограничение поступления теплопритоков в грузовое помещение происходит посредством штатного холодильно-компрессорного оборудования рефрижераторных ТС.

К числу положительных качеств такого предложения можно отнести минимальную доработку существующих ТС под размещение оборудования. При таком подходе может обеспечиваться максимальная оперативность при замене или регулировке оборудования в процессе перевозки. Сроки доставки продукции могут соответствовать максимальным срокам перевозки СПГ в соответствии с Правилами перевозки СП. Но при этом оборудование требует оперативного контроля и присутствия механиков-проводников в составе секции, а также вагона сопровождения с дизель-генераторной установкой и вытекающими отсюда затратами.

При таком решении проблемы может улучшиться качество перевозимой продукции с одновременным увеличением затрат. Автономная работа ТС при такой постановке решения проблемы не рассматривается.

Разработанные в настоящее время малогабаритные дизель-генераторные и холодильно-отопительные установки, например, представленные в источнике [2], имеющие возможность устанавливаться как навесное оборудование к вагонам-термосам и расширяющие их возможности, при существующем положении с сохранностью оборудования на железных дорогах могут перемещаться только под специальным надзором. С другой стороны, обслуживание оборудования, продолжительность его автономной работы в широком диапазоне климатических факторов, отсутствие в нашей стране опыта в применении средств дистанционного контроля и управления, отсутствие наработок по совместной работе такого оборудования в составе устройств с регулируемой газовой средой остаются до сих пор не решенными.

Использование навесного оборудования на контейнерах для организации их одиночного перемещения в настоящее время рассматривается также в теоретическом плане ввиду больших удельных затрат на перевозку груза и низкого коэффициента полезного действия (КПД), в частности, отопительного оборудования, реализованного по классической схеме, когда дизель-генератор преобразует тепловую энергию топлива в электрическую, которая впоследствии посредством тепло-, электронагревателей (ТЭНов) преобразуется в тепловую, а равномерное распределение тепла по всему объему грузового помещения обеспечивается циркуляторами, производящими массообмен воздуха [4]. КПД при таком способе преобразования «тепла в тепло» не превышает 40 % от тепловой энергии исходного топлива.

Такое положение позволяет сформулировать задачи ближайшего будущего и экономической выгоды подобного решения лишь теоретически.

Одним из направлений повышения эффективности работы изотермического подвижного состава при перевозках скоропортящихся грузов является сокращение издержек [5 – 10].

Проблема имеет широкий спектр решения и, в том числе, подразумевает использование всего позитивного, что наработано в мире для хранения и перевозки СПГ и привязки подобных наработок к условиям перевозок [5]. К таким наработкам можно отнести следующее:

- накопление большого опыта производства качественных теплоизолирующих материалов и технологий для ограждающих конструкций ТС;

- исследование возможности расширения функций изотермических вагонов за счет появления навесного (съёмного) дизель-генераторного и холодильно-отопительного оборудования;

- создание экономичных автономных систем обогрева помещений;

- проведение работ по реализации возможности хранения и перевозки СПГ в азотной и регулируемой газовой среде;

- исследование возможности использования жидкоазотного охлаждения грузов;

- развитие радиоэлектронных систем дистанционного мониторинга, контроля и управления различными объектами.

Реализация всего перечисленного выше на практике позволит создать изотермические транспортные средства нового поколения – одиночные изотермические вагоны (контейнеры) грузоподъемностью 40 – 70 т, обладающие автономностью (в пределах сроков доставки грузов в соответствии с Правилами перевозки СПГ) как по запасу топлива, так и по применяемому оборудованию, а также возможностью воздействия на биохимические процессы в перевозимом грузе с целью повышения его сохранности при перевозке. При этом контроль за работой оборудования и управление режимами перевозки должны производиться дистанционно.

Техническое обслуживание предлагаемых конструкций ТС до, во время и после перевозки может производиться ограниченным составом механиков, имеющих возможность производить техническое обслуживание ТС как на стационарных, так и на передвижных пунктах технического обслуживания (ТО) [9, 10]. Срок автономной работы таких ТС должен достигать максимальных сроков доставки грузов в соответствии с Правилами перевозки СПГ.

Реализация предлагаемых конструкций ТС должна происходить с соблюдением следующих основных принципов:

- обеспечения высоких теплотехнических параметров ограждающих конструкций ТС;

- автономности работы установок во время перевозки СПГ при максимально простой и надежной реализации;

- достижения максимального КПД применяемого оборудования в части выработки тепловой энергии или энергии, затрачиваемой на охлаждение, при использовании неэнергоемких способов организации массообмена воздуха внутри грузового помещения;

- организация перевозочного процесса из расчета оперативного вмешательства в работу установок дистанционно при сбоях в работе автоматических программ, а при поломках в пути следования – непосредственно путем замены блоков, а также организация дозаправки расходным агентом с помощью мобильных пунктов ТО.

В работе использованы также методы исследования в соответствии с рекомендациями работ [9, 10].

Высокие теплотехнические параметры ограждающих конструкций ТС могут достигаться при применении современных теплоизолирующих материалов и технологий их использования [8]. В частности, в последнее время очень эффективными теплоизоляторами являются панели типа «сэндвич» на основе пенополиуретана. При этом для нового ТС реально достигим коэффициент теплопередачи порядка $0,2 \text{ Вт/(К}\cdot\text{м}^2)$ при высокой плотности ограждающих конструкций (порядка $18 \text{ м}^3/\text{ч}$ при избыточном давлении 50 Па) (рисунок 1). В настоящее

время отработаны технологические приемы и накоплен огромный опыт производства такого рода ограждающих конструкций.

Повышение КПД при выработке тепловой энергии может быть достигнуто при непосредственном использовании тепла, образующегося при сгорании дизельного топлива без организации промежуточных преобразований энергии. При подаче тепла в нижнюю (наиболее холодную) часть помещения надобность в циркуляторах исчезает вовсе при достижении приемлемой равномерности температурного поля в объеме вагона.

Установки, использующие для выработки тепловой энергии прямое преобразование, в настоящее время выпускаются серийно, сертифицированы в нашей стране в качестве источников автономного отопления, имеют малые габариты и вес. Например, в отопителе на дизельном топливе для выработки порядка 10 кВт·ч теплового потока требуется 1,2 л топлива, его габариты не превышают 360 × 230 × 130 мм при весе 7 кг, питание осуществляется от аккумуляторной батареи напряжением 12 или 24 В, потребляемая мощность – 28 – 138 Вт в зависимости от вырабатываемого теплового потока.



Рисунок 1 – Транспортное средство, оборудованное ограждающими конструкциями из рекомендуемых теплоизолирующих материалов [7]: 1 – расположение напольных решеток; 2 – пол грузового помещения ТС

Многолетний опыт применения подобных отопителей в качестве автономных источников обогрева различных, в том числе и пожароопасных объектов, позволяет сделать вывод о возможности применения подобных устройств для подогрева грузовых помещений в изотермических ТС на железных дорогах Республики Узбекистан. Автономность работы таких отопителей определяется емкостью аккумуляторных батарей и запасом топлива.

Другой немаловажной частью перевозки СПГ являются обеспечение состава газовой среды и борьба с теплопритоками в грузовом помещении ТС при перевозках плодоовощной, мороженой и охлажденной продукции в летний, переходные и зимний периоды. При этом проблемной остается возможность обеспечения автономной работы ТС для сокращения издержек при перевозке с максимальным сохранением качества перевозимой продукции.

Исследование технологии сохранности пищевых продуктов при перевозке в условиях положительных наружных температур. Сохранению качества перевозимых СПГ в условиях обедненной кислородом газовой среды, по нашему мнению, может способствовать создание новых систем охлаждения (например, с помощью жидкого азота), позволяющих

осуществить снижение массовой доли кислорода в грузовом помещении, которое происходит автоматически при работе установки (рисунок 2).

Здесь изначально ставится вопрос об автономности работы ТС и времени его автономной работы, так как обеспечение снижения массовой доли кислорода в грузовом помещении происходит одновременно с работой установки на охлаждение. Очевидно, что для грузов, требующих точного поддержания состава газовой среды, такой способ в первом приближении не применим. Однако существует много СПГ (в частности, охлажденные и мороженые грузы), для которых точное процентное содержание кислорода не принципиально, а главным является его минимум, как и минимум затрат при перевозке. При этом в соответствии с Правилами перевозки СПГ при перевозке грузов с температурой ниже $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ допускается их неограниченное охлаждение, вследствие чего требования точного поддержания отрицательной температуры приобретают характер «не выше...», что существенно упрощает процесс регулирования температуры при перевозке.

При создании подобных систем главный упор сделан на максимальное упрощение конструкции и отсутствие (то есть сведение к минимуму) промежуточных устройств, влияющих на выдачу хладагента в грузовое помещение и высокую надежность оборудования.



Рисунок 2 – Грузовое помещение с новой системой охлаждения (например, посредством жидкого азота):

1 – расположение азотной магистрали для подачи жидкого азота; 2 – пол

К такому оборудованию можно отнести сертифицированную для работы в составе транспортных средств (в том числе в железнодорожных вагонах) установку подачи жидкого азота УПА1-0,05 (рисунок 3), обеспечивающую выдачу жидкого азота в диапазоне от 3 до 100 кг/ч в автономном режиме, имеющую многоуровневую защиту и алгоритм работы, описываемый словами «открыл кран и забыл».

Надежность применяемых в указанной установке элементов проверена многолетним опытом эксплуатации в составе криогенных изделий различного назначения. Автономность работы установки определяется объемом применяемых криогенных сосудов и требуемым расходом жидкого азота. Объем криогенных сосудов, в свою очередь, зависит от геометрических размеров ТС, его грузоподъемности, а все вместе взятое определяет период автономной работы ТС без дозаправки. При организации пунктов дозаправки в пути следования возможно увеличение сроков доставки до сколь угодно больших.

Применение указанных установок осуществлялось в ООО «СВБ» с 2003 г. при опытных перевозках скоропортящейся продукции с интервалом между дозаправками от 5 до 28 суток при различных емкостях и вариантах перевозки.



Рисунок 3 – Установка УПА1-0,05 для подачи жидкого азота в грузовое помещение ТС

Существенным моментом при применении подобных установок является наличие свободного пространства в ТС для размещения криогенных емкостей, что практически целиком определяет запас их автономности. Поэтому наиболее эффективно применение подобных установок на большегрузных ТС (50 – 70 тс) для организации длительных бездозаправочных рейсов.

Экономическая эффективность применения жидкого азота, выявленная в результате перевозок, обусловлена низкой ценой криопродукта (порядка в 1,5 – 2,8 раза ниже стоимости дизельного топлива в разных регионах), исключением затрат на вагон сопровождения и бригаду механиков, следующих с грузом, что при осуществлении указанных перевозок в летние периоды 2003 – 2006 гг. привело к сокращению совокупных издержек в 1,1 – 1,6 раза (при температуре наружного воздуха во время перевозок от +35 °С до –20 °С).

С другой стороны, точное поддержание массовой доли кислорода в составе газовой среды грузового помещения, требуемое для большей части прежде всего свежей плодоовощной скоропортящейся продукции, должно происходить при перевозках не только в летний период, но также в переходный и зимний периоды.

В условиях, например, автономного жидкоазотного охлаждения трудно обеспечить одновременное поддержание заданного количества кислорода и требуемой температуры в летний период, особенно при максимальных наружных температурах, так как отключение установки для естественного повышения уровня кислорода внутри грузового помещения за счет его притоков извне автоматически приводит к повышению температуры в грузовом помещении. Поэтому при таком способе охлаждения вполне допустима перевозка в летний период с требованием к массовой доле кислорода «не более...», что вполне реализуемо. При понижении наружных температур и снижении требований по интенсивности охлаждения обеспечение заданного уровня кислорода становится более достижимой задачей.

Исследование технологии сохранности пищевых продуктов при перевозке в условиях отрицательных наружных температур. В условиях отрицательных наружных температур поддержание заданного уровня кислорода при азотном газифицировании грузового помещения в нашей стране не применялось. Тем не менее попытка совмещения

азотного газифицирования и обогрева грузового помещения вагона модели 15Т56, оборудованного установками УПА1-0,05 и HIDRONIC 10 (см. пол грузового помещения, показанного на рисунках 1 и 2), была предпринята в зимние периоды 2016 – 2017 гг. в стационарных условиях совместно СГУПСом (Сибирский государственный университет путей сообщения) и ООО «СВБ» г. Новосибирска.

Для исследования был взят вагон модели 15Т56, оборудованный установками УПА1-0,05 и HIDRONIC 10, оснащенный системой дистанционного мониторинга и управления работой указанных устройств.

Среди контролируемых и дистанционно управляемых параметров находились следующие параметры: температура в грузовом помещении, массовая доля кислорода в газовой среде и давление в криогенном сосуде. При этом технология работы строится на непрерывности подачи фиксированного по расходу в единицу времени количеству жидкого азота и регулировании температуры посредством включения отопителя. Регулировка массовой доли кислорода осуществлялась изменением давления в криогенном сосуде или отключением подачи азота. Совместная работа оборудования происходила при порожнем вагоне и при имитации груза. Основными критериями являлись обеспечение равномерности температурного поля и однородности газового состава во всем объеме грузового помещения. Работа всей системы контролировалась и управлялась дистанционно из диспетчерского пункта.

Отработка технологии перевозки СПГ, требующих подогрева грузового помещения вагона или его охлаждения, а также совместной работы такого оборудования происходила при одновременной проверке надежности штатного оборудования установок для обеспечения GSM-связи (Global System for Mobile Communications) с подвижным ТС. В условиях интенсивного распространения такой связи по всей территории РФ количество «дыр» и, соответственно, мест отсутствия или плохой связи к весне 2007 г. по пути движения поездов в европейской части РФ практически равно нулю, в зоне Урала, Сибири, Забайкалья и Дальнего Востока такая связь имеется только на перегонах в местах, удаленных от населенных пунктов. Практически все железнодорожные станции покрыты сетью GSM-связи. По реальным измерениям время нахождения движущегося поезда вне зоны связи, на самой сложной в этом отношении Забайкальской железной дороге не превысило двух часов.

Технология работы электроники вагонов рассчитана на автономный режим, запись параметров производится автоматически каждые два часа во внутреннюю память контроллера, внешнее управление режимами производится только в случае их коррекции или сбоев работы электроники (что, кстати, случилось один раз при первом «прогоне» автоматики по Забайкальской дороге), поэтому наличие подобных «дыр» не может существенным образом повлиять на обеспечение качества перевозки СПГ.

Существующие в настоящее время нормы на перевозку СПГ без поддержания режима в минимальном исчислении составляют порядка пяти суток. Поэтому в случае невозможности дистанционно откорректировать работу электроники или при выходе ее из строя этого времени вполне достаточно для того, чтобы либо ТС прибыло на любую техническую или сортировочную станцию, где его можно отцепить, либо к месту, где произошел отказ оборудования, прибыла бригада механиков. При этом высокие теплотехнические параметры теплоизоляции позволяют обеспечить сохранность груза на время ремонта и технического обслуживания ТС.

Работа таких ТС может предполагать принцип совмещенной перевозки (режим «поддержания» – режим «термос»). В этом случае потребность в обслуживающих бригадах на любых участках от станции отправления до станции назначения даже при максимальных сроках перевозки будет исключена вовсе либо будет сведена к минимуму в любое время года.

По результатам исследований были сделаны следующие выводы:

была подтверждена возможность совместной работы газификатора и отопителя и скорректирована однолинейная схема подачи азота;

реализация технологии совместной работы установок при реальных условиях перевозки плодовоовощной продукции позволила существенно сократить издержки при повышении качества перевозки СПГ в условиях автономной работы ТС и прежде всего в зимний период.

Сокращение издержек при перевозке СПГ за счет применения современных способов и устройств охлаждения (обогрева) может решаться как частично (путем применения отдельных установок, имеющих высокий КПД преобразования энергии, в частности, малогабаритных отопителей прямого преобразования тепловой энергии) в составе рефрижераторных или доработанных изотермических ТС, так и комплексно в части решения укрупненных задач перевозки разноплановых СПГ путем создания автономных ТС с использованием установок, в том числе и на не машинных способах охлаждения (создания требуемой газовой среды в грузовом помещении ТС) и отработанных принципах и технологиях перевозки.

Список литературы

1. Ткачев, И. В. Организация работы железнодорожного хладотранспорта России в условиях перехода к рыночной экономике: специальность 05.22.08 «Управление процессами перевозок» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ткачев Игорь Валентинович ; Московский гос. ун-т путей сообщения. – Москва, 2002. – 189 с. – Текст : непосредственный.
2. Дюбко, А. П. Совершенствование эксплуатации автономных рефрижераторных вагонов : специальность 05.22.08 «Управление процессами перевозок» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Дюбко Александр Петрович ; Московский гос. ун-т путей сообщения. – Москва, 1976. – 218 с. – Текст : непосредственный.
3. Патент № 74193 Российская Федерация, МПК F25D 13/00 (2006.01). Холодильная камера для хранения скоропортящихся продуктов : № 2007149067/22 : заявлено 25.12.2007 : опубликовано 20.06.2008 / Ерьско Н. Н. – 5 с. – Текст : непосредственный.
4. Абдуллаев, Б. А. Выбор направлений и основных технических решений подвижного состава для перевозки скоропортящихся грузов в условиях Республики Узбекистан / Б. А. Абдуллаев, Р. В. Рахимов : монография. – Ташкент : O'zbekiston, 2022. – 128 с. – Текст : непосредственный.
5. Абдуллаев, Б. А. Оценка тепловых ограждений кузова изотермического подвижного состава / Б. А. Абдуллаев, Ю. П. Бороненко, Х. А. Рахматов. – Текст : непосредственный // Железнодорожный подвижной состав: проблемы, решения, перспективы : материалы междунар. науч.-техн. конф. / Ташкентский гос. трансп. ун-т. – Ташкент, 2022. – С. 3–9.
6. Файзибаев, Ш. С. Анализ и перспективы развития перевозок скоропортящихся грузов в Республике Узбекистан / Ш. С. Файзибаев, Б. А. Абдуллаев. – Текст : непосредственный // Вестник транспорта Поволжья. – 2019. – № 3 (75). – С. 63–69.
7. Abdullaev B.A., Galimova F.S., Otajonov Kh.Kh., Sultonaliev D.D., Abdurakhmonov P.K., Abdirakhmanov J.A. Influence of solar radiation on heat flows of refrigerated wagons and containers. *The 1st International Conference on Problems and Perspectives of Modern Science AIP Conference Proceedings*, 2022, pp. 030005-1–030005-5.
8. Rakhimov R.V., Abdullaev B.A., Hurmatov Ya.A., Haydarov O.U., Inoyatov K.Kh. Analysis and prospects for the development of performance cargo transportation in the Republic of Uzbekistan. *The 1st International Conference on Problems and Perspectives of Modern Science AIP Conference Proceedings*, 2022, pp. 030066-1–030066-6.
9. Бороненко, Ю. П. Экспериментальные исследования новых конструктивных решений ограждения кузовов рефрижераторных вагонов и контейнеров / Ю. П. Бороненко, Б. А. Абдуллаев. – Текст : непосредственный // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2020. – Т. 17. – Вып. 4. – С. 498–513.
10. Абдуллаев, Б. А. Методика проведения экспериментальных исследований для определения коэффициентов теплопередачи ограждения кузовов рефрижераторных вагонов и контейнеров / Б. А. Абдуллаев, К. Х. Иноят, О. У. Хайдаров. – Текст : непосредственный //

Проблемы безопасности на транспорте : материалы междунар. науч.-практ. конф. в 2 ч. / Белорусский гос. ун-т транспорта. – Гомель, 2021. – С. 85–86.

References

1. Tkachev I.V. Organizatsiya raboti jeleznodorojnogo xladotransporta Rossii v usloviyax perexoda k rinochnoy ekonomike (Organization of the work of railway cold transport in Russia in the conditions of transition to a market economy). Doctor's thesis, Moscow, MIIT, 2002, 159 p. (In Russian).
2. Dyubko A.P. Pravila perevozok грузов na jeleznodorojnom transporte (Improving the operation of autonomous refrigerator cars). Doctor's thesis, Moscow, VNIIZhT, 1977, 150 p. (In Russian).
3. Eresko N.N. *Patent RU 74193*, 20.06.2008.
4. Abdullaev B.A., Rakhimov R.V. *Vibor napravleniy i osnovnix texnicheskix resheniy podviynogo sostava dlya perevozki skoroportyaschixsya грузов v usloviyax Respubliki Uzbekistan: Monografiya* [Selection of directions and main technical solutions of rolling stock for the transportation of perishable goods in the conditions of the Republic of Uzbekistan: Monograph]. Tashkent, 2022, 128 p.
5. Abdullaev B.A., Boronenko Yu.P., Rakhmatov Kh.A. Estimation of thermal protections of the body of isothermal rolling stock [Otsenka teplovix ograjdeniy kuzova izotermicheskogo podviynogo sostava]. Materiali I Mejdunar. nauch.-texnich. konferensii «Jeleznodorojniy podviynoy sostav: problemi, resheniya, perspektivi» – *Proceedings of the I Intern. scientific and technical conference "Railway rolling stock: problems, solutions, prospects"*, 2022, pp. 3-9.
6. Faizibaev Sh.S., Abdullaev B.A. Analysis and prospects for the development of transportation of perishable goods in the Republic of Uzbekistan [Analiz i perspektivi razvitiya perevozok skoroportyaschixsya грузов v Respublike Uzbekistan]. *Vestnik transporta Povoljya – Bulletin of transport of the Volga region*, 2019, no. 3 (75), pp. 63-69 (In Russian).
7. Abdullaev B.A., Galimova F.S., Otajonov Kh.Kh., Sultonaliev D.D., Abdurakhmonov P.K., Abdirakhmanov J.A. Influence of solar radiation on heat flows of refrigerated wagons and containers. *The 1st International Conference on Problems and Perspectives of Modern Science AIP Conference Proceedings*, 2022, pp. 030005-1 – 030005-5.
8. Rakhimov R.V., Abdullaev B.A., Hurmatov Ya.A., Haydarov O.U., Inoyatov K.Kh. Analysis and prospects for the development of performance cargo transportation in the Republic of Uzbekistan. *The 1st International Conference on Problems and Perspectives of Modern Science AIP Conference Proceedings*, 2022, pp. 030066-1–030066-6.
9. Boronenko Yu.P., Abdullaev B.A. Experimental studies of new constructive solutions for fencing the bodies of refrigerator cars and containers. *Proceedings of Petersburg transport university*, 2020, pp. 498-513 (In Russian).
10. Abdullaev B.A., Inoyatov K.Kh., Khaydarov O.U. Methodology for conducting experimental studies to determine the heat transfer coefficients of the body enclosures for refrigerated wagons and containers. *Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference "Issues of Security in Transport"*, Part 1, 2021, pp. 85-86.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Абдуллаев Бахром Актамович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

Железнодорожников ул., д. 1, г. Ташкент, 100167, Республика Узбекистан.

Кандидат технических наук, и. о. доцента кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ТГТрУ.

Тел.: +99890 372-14-80.

E-mail: baxrom@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Abdullaev Bakhrom Aktamovich

Tashkent State Transport University (TSTU).

1, Zheleznodorozhnikov st., Tashkent, 100167, Uzbekistan.

Ph. D. in Engineering, acting associate professor of the department «Wagons and wagon facilities», TSTU.

Phone: +99890 372-14-80.

E-mail: baxrom@yandex.ru

Галимова Фарида Салаватовна

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

Железнодорожников ул., д. 1, г. Ташкент, 100167, Республика Узбекистан.

Ассистент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ТГТрУ.

Тел.: +99890 317-12-89.

E-mail: Farida.galimova.2020@inbox.ru

Galimova Farida Salavatovna

Tashkent State Transport University (TSTU).

1, Zheleznodorozhnikov st., Tashkent, 100167, Uzbekistan.

Assistant of the department «Wagons and wagon facilities», TSTU.

Phone: +99890 317-12-89.

E-mail: Farida.galimova.2020@inbox.ru

Гайипов Азиз Бахромович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

Железнодорожников ул., д. 1, г. Ташкент, 100167, Республика Узбекистан.

Кандидат технических наук, и. о. доцента кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ТГТрУ.

Тел.: +99890 807-25-89.

E-mail: AzizG89@yandex.ru

Gayipov Aziz Bakhromovich

Tashkent State Transport University (TSTU).

1, Zheleznodorozhnikov st., Tashkent, 100167, Uzbekistan.

Ph. D. in Engineering, acting associate professor of the department «Wagons and wagon facilities», TSTU.

Phone: +99890 807-25-89.

E-mail: AzizG89@yandex.ru

Джаббаров Шухрат Батирович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

Железнодорожников ул., д. 1, г. Ташкент, 100167, Республика Узбекистан.

Кандидат технических наук, и. о. доцента кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ТГТрУ.

Тел.: +99893 535-72-27.

E-mail: shuhratassistant@gmail.com

Djabbarov Shukhrat Batirovich

Tashkent State Transport University (TSTU).

1, Zheleznodorozhnikov st., Tashkent, 100167, Uzbekistan.

Ph. D. in Engineering, acting associate professor of the department «Wagons and wagon facilities», TSTU.

Phone: +99893 535-72-27.

E-mail: shuhratassistant@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Инновационные основы технологии автономной перевозки скоропортящихся грузов / Б. А. Абдуллаев, Ф. С. Галимова, А. Б. Гайипов, Ш. Б. Джаббаров. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 1 (53). – С. 94 – 103.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Abdullaev B.A., Galimova F.S., Gayipov A.B., Djabbarov Sh.B. Innovative bases of technology of autonomous transportation of perishable cargo. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 1 (53), pp. 94-103 (In Russian).

УДК 621.6.03

Е. Н. Слободина, А. Г. Михайлов, Е. А. Гасс

Омский государственный технический университет (ОмГТУ), г. Омск, Российская Федерация

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА КИПЕНИЯ НАНОЖИДКОСТИ

Аннотация. В настоящее время создание новых теплоносителей для повышения энергоэффективности теплоэнергетических установок является актуальным. В качестве новых теплоносителей можно рассмотреть применение наножидкостей. Наножидкость создают путем добавления наночастиц в базовую жидкость. Использование в качестве теплоносителей полученных подобным образом наножидкостей способствует эффективному увеличению критического теплового потока, тем самым интенсифицируя процессы парообразования. В качестве материалов наночастиц наибольшее применение находят чистые металлы, оксиды и углерод. В качестве базовых жидкостей применяют воду, различные высококипящие теплоносители. Многообразие результатов экспериментальных исследований, освещенных в научной литературе, и их противоречивость не раскрывают в полном объеме особенностей теплообмена при процессе пузырькового кипения в наножидкостях. Механизм процесса теплообмена при пузырьковом кипении наножидкостей на основе опытных данных широко представлен в работе авторов Yu, Kandlikar, Liao для воды с добавлением наночастиц на основе оксидов металлов с различными значениями объемных концентраций. В настоящее время исследования характеристик теплообмена проводятся на различных поверхностях нагрева, целью которых является интенсификация процесса теплообмена при кипении. Установлено, что при добавлении наночастиц в базовую

жидкость фиксируют рост критического теплового потока, значительные положительные эффекты наблюдаются в жидкостях при малых концентрациях наночастиц. В данной статье представлено описание стенда для проведения экспериментальных исследований процессов кипения наножидкостей с целью создания новых теплоносителей для использования в теплоэнергетических установках. Стенд разработан и спроектирован на кафедре «Теплоэнергетика» Омского государственного технического университета.

Ключевые слова: наножидкость, кипение, теплообмен, критический тепловой поток, краевой угол смачивания.

Ekaterina N. Slobodina, Andrey G. Mikhailov, Evgeniy A. Gass

Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk, the Russian Federation

EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL STUDIES OF THE NANOFLUIDIC BOILING PROCESS

Abstract. Creation of new heat carriers to improve the energy efficiency of thermal power units currently is relevant. The use of nanofluids can be considered as a new heat carriers. Nanofluid is created by adding nanoparticles to the base liquid. The use of nanofluids obtained in this way as heat carriers contributes to an effective increase in the critical heat flow, thereby enhancing the evaporation processes. Pure metals, oxides and carbon are the most widely used materials for nanoparticles. Water and various high-boiling heat carriers are used as base fluids. The variety of experimental research results covered in the scientific literature and their inconsistency do not fully reveal the features of heat transfer during the bubble boiling process in nanofluids. The nanofluids boiling heat exchange mechanism is widely presented in the works of the authors Yu, Kandlikar, Liao for water with the metal oxides nanoparticles for variable volume concentrations. Currently, studies of heat and mass transfer characteristics are carried out on various heating surfaces, the purpose of which is to intensify the heat exchange process during boiling. It is established that when nanoparticles are added to the base liquid, an increase in the critical heat flux is recorded, significant positive effects are observed in liquids at low concentrations of nanoparticles. The article presents a description of experimental equipment for conducting studies of nanofluidic boiling processes in order to create new heat carriers for use in thermal power plants. Experimental equipment was developed and designed at the Department of Heat Power Engineering of Omsk State Technical University.

Keywords: nanofluids, boiling, heat transfer, critical heat flux, contact angle.

В настоящее время создание новых теплоносителей для повышения энергоэффективности теплоэнергетических установок является актуальным. Добавление наночастиц в базовую жидкость является эффективным методом увеличения критического теплового потока для интенсификации процессов парообразования. Полученные в данном случае суспензии являются наножидкостями. В качестве материалов наночастиц прежде всего используют чистые металлы, оксиды, углерод. Для формирования базовой жидкости применяют воду, различные высококипящие теплоносители [1].

В научной литературе приведены результаты экспериментальных исследований процессов пузырькового кипения в наножидкостях различных авторов, которые значительно различаются [2, 3].

Механизм процесса теплообмена при пузырьковом кипении наножидкостей на основе опытных данных широко представлен в работе авторов Yu, Kandlikar, Liao для воды с добавлением наночастиц на основе Al_2O_3 , SiO_2 , CuO размером 10 – 60 нм, объемной концентрацией 0,008 – 4 % [3].

В настоящее время исследования характеристик теплообмена проводятся на различных поверхностях нагрева, целью которых является интенсификация процесса теплообмена при кипении [2, 3]. Установлено, что при добавлении наночастиц в базовую жидкость фиксируют рост критического теплового потока, значительные положительные эффекты наблюдаются в жидкостях при малых концентрациях наночастиц.

На кафедре «Теплоэнергетика» ОмГТУ проводятся экспериментальные исследования процессов кипения наножидкостей, целью которых является создание новых теплоносителей для использования в теплоэнергетических установках.

На первом этапе получена наножидкость в виде коллоидной суспензии, состоящей из базовой жидкости – дистиллированной воды и добавочных наночастиц – SiO_2 (диоксид кремния). Размер частиц (эффективный диаметр) определяется интервалом 10 – 50 нм.

Важной задачей при создании теплоносителя является обеспечение стабильности теплофизических характеристик исследуемой суспензии. С этой целью в жидкость добавляются поверхностно-активные вещества и оказывается воздействие ультразвуком. Концентрация наночастиц в жидкости не превышает 1 %.

К факторам, оказывающим влияние на особенности тепломассообмена при кипении наножидкости, относятся величина критического теплового потока, температурный напор, давление, геометрические характеристики, габариты, расположение погруженных поверхностей теплообмена в объеме и физические свойства самой жидкости [4, 5]. Эти факторы учитывались при создании экспериментального стенда для изучения процессов тепломассообмена при кипении наножидкости, схема стенда представлена на рисунке 1.

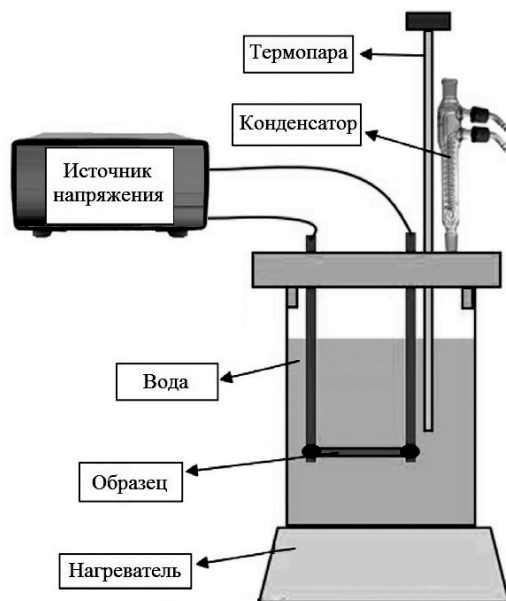


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

Опытная нагреваемая медная трубка (образец) помещается внутри сосуда с наножидкостью. Внутри трубки располагается нагревательный элемент, соединенный с трансформатором, с целью регулирования теплового потока. При выполнении экспериментальных исследований температура наножидкости и поверхности нагрева измерялась хромель-копелевыми термопарами.

Экспериментальные исследования проводились в два этапа при атмосферном давлении.

На первом этапе изучались процессы теплообмена при кипении в дистиллированной воде, на втором этапе изучались процессы теплообмена при кипении наножидкости. Реализация двух этапов происходила с анализом чистоты поверхности нагревателя с помощью металлографического микроскопа (рисунок 2).

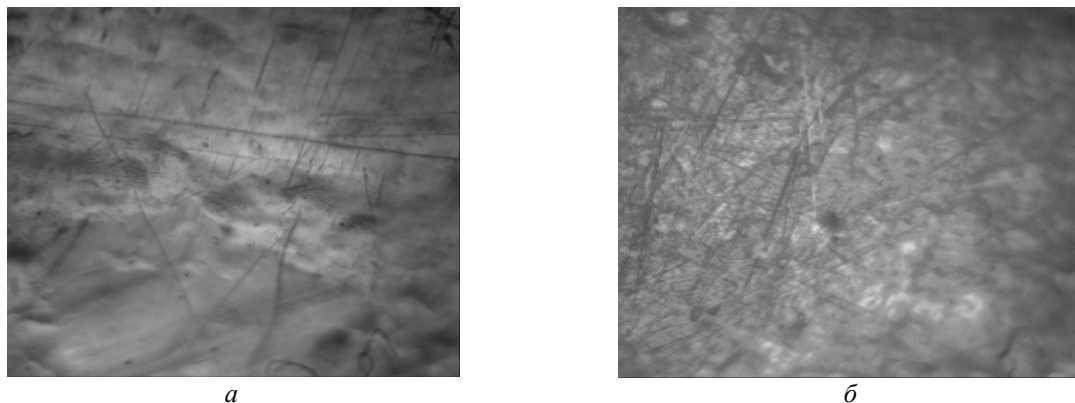


Рисунок 2 – Образцы теплообменной поверхности до (а) и после (б) нагрева

При оценке качества нагреваемой поверхности с использованием металлографического микроскопа определено формирование пористого слоя на нагретой поверхности при кипении наножидкостей. С учетом литературных данных предполагается образование данного слоя за счет осаждения определенного количества наночастиц на поверхности нагревателя. Образование пористого слоя изменяет величину шероховатости и смачиваемости поверхности, что в целом приводит к увеличению критического теплового потока.

По результатам проведенного эксперимента зафиксировано увеличение значения относительного критического теплового потока для наножидкостей по сравнению с дистиллированной водой до 80 % при различных концентрациях наночастиц в жидкости (рисунок 3).

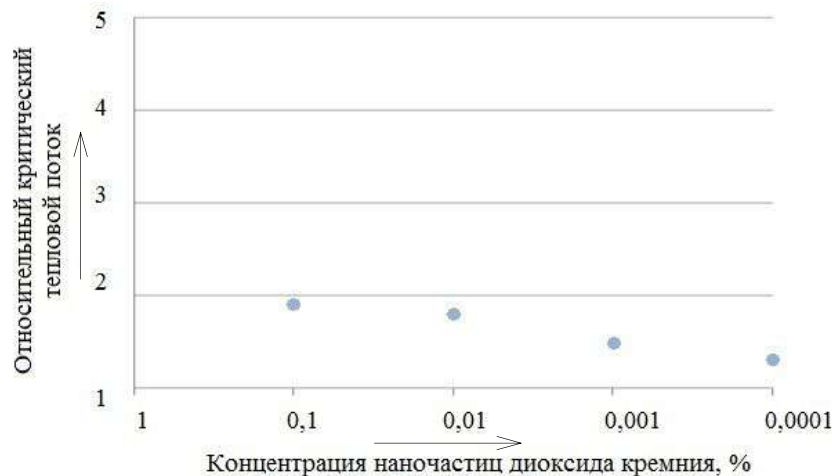


Рисунок 3 – Зависимость относительного критического теплового потока от концентрации наночастиц диоксида кремния

На величину критического теплового потока при кипении наножидкости в условиях естественной конвекции влияют теплофизические свойства жидкости, давление, качество теплообменной поверхности и наличие в объеме наножидкости поверхностно-активных веществ.

При кипении могут возникать кризисы – процессы, связанные с коренным изменением механизма и интенсивности теплообмена.

Расчетная зависимость для определения критического теплового потока, характеризующего переход от пузырькового режима кипения к пленочному, предложена автором Zuber [4]:

$$q''_{CHF} = K \rho_g h_{fg} \left[\frac{g \sigma (\rho_f - \rho_g)}{\rho_g^2} \right]^{\frac{1}{4}}, \quad (1)$$

где K – коэффициент корреляции, зависит от геометрии поверхности нагрева;

h_{fg} – скрытая теплота парообразования;

g – ускорение свободного падения;

σ – коэффициент поверхностного натяжения;

ρ_g, ρ_f – плотности пара и жидкости соответственно.

В расчетной зависимости (1) на величину критического теплового потока при кипении жидкости учитывается влияние только свойств жидкости и не показана степень влияния характеристик теплообменной поверхности, смачиваемость и характеристик поверхности, также оказывающих влияния на критический тепловой поток.

Влияние смачиваемости и расположения теплообменной поверхности в пространстве на величину критического теплового потока учитывается в расчетной зависимости Kandlikar [4]:

$$q''_{CHF} = \rho_g^{\frac{1}{2}} h_{fg} \left(\frac{1 + \cos \beta}{16} \right) \cdot \left[\frac{2}{\pi} + \frac{\pi}{4} (1 + \cos \beta) \cos \varphi \right]^{\frac{1}{2}} \cdot [g \sigma (\rho_f - \rho_g)]^{\frac{1}{4}}, \quad (2)$$

где β – краевой угол кипения;

φ – угол между плоскостью поверхности нагрева и линией горизонта.

Корреляция выражения (1) предложена Liao [4] с учетом эффекта ориентации поверхности нагрева и краевого угла кипения:

$$q''_{CHF} = K \left[1 + \frac{55 - \theta}{100} (0,56) \right] \rho_g h_{fg} \left[\frac{g \sigma (\rho_f - \rho_g)}{\rho_g^2} \right]^{\frac{1}{4}}, \quad (3)$$

где θ – краевой угол кипения;

K – коэффициент корреляции, зависит от геометрии поверхности нагрева.

Сравнение между результатами расчетных исследований с использованием предложенных методик (1) – (3) для критического теплового потока в зависимости от угла контакта приведено на рисунке 4.

На рисунке 5 отображена зависимость относительного критического теплового потока от концентрации наночастиц диоксида кремния для экспериментальных и расчетных данных.

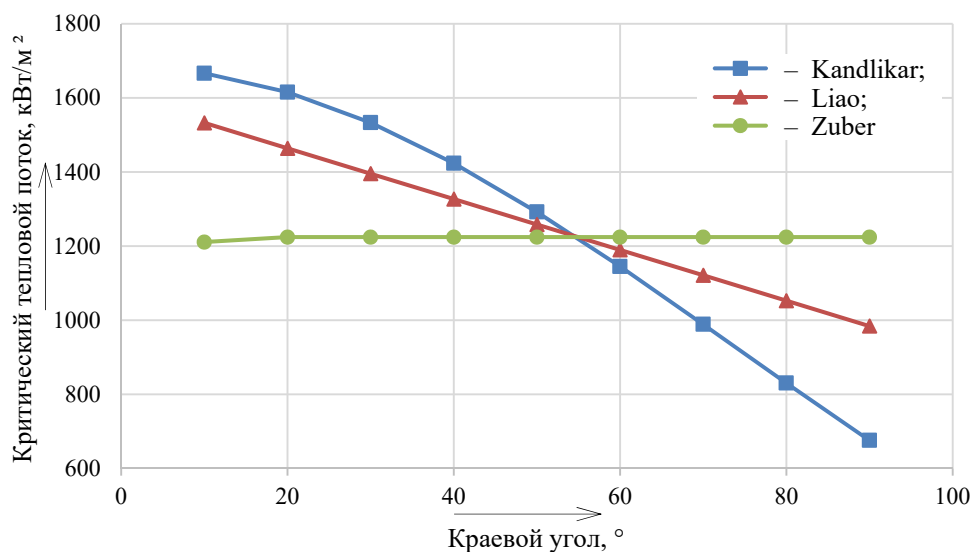


Рисунок 4 – Зависимость критического теплового потока от краевого угла кипения

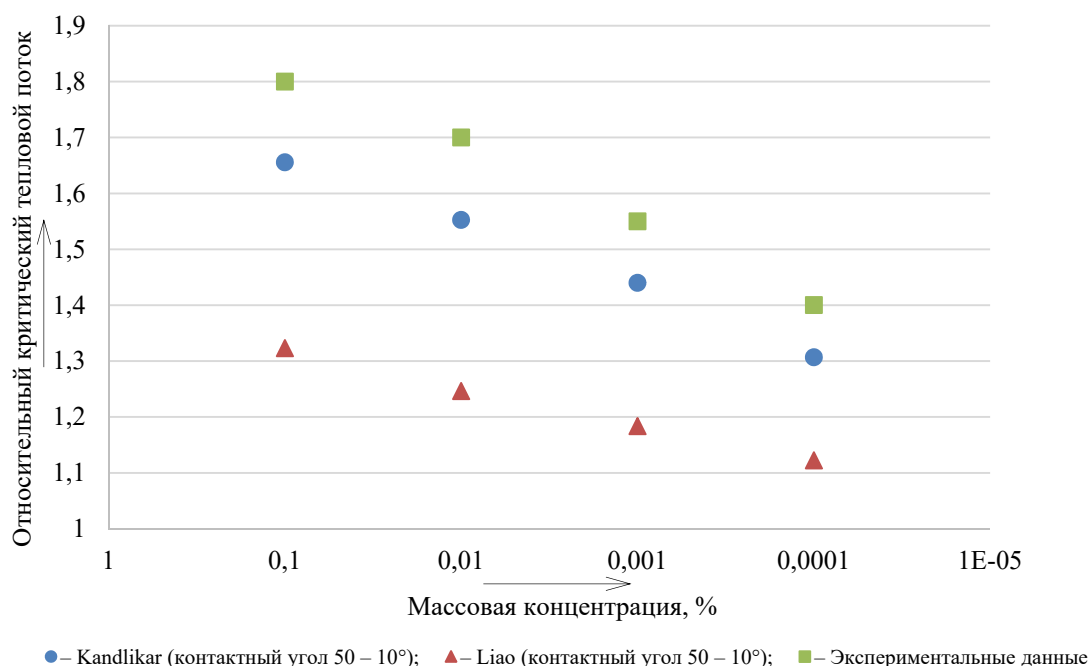


Рисунок 5 – Зависимость относительного критического теплового потока от концентрации наночастиц диоксида кремния (расчетные и экспериментальные данные)

Результаты расчетов с использованием модели Zuber показывают постоянное значение критического теплового потока с изменением краевого угла кипения. Критический тепловой поток увеличивается с уменьшением краевого угла кипения при расчетах по формулам, предложенным Kandlikar и Liao.

С ростом концентрации наночастиц в базовой жидкости (см. рисунок 5) критический тепловой поток возрастает, что подтверждается экспериментальными и расчетными данными. Рост критического теплового потока обеспечивается благодаря отложениям наночастиц на поверхности нагрева, которые улучшают смачиваемость поверхности, уменьшая тем самым краевой угол кипения. Максимальное расхождение между экспериментальными и расчетными значениями критического теплового потока находится в пределах 9 % (для зависимости, предложенной Kandlikar). Для зависимости, предложенной Liao, между экспериментальными и расчетными значениями расхождения имеют большую величину. Это объясняется значительным количеством факторов (в том числе определение краевого угла), влияющих на процесс кипения, которые сложно учесть при использовании рассмотренных выше формул (1) – (3).

В результате проведенного исследования процесса кипения базовой жидкости (дистиллированной воды) с добавлением наночастиц диоксида кремния сделаны следующие выводы:

при кипении суспензии наблюдается образование пористого отложения на теплообменной поверхности;

зафиксировано увеличение относительного критического теплового потока до 80 % с увеличением концентрации наночастиц диоксида кремния в составе суспензии;

максимальное расхождение между экспериментальными и расчетными значениями критического теплового потока находится в пределах 9 % для зависимости, предложенной Kandlikar.

Список литературы

1. Slobodina E.N., Mikhailov A.G. Application peculiarities of the high-temperature fluids containing nanoparticles in gas-tube boilers, in «15th International Scientific and Technical Conference, PESPC 2020», *Journal of physics: Conference series 1652*, (PESPC 2020, Saratov, 2020), pp. 1-4.
2. Чен, Лисинь. Критический тепловой поток в микроканалах и в замкнутом пространстве. Обзор экспериментальных исследований и методов прогнозирования / Лисинь Чен. – Текст : непосредственный // Российский химический журнал (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д. И. Менделеева). – 2011. – Т. LV. – № 2. – С. 85–98.
3. Терехов, В. И. Механизм теплопереноса в наножидкостях: современное состояние проблемы. Часть 2. Конвективный теплообмен / В. И. Терехов, С. В. Калинина, В. В. Леманов. – Текст : непосредственный // Теплофизика и аэромеханика. – 2010. – Т. 17. – № 2. – С. 173–188.
4. Aref Rahimian, Hosein Kazeminejad, Hosein Khalafi, Azam Akhavan and Seyed Mohammad Mirvakili Hindawi. Boiling Heat Transfer and Critical Heat Flux Enhancement Using Electrophoretic Deposition of SiO₂ Nanofluid. *Science and Technology of Nuclear Installations*, vol. 2019, article ID 1272156, 10 p.
5. Sagar C. Hiswankar, Jagdeep M. Kshirsagar. Determination Of Critical Heat Flux In Pool Boiling Using ZnO Nanofluids. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, pp. 2091-2095.

References

1. Slobodina E.N., Mikhailov A.G. Application peculiarities of the high-temperature fluids containing nanoparticles in gas-tube boilers, in «15th International Scientific and Technical Conference, PESPC 2020», *Journal of physics: Conference series 1652*, (PESPC 2020, Saratov, 2020), pp. 1-4.

2. Cheng L. Critical heat flux in microchannels and in confined space. Overview of Experimental Studies and Prediction Methods [Kriticheskij teplovoj potok v mikrokanalah i v zamknutom prostranstve. Obzor jeksperimental'nyh issledovanij metodov prognozirovaniya]. *Russian Chemical Journal (Journal of the Russian Chemical Society named D.I. Mendeleev)*, 2011, vol. LV, no. 2, pp. 85-98. (In Russian).

3. Terekhov V.I., Kalinina S.V., Lemanov V.V. Mechanism of heat transfer in nanofluidities: the current state of the problem. Part 2. Convective heat exchange. *Thermophysics and aeromechanics*, 2010, vol. 17, no. 2, pp. 173-188 (In Russian).

4. Aref Rahimian, Hosein Kazeminejad, Hosein Khalafi, Azam Akhavan and Seyed Mohammad Mirvakili Hindawi. Boiling Heat Transfer and Critical Heat Flux Enhancement Using Electrophoretic Deposition of SiO₂ Nanofluid. *Science and Technology of Nuclear Installations*, vol. 2019, article ID 1272156, 10 p.

5. Sagar C. Hiswankar, Jagdeep M. Kshirsagar. Determination Of Critical Heat Flux In Pool Boiling Using ZnO Nanofluids. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, pp. 2091-2095.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Слободина Екатерина Николаевна

Омский государственный технический университет (ОмГТУ).

Мира пр., д. 11, г. Омск, 644050, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика», ОмГТУ.

Тел.: +7 (913) 647-39-71.

E-mail: slobodina_e@mail.ru

Михайлов Андрей Гаррьевич

Омский государственный технический университет (ОмГТУ).

Мира пр., д. 11, г. Омск, 644050, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика», ОмГТУ.

Тел.: +7 (3812) 65-21-54.

E-mail: te_eni@omgtu.ru

Гасс Евгений Андреевич

Омский государственный технический университет (ОмГТУ).

Мира пр., д. 11, г. Омск, 644050, Российская Федерация.

Студент кафедры «Теплоэнергетика», ОмГТУ.

Тел.: +7 (3812) 65-21-54.

E-mail: te_eni@omgtu.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Слободина, Е. Н. Экспериментальные и расчетные исследования процесса кипения наножидкости / Е. Н. Слободина, А. Г. Михайлов, Е. А. Гасс. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 1 (53). – С. 103 – 109.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Slobodina Ekaterina Nikolaevna

Omsk State Technical University (OmSTU).

11, Mira Pr., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Heat power engineering», OmSTU.

Phone: +7 (913) 647-39-71.

E-mail: slobodina_e@mail.ru

Mikhailov Andrey Garrievich

Omsk State Technical University (OmSTU).

11, Mira Pr., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Heat power engineering», OmSTU.

Phone: +7 (3812) 65-21-54.

E-mail: te_eni@omgtu.ru

Gass Evgeniy Andreevich

Omsk State Technical University (OmSTU).

11, Mira Pr., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Student of the department «Heat power engineering», OmSTU.

Phone: +7 (3812) 65-21-54.

E-mail: te_eni@omgtu.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Slobodina E.N., Mikhailov A.G., Gass E.A. Experimental and computational studies of the nanofluidic boiling process. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 1 (53), pp. 103-109 (In Russian).

С. В. Гужов

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация

РАЗВИТИЕ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ ПРЕДИКТИВНОГО АНАЛИЗА ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ НЕДОСТАТКА ИНФОРМАЦИИ

Аннотация. Современные энергетические комплексы и их подсистемы функционируют в условиях, отличных от принципов, заложенных при их создании. В подобных условиях объем потребления энергоресурсов объектом является значащей характеристикой, влияющей на технико-экономические показатели эффективности функционирования, что повышает требования к точности и достоверности прогнозных моделей энергопотребления.

К числу затруднений при достижении высокой точности расчета прогнозного энергопотребления относится низкая достоверность статистических данных, их частичная потеря или недостоверность, зашумленность случайными или не относящимися к основному технологическому процессу факторами.

В работе приведены обоснование задачи, а также результаты анализа и предложения развития моделей и методов предиктивного анализа энергопотребления региональных объектов в условиях недостатка информации. Приведены результаты проведенного анализа моделей. Разработан алгоритм анализа состояния и предиктивной аналитики процессов теплопотребления в централизованных теплоэнергетических системах в условиях недостатка информации. Рассмотрен метод объединения стохастических и детерминированных моделей анализа статистических данных и обоснована необходимость его применения. Перечислены основные принятые допущения. Показана блок-схема системы по достижению информационной обеспеченности при внедрении моделей предиктивного анализа энергопотребления. Приведены результаты классификации энергопотребляющих объектов по уровням (ступеням) с учетом особенностей их энергетического и технологического уклада. Показан алгоритм подготовки исходных данных, учитывающий их различную информационную насыщенность, дискретность, принадлежность к различным определяющим группам. Приведены блок-схема алгоритма формирования прогнозной функции и направления последующего развития предложенных моделей и методов предиктивного анализа энергопотребления энергетических комплексов и их подсистем.

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка нейросетевого программного обеспечения по прогнозированию спроса на тепловую энергию объектами массового строительства города Москвы» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2022 – 2024 гг.

Ключевые слова: детерминированный подход, статистический анализ, искусственная нейронная сеть, сопоставимые условия, прогнозирование, спрос на энергоресурсы, точность, достоверность.

Sergey V. Guzhov

National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (NRU «MPEI»),
Moscow, the Russian Federation

DEVELOPMENT OF MODELS AND METHODS FOR PREDICTIVE ANALYSIS OF ENERGY CONSUMPTION OF REGIONAL FACILITIES IN CONDITIONS OF LACK OF INFORMATION

Abstract. Modern energy complexes and their subsystems operate under conditions different from the principles laid down during their creation. In such conditions, the volume of consumption of energy resources by an object is a significant characteristic that affects the technical and economic performance indicators of operation, which increases the requirements for accuracy and reliability of predictive models of energy consumption.

Among the difficulties in achieving high accuracy in the calculation of predicted energy consumption is the low reliability of statistical data, their partial loss or unreliability, and the presence of noise due to random factors or factors not related to the main technological process.

The paper presents the substantiation of the problem, as well as the results of the analysis and proposals for the development of models and methods for predictive analysis of the energy consumption of regional facilities in the absence of information. The results of the study and analysis of models and the algorithm for analyzing the state and predictive

analytics of heat consumption processes in centralized heat and power systems are presented. in the absence of information. The method of combining stochastic and deterministic models of statistical data analysis is considered and the necessity of its application is substantiated. The main accepted assumptions are listed. A block diagram of the system for achieving information security when implementing models of predictive analysis of energy consumption is shown. The results of the classification of energy-consuming objects by levels (steps) are given, taking into account the peculiarities of their energy and technological structure. An algorithm for preparing the initial data is shown, taking into account their different information saturation, discreteness, belonging to different defining groups. A block diagram of the algorithm for the formation of the predictive function and the direction of the subsequent development of the proposed models and methods for predictive analysis of the energy consumption of energy complexes and their subsystems are given.

The investigation has been carried out within the framework of the project «Development of neural network software for forecasting the demand for thermal energy by objects of mass construction in the city of Moscow» with the support of a subvention from the National Research University «MPEI» for implementation of the internal research program «Priority 2030: Future Technologies» in 2022-2024.

Keywords: *deterministic approach, statistical analysis, artificial neural network, comparable conditions, forecasting, energy demand, accuracy, reliability.*

Тенденции развития энергетических комплексов регионального масштаба и их подсистем, энергетических систем крупных промышленных комплексов (ЭСиК) и городов предъявляют дополнительные требования к качеству процесса формирования приоритетов развития. К числу необходимых требований в условиях развивающейся экономики страны относятся не только показатели надежности, энергетической эффективности, экологичности, устойчивости и пр., но и показатели экономической эффективности, необходимость участия в ценовой конкуренции. Подобные усложнения привносят в существующие прогнозные математические модели существенный объем новых переменных. Значения дополнительных факторов, как правило, определены с значительной долей погрешности и определяются не техническими, а маркетинговыми, экономическими показателями. Описанная ситуация предъявляет повышенные требования к моделям анализа энергопотребления объектами. Задача предиктивного анализа энергопотребления региональных объектов в условиях недостатка информации требует объединения детерминированных моделей некоторых подсистем с моделями предиктивной аналитики.

Значительное число существующих методов анализа процессов теплоснабжения в централизованных теплоэнергетических системах регламентируют [1 – 4] механизм прогнозирования спроса на энергоресурсы посредством сравнения соответствующих удельных показателей за рассматриваемый и базовый годы, а также посредством составления простейших математических пропорций и линейных экстраполяций, что некорректно в силу нелинейности изменения многих экономических, технических, технологических, социальных, климатических и иных процессов.

Поскольку существует несколько действующих методик [5, 6] приведения к сопоставимым условиям, то результаты расчетов различаются, что существенно усложняет формирование единой унифицированной модели.

При анализе эффективности функционирования технического и энергетического оборудования крайне важное значение приобретает повышение достоверности и сравнимости исходной информации. Повышается роль процедуры формирования прогнозных функций спроса на энергоресурсы посредством механизмов предиктивной аналитики. Анализ энергопотребления объектов показывает неравномерный характер темпов его изменения по энергетическим комплексам, регионам, отраслям. Данный подход описан предельным негауссовым законом безгранично делимых распределений в работах А. Н. Колмогорова [7], А. Я. Хинчина [8], В. И. Гнатюка [9], С. П. Филиппова [10, 11] и др. Прогнозы внутреннего спроса формируются с учетом результатов экспертного анализа формализованных решений, что допускает корректировку модели и дополнительную настройку ее коэффициентов в «ручном» режиме.

Развитие моделей предиктивного анализа энергопотребления региональных объектов в условиях недостатка информации может быть существенно упрощено при декомпозиции задачи на несколько блоков, учитывающих в своем расчете масштаб рассматриваемой

системы. Энергетическое хозяйство W может быть описано как модель системы показателей W^0 :

$$W^0 = W_1^K \cdot W_1^L \cdot W_1^m \cdot W_1^c \cdot W_1^n, \quad (1)$$

где $k \in [1; K]; l \in [1; L]; m \in [1; M]; c \in [1; C]; n \in [1; N];$

$i_k \in [1; 23]; i_l \in [1; 16]; i_m=19; i_c \in [1; 22]; i_n \in [1; 15],$

и соответствующее структуре информационной базы данных:

$$W^B = \{A\} \cdot \{P\} \cdot \{B\} \cdot \{C\} \cdot \{N\}. \quad (2)$$

В базу данных помещается и ряд матриц $\{X\} \notin W^0$,

где $\{N\}$ – матрица технологических показателей численностью N ;

$\{A\}$ – матрица климатических показателей численностью K ;

$\{P\}$ – матрица социальных показателей численностью L ;

$\{B\}$ – матрица технологических показателей численностью M ;

$\{C\}$ – матрица экономических показателей численностью C .

Для составления корректных аналитических моделей на основании статистических данных необходим достаточный объем как априорной, так и апостериорной информации. Актуальные методики предполагают, что при получении результатов для системы W необходимы исходные данные по всем элементам: $u_i \in W$. Конечный этап есть интегрирование посредством классического подхода, реализация чего затруднительна по причине недостаточности информации, характерной для описания сложных систем.

Недостатком известных моделей является сложность их использования и интерпретации полученных данных. Затрудняет расчеты существенное несоответствие между наборами исходных данных, их точностью и глубиной накапливаемого архива. Проблема получения исходных данных осложняется также тем, что существенная часть информационных систем не предоставляет данные в открытый доступ. Открытые же данные как по своей точности, так и по достоверности не могут быть применены для расчетов при составлении прогнозных моделей.

Дополнительными вносящими погрешности факторами являются следующие:

1) выход в процессе эксплуатации отдельных элементов из строя и их замена другими, не полностью идентичными в силу различного уровня техники и технологии их изготовления;

2) изменения параметров элементов не могут быть полностью определены заранее и зависят стохастически от состояния включающего их агрегата, а также от управляющих и случайных внешних воздействий;

3) воздействие на рассматриваемую систему носит стохастический характер со стороны верхнего уровня иерархии, которое учитывает конкурирующий характер подсистем, образующих систему, и накладываемые внешней средой ограничения: по затратам, по персоналу, по срокам эксплуатации и пр.

Особенной сложностью является учет случайных и нерасчетных режимов, появление которых является вероятностным. Для учета вероятностных флуктуаций целесообразно применить регрессионный и (или) факторный анализ, анализ Фурье. В качестве исходных данных используется статистическая информация от систем управления при условии, что расчеты ведутся на основании очищенной от флуктуаций и шума репрезентативной выборки, коррелирующей с генеральной совокупностью при заданной достоверности. Регрессионная модель чувствительно реагирует необоснованным завышением значимости нескольких регрессоров в случае наличия между ними взаимной связи. Для компенсации данного явления принято допущение о прохождении оптимальной функции через центр скопления значений массива статистических данных, а также применяется корректировка R^2 на число регрессоров.

Прогнозный доверительный интервал математического ожидания:

$$\left[V_{\text{пост}} - t_{1-\frac{\alpha}{2},k} \cdot S_{\bar{V}_{\text{пост}}}; V_{\text{пост}} + t_{1-\frac{\alpha}{2},k} \cdot S_{\bar{V}_{\text{пост}}} \right], \quad (3)$$

где $t_{1-\frac{\alpha}{2},k}$ – квантиль распределения Стьюдента для уровня значимости α ; $V_{\text{пост}}$ – групповая средняя; $S_{\bar{V}_{\text{пост}}}$ – несмещенное выборочное стандартное отклонение.

На основании целого ряда рассмотренных работ зарубежных и российских авторов установлено, что математический аппарат, использующий дискретные экспериментальные исходные данные с определением их точности и достоверности, разработан недостаточно. Отдельные работы (Ю. И. Маркузе, В. Ю. Флоринский, R. Brein и др.), хотя и посвящены вопросам изучения систематических ошибок, однако не могут дать в полной мере алгоритм их определения.

В настоящее время искусственные нейронные сети (ИНС) не являются универсальным средством для решения множества прогностических задач. Причина этого состоит в том, что ИНС в основном базируются на эвристических алгоритмах, индивидуальных для каждого анализируемого объекта. Данную проблему на первом этапе расчета необходимо решать посредством декомпозиции и последовательного решения следующих взаимосвязанных задач:

- 1) универсализации требований к входным статистическим данным: число, их точность, размерность;
- 2) исключения недоученности либо переученности ИНС в силу некорректности подбора обучающих выборок;
- 3) подбора структуры ИНС и ее нейронов.

Программная реализация способа использует алгоритм вычисления обратной матрицы Якоби через представление в форме произведения двух матриц:

$$[W]^{-1} = [W^0]^{-1} \cdot [W^B]^{-1}. \quad (4)$$

Аналитические и статистические методы (в том числе метод нечеткого множества) являются менее эффективными, так как с их помощью не всегда возможно описать накопленный массив нецифровой статистической информации. Еще одно преимущество ИНС состоит в отказе от допущения распределения флуктуаций характеристик энергосистем по нормальному распределению случайного процесса. Существенным преимуществом ИНС является возможность создания набора решений в виде подсистем, полученных с применением тензорно-топологического метода Г. Крона. Решения, найденные для отдельных подсистем, могут сохраняться и затем использоваться для определения решений более сложных систем, содержащих эти подсистемы, соединенные самым разнообразным образом.

При этом принимаются допущения решения оптимизационной задачи: математические модели отдельных установок и вводимые ограничения всегда линейны; все переменные неотрицательны; изменения по шкале времени характеристик установок, связанные с запуском, остановкой и переходными режимами, не учитываются, так как переходные режимы занимают малую долю от времени работы установок; малые изменения характеристик установок в результате изменения режима их работы не учитываются, так как влияние этих изменений на общую эффективность работы системы полагается незначительным [12]. Рекомендуются предварительная нормализация исходных данных.

Сглаживание временных рядов производится посредством оценки детерминированной компоненты, параметры которой в большинстве случаев легко интерпретируются. Оцениваются также вариация прогноза и коэффициент расхождения. Для нахождения тесноты линейной связи между отдельными элементами матрицы целесообразно определить линейные коэффициенты корреляции. При необходимости применяется метод наибольшего правдоподобия и оценки по Фишеру и Стьюденту. Используются показатели степени тесноты связи: линейный коэффициент корреляции Пирсона, коэффициенты корреляции рангов Спирмэна и Кендэла, коэффициента корреляции знаков Фехнера. В отдельных случаях выполняется исключение тренда из временных рядов показателей и факторов, определяется

временной лаг влияния факторов на выходной показатель, проверяется наличие мультиколлинеарности [13].

Результатом объединения стохастических и детерминированных математических моделей является алгоритм, реализующий процесс достижения информационной обеспеченности при внедрении моделей предиктивного анализа энергопотребления (рисунок 1). Особенность разработанной схемы состоит в учете как технологических факторов, так и показателей методических погрешностей, фактора времени, особенностей процесса сбора и обработки данных.

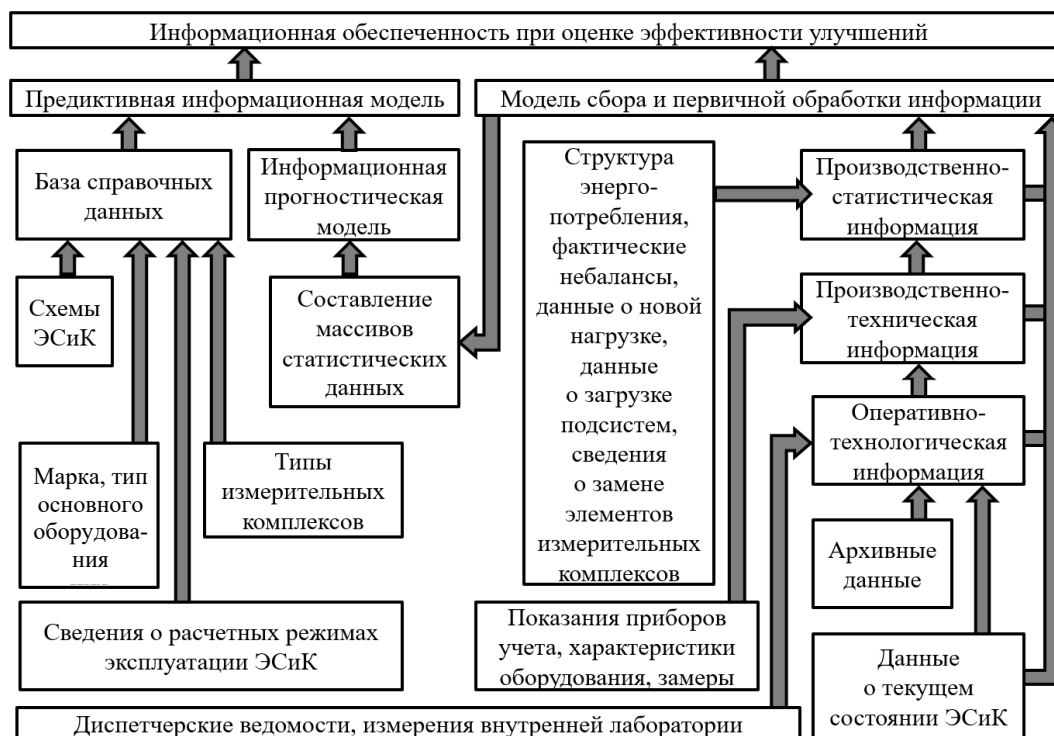


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма по достижению информационной обеспеченности при внедрении моделей предиктивного анализа энергопотребления

Для реализации задачи предложена система классификации уровней (ступеней) энергосистем с учетом особенностей их энергетического и технологического уклада:

I уровень – энергопотребляющая подсистема здания непромышленного назначения, использующая незначительное количество маломощных потребителей электрической и тепловой энергии (например, жилые здания, некрупные офисные центры и т. п.);

II уровень – энергопотребляющая подсистема объекта производственного либо непромышленного назначения без собственных энергоисточников, оснащенная простейшим технологическим оборудованием и возможными единичными энергопотребителями средней мощности (например, прачечная, торговый центр, швейный цех и т. п.);

III уровень – энергосистема объекта производственного назначения с собственным энергоисточником, с многочисленными и сложными технологическими схемами, разветвленными инженерными системами, приспособленными для обеспечения надежного энергоснабжения крупных энергопотребителей, но не включающая в себя потребителей жилищно-коммунального сектора (например, промышленная площадка с собственной установкой генерации электрической и (или) тепловой энергии либо крупный торговый центр);

IV уровень – энергосистема территориальной единицы, включающей в себя промышленные объекты, железнодорожные узлы и другие объекты производственной инфраструктуры, а также объекты ЖКХ и социальные объекты, рассчитанные на численность

населения от 8 тыс. до 12 тыс. человек, с одним либо несколькими собственными энергоисточниками, с многочисленными и сложными технологическими схемами, разветвленными инженерными системами, приспособленными для обеспечения надежного энергоснабжения крупных блоков энергопотребителей (например, города либо его части);

V уровень – энергосистема административно-территориального образования субъекта страны, имеющего административный центр и объединенного несколькими экономическими и территориальными взаимосвязанными населенными пунктами с прилегающей территорией, с одним либо несколькими собственными энергоисточниками, с многочисленными и сложными технологическими схемами, разветвленными инженерными системами, приспособленными для обеспечения надежного энергоснабжения крупных блоков энергопотребителей (например, региона либо субъекта страны);

VI уровень – совокупность имущественных комплексов, связанных единым процессом выработки электрической и тепловой энергии, их передачи, преобразования и потребления в условиях централизованного оперативно-диспетчерского управления (например, страны).

Выделение уровней (ступеней) энергосистем с учетом особенностей их энергетического и технологического уклада позволяет выделить несколько групп значащих факторов, являющихся независимыми. С увеличением уровня возрастает минимальное число групп факторов, необходимых для учета в прогнозной модели. К их числу, например для III уровня, относится группа технических и технологических факторов – не менее восьми факторов; группа климатических и климатологических факторов – не менее девяти факторов; группа социальных факторов – не менее пяти факторов; группа экономических факторов – не менее пяти факторов; группа социально-экономических показателей – не менее 14 факторов.

Значительное число операторов обработки статистической информации в ряде случаев непригодны для составления прогнозных функций энергопотребления, так как массив исходных данных является не экспериментальными данными, а наблюдениями. Анализ типа распределения массивов для абсолютного большинства исходных факторов показал их соответствие распределению Стюдента. Для перевода массивов неиспользуемых данных, отображающих неизменяющиеся либо мало изменяющиеся по оси времени свойства исследуемой системы, в пригодный для анализа формат предложено использовать набор приемов по формированию «идеализированной» функции энергопотребления здания.

Для решения задачи анализа относительно небольших массивов данных как по оси времени, так и на основании ряда факторов наиболее подходит регрессионный анализ; для больших объемов данных – нейронные сети.

Для моделирования случайных ошибок временных рядов показана наибольшая точность при применении метода скользящего среднего:

$$P_t = \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \dots - \theta_i \varepsilon_{t-1} - \dots - \theta_p \varepsilon_{t-p}, \quad (5)$$

где P_t – объемы потребления энергоресурсов; c – постоянная ряда; φ_i – коэффициенты авторегрессии; ε_t – белый шум; θ_i – параметр скользящего среднего; $P_t^d = \Delta^d P_t$ – объем энергопотребления; Δ – оператор взятия разности; θ_j – параметр скользящего среднего; p – лаг времени; q – временной лаг; t – временная шкала.

Модели авторегрессии и скользящего среднего целесообразно объединить и использовать модель Бокса – Дженкинса:

$$P_t^d = c + \varphi_1 P_{t-1}^d + \dots + \varphi_i P_{t-1}^d + \dots + \varphi_p P_{t-p}^d + \varepsilon_t - \theta_j \varepsilon_{t-1} - \dots - \theta_j \varepsilon_{t-j} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q}. \quad (6)$$

Предложенная форма записи позволяет в последующем представить ряд энергопотребления как сумму двух составляющих: регулярного процесса и высокочастотного шума. В таком случае, исключив стохастическую составляющую посредством вейвлет-фильтрации, можно добиться повышения точности прогнозирования:

$$f(t) = \sum_{j,k \in \mathbb{Z}} [d_{jk} \cdot \psi \cdot (2^j t - k)], \quad (7)$$

где набор базисных функций формируется посредством двоичного разложения 2^j и бинарной трансляции $k/2^j$ и может быть записан в виде:

$$f(t) = \sum_k [s_k^j \cdot \phi \cdot (2^j t - k)] + \sum_{j \geq J} [\sum_{k \in Z} [d_k^j \cdot \psi \cdot (2^j t - k)]], \quad (8)$$

где $\phi = \phi(t)$ – функция масштабирования, соответствующая вейвлет-функции $\psi(t)$; коэффициенты s_k^j и d_k^j определяют посредством применения пирамидальной схемы быстрых вейвлет-преобразований.

Первая составляющая уравнения (8) соответствует низкочастотной составляющей, отвечающей за регулярный процесс, вторая – высокочастотный шум. Данный метод обработки предполагает изменение части коэффициентов разложения, значения которых меньше некоторого порогового значения. Значение данных ряда можно принять с учетом сезонной составляющей. Коэффициент белого шума ε_t представляет собой разовые либо систематические ошибки, трудно поддающиеся систематизации. Недопустимо использование в расчетах нескольких факторов, относящихся к одной и той же части рассчитываемого энергобаланса, так как это приведет к необоснованному завышению значимости таких факторов.

При необходимости оценки величины математического ожидания прогнозной величины с предварительно заданными показателями точности δ и доверительной вероятности γ следует использовать формулу (9) либо данные таблицы.

$$n_{\text{изм}} = \frac{t^2 \sigma^2}{\delta^2}, \quad (9)$$

где t – аргумент, которому соответствует значение функции Лапласа, равное $\gamma/2$; δ – желаемая точность прогнозной модели; σ – среднее квадратичное отклонение непрерывной случайной величины.

Значение минимального числа наблюдений для различных γ [14]

Доверительная вероятность γ	Точность прогнозной модели $\delta = 95 \%$
0,99 ($t = 2,58$)	364
0,90 ($t = 1,65$)	149
0,80 ($t = 1,29$)	91
0,50 ($t = 0,68$)	25

В дальнейшем принято минимальное число наблюдений, равное 36, что составляет три года при условии ежемесячного измерения.

Для решения задачи разработки методологии прогнозирования потребления энергетических ресурсов промышленными и коммунальными объектами в условиях недостаточности данных обоснован алгоритм, приведенный на рисунке 2.

Представленный алгоритм включает в себя следующие этапы.

Этап 1. Анализ исходной информации и отсев недостоверных данных.

Этап 2. Определение значений фактического и «идеализированного» потребления тепловой энергии для исследуемого объекта за выбранный период времени.

Этап 3. Определение набора факторов, оказывающих влияние на значение теплопотребления, и отсев некоторых из них по критериям коллинеарности и мультиколлинеарности.

Этап 4. Формулирование прогнозной математической функции или группы предиктивных правил.

Этап 5. Определение значений всех входных факторов на прогнозируемом временном промежутке либо диапазонов их значений по принципу: «оптимистичный», «нейтральный», «пессимистичный» прогнозы.

Этап 6. Определение прогнозных значений теплотребления с учетом всех выбранных факторов и периодов.

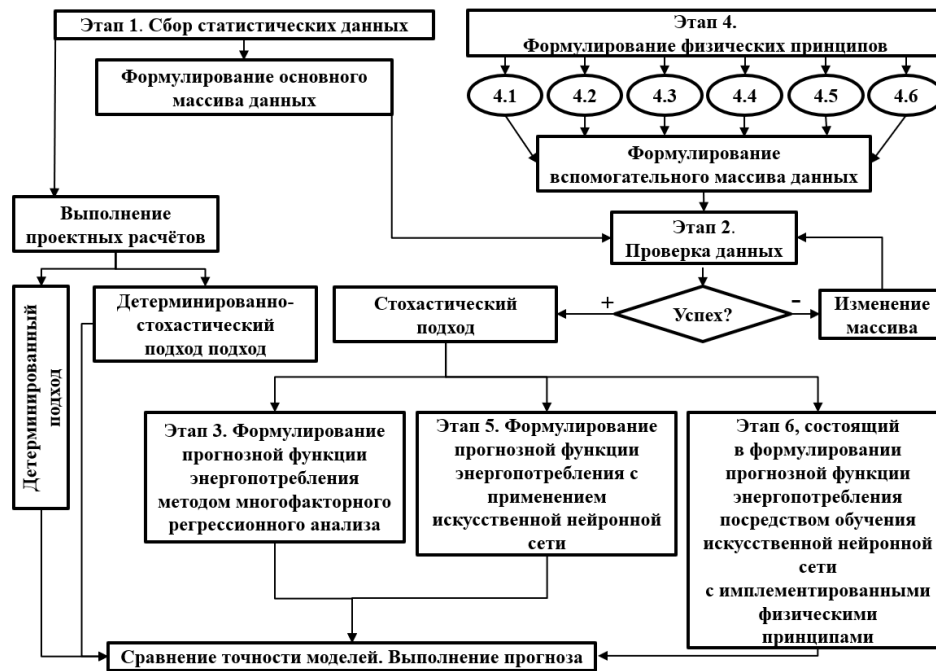


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма формирования прогнозной функции

Для прогнозирования энергопотребления объектов среднего и крупного масштаба целесообразным является использование многослойных ИНС на основании сетей Элмана, с каскадным распределением, с задержкой по времени.

В случае частичного или нечеткого выполнения указанных проверок необходимо произвести повторную проверку при соблюдении условия дополнительного учета факторов:

- постепенного ухудшения характеристик оборудования;
- постепенного ухудшения характеристик ограждающих конструкций зданий;
- скачкообразного ухудшения характеристик оборудования;
- различия расчетных и фактических режимов эксплуатации оборудования;
- воздействия фактических климатических показателей на интенсивность тепловых потерь и пр.

В случае, если показанный алгоритм проверки входных данных не выполняется при анализе всех входных факторов, то допустимо сохранить хотя бы по одному наиболее показательному стохастически изменяющемуся фактору из блоков данных: климатических, экономических, социальных, а также данных о загрузке объекта на основе договоров. Полученную новую выборку данных можно усилить расчетными результатами детерминированных моделей при прохождении их проверки на коллинеарность и мультиколлинеарность.

Точность прогноза является переменной величиной. В случае ежемесячных измерений при принятой точности прогнозной модели $\delta_X = 95\%$ и величине доверительной вероятности расчетов $\gamma_X = 0,50$ расчетным периодом является календарный год № X , равный 12 точкам наблюдения. В календарный год № $(X + 1)$ при неизменной $\gamma_{X+1} = \gamma_X$ точность прогнозной модели будет находиться в пределах: $\delta_{X+1} \geq \Delta \geq \delta_X$, где $\delta_{X+1} = \delta_X \frac{0,05}{1,05}$. Аналогично для календарного года № $(X + 2)$ максимальная погрешность увеличивается до величины $\delta_{X+2} = \left[\delta_X \frac{0,05}{1,05} \right] \frac{0,05}{1,05}$. Целесообразный горизонт прогнозирования тем больше, чем выше точность и достоверность исходных данных. При высоком уровне подготовки данных горизонт планирования может составлять до шести – восьми лет при результирующей

погрешности не более 5 %. При низком качестве исходных данных погрешность прогноза в первый же год может превышать 15 % и более.

К задачам, решаемым при прогнозировании энергопотребления с учетом индивидуальных особенностей энергетических комплексов и их подсистем, относятся анализ потенциальных причин вариаций в отклике, исследование влияния каждого фактора на переменную отклика, оценка относительного вклада независимых переменных. В случае представления исходной информации не в форме четкого цифрового обозначения наблюдаемых величин, а в форме интервалов возможных допустимых значений, применены алгоритмы нечеткого регрессионного анализа с заданной функцией принадлежности. Однако не в полной мере исследована целесообразная с точки зрения достигаемой точности степень дискретизации интервалов дополнительно учитываемых величин.

Точность расчета прогнозного энергопотребления повышается с увеличением числа опросов в единицу времени. С увеличением объема данных возрастают требования к автоматическим системам управления, к алгоритмам очистки данных от случайных воздействий, к сложности структуры ИНС и пр.

Анализ типа распределения массивов для большинства проанализированных объектов показал их соответствие распределению Стюдента. Однако задача выявления набора распределений оптимальных для объектов каждого уровня является предметом следующих исследований.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы. Результаты проведенного исследования моделей предиктивной аналитики процессов теплотребления в условиях недостатка информации показывают их существенную зависимость от качества данных. При прочих равных условиях высокий уровень предварительной подготовки данных позволяет повысить точность до 95 % – на примере, в котором отсутствие предобработки дает точность не более 85 %. Показан метод объединения стохастических и детерминированных моделей анализа статистических данных, позволяющий дополнительно повысить точность прогноза.

Показана блок-схема системы по достижению информационной обеспеченности при внедрении моделей предиктивного анализа энергопотребления. При использовании, например, ежемесячной дискретности данных точность прогнозной модели может достигать 80 – 90 %, ежесуточной – 90 – 95 %, ежечасной – свыше 95 %. Разработана блок-схема алгоритма формирования прогнозной функции, позволяющая учесть различную информационную насыщенность, дискретность и принадлежность данных к различным определяющим группам.

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка нейросетевого программного обеспечения по прогнозированию спроса на тепловую энергию объектами массового строительства города Москвы» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2022 – 2024 гг.

Список литературы

1. Комплексный план мероприятий по повышению энергетической эффективности экономики в Российской Федерации от 19 апреля 2018 г. № 703-р: [утвержден распоряжением Правительства Российской Федерации от 19 апреля 2018 г. № 703-р, принят Государственной думой 16 сентября 2003 г., одобрен Правительством Российской Федерации 19 апреля 2018 г.]. – Москва : Кодекс, 2023. – 31 с. – Текст : непосредственный.
2. Постановление Правительства Российской Федерации от 1 июня 2010 г. № 391 «О порядке создания государственной информационной системы в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности и условий для ее функционирования» : [утвержден Правительством Российской Федерации 1 июня 2010 г.]. – Москва : Кодекс, 2023. – 8 с. – Текст : непосредственный.
3. Приказ Минэнерго России от 24 октября 2011 г. № 591 «О порядке определения объемов

снижения потребляемых государственным (муниципальным) учреждением ресурсов в сопоставимых условиях»: [утвержден приказом Министерства экономического развития Российской Федерации от 24 октября 2011 г.]. – Москва : Кодекс, 2023. – 9 с. – Текст : непосредственный.

4. Приказ Минэнерго России от 30 июня 2014 г. № 399 «Об утверждении методики расчета значений целевых показателей в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности, в том числе в сопоставимых условиях»: [утвержден приказом Министерства энергетики Российской Федерации от 30 июня 2014 г.]. – Москва : Кодекс, 2023. – 31 с. – Текст : непосредственный.

5. ГОСТ Р ИСО/ТО 10017–2005. Статистические методы. Руководство по применению в соответствии с ГОСТ Р ИСО 9001. ISO/TR 17:2003 Guidance on statistical techniques for ISO 9001:2000. – Москва : Стандартиформ, 2003. – 20 с. – Текст : непосредственный.

6. ГОСТ Р 56743–2015. Измерение и верификация энергетической эффективности. Общие положения по определению экономии энергетических ресурсов. – Москва : Стандартиформ, 2015. – 72 с. – Текст : непосредственный.

7. Ясницкий, Л. Н. Введение в искусственный интеллект : учебник / Л. Н. Ясницкий. – Москва : Академия, 2008. – 176 с. – Текст : непосредственный.

8. Малинецкий, Г. Г. Нелинейная динамика и проблемы прогноза / Г. Г. Малинецкий, С. П. Курдюмов. – Текст : непосредственный // Вестник Российской академии наук. – 2001. – Том 71. – № 3. – С. 210–232.

9. Гнатюк, В. И. Закон оптимального построения техноценозов / В. И. Гнатюк. – Москва : Томский государственный университет. – Центр системных исследований, 2005. – 384 с. – Текст : непосредственный.

10. Филиппов, С. П. Интегрированный подход к прогнозированию потребностей страны и регионов в энергоносителях на долгосрочную перспективу / С. П. Филиппов. – Текст : непосредственный // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2008. – № 1 (31). – С. 13–27.

11. Филиппов, С. П. Прогнозирование энергопотребления с использованием комплекса адаптивных имитационных моделей. – Текст : электронный. – URL: https://www.eriras.ru/files/fillipov_prognozirovaniye_enjergopotreblenija_izvjestija_ran_en_4-10.pdf (дата обращения: 31.05.2022).

12. Иванин, О. А. Оптимизация энергетических комплексов малой распределенной энергетики : специальность 05.14.01 «Энергетические системы и комплексы» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Иванин Олег Александрович. – Текст : электронный. Работа выполнена и защищена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки объединенном институте высоких температур Российской академии наук, дата защиты 10.10.2018. – URL: https://jiht.ru/science/dissert-council/diss_texts/IvaninOA.pdf (дата обращения: 31.05.2022).

13. Гужов, С. В. Об объединении детерминированного и стохастического подходов при прогнозировании теплового баланса здания для занятий водными видами спорта / С. В. Гужов. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2020. – Т. 22. – № 1. – С. 103–112. – doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-103-112.

14. Гужов, С. В. Исследование и прогнозирование качества функционирования энергосистем зданий для занятий водными видами спорта при разнообразных внешних воздействиях / С. В. Гужов. – Текст : непосредственный // Вестник МЭИ. – 2016. – № 5. – С. 88–93.

References

1. Comprehensive action plan to improve the energy efficiency of the economy in the Russian Federation, approved by Decree of the Government of the Russian Federation dated April 19, 2018 No. 703-r.

2. Decree of the Government of the Russian Federation of June 01, 2010 No. 391 «On the procedure for creating a state information system in the field of energy saving and energy efficiency and the conditions for its functioning».

3. Order of the Ministry of Energy of Russia dated October 24, 2011 No. 591 «On the procedure for determining the volume of reduction in resources consumed by a state (municipal) institution under comparable conditions».

4. Order of the Ministry of Energy of Russia dated June 30, 2014 No. 399 «On approval of the methodology for calculating the values of target indicators in the field of energy saving and energy efficiency, including under comparable conditions».

5. GOST R ISO / TO 10017-2005 «Statistical methods. Guidance on application in accordance with GOST R ISO 9001. ISO/TR 17:2003 Guidance on statistical techniques for ISO 9001:2000», Moscow, 2003.

6. GOST R 56743-2015 Measurement and verification of energy efficiency. General provisions for determining the savings of energy resources.

7. Yasnitsky L.N. *Vvedenie v iskusstvennyi intellekt: uchebnik* [Introduction to artificial intelligence: textbook]. Moscow, Academy Publ., 2008, 176 p. (In Russian).

8. Malinetskii G.G., Kurdyumov S.P. Nonlinear Dynamics and Forecast Problems. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*, 2001, vol. 71, no. 3, pp. 210-232 (In Russian).

9. Gnatyuk V.I. *Zakon optimal'nogo postroeniia tekhnotsenozov* [The law of optimal construction of technocenoses]. Moscow, Publishing House of TSU – Center for System Research, 2005, 384 p. (In Russian).

10. Filippov S.P. An integrated approach to forecasting the needs of the country and regions in energy carriers for the long term. *Bulletin of the SSTU*, 2008, no. 1 (31), pp. 13-27 (In Russian).

11. Filippov S.P. Forecasting energy consumption using a complex of adaptive simulation models. Available at: https://www.eriras.ru/files/filippov_prognozirovaniye_enjergo-potreb-ljenija_izvjestija_ran_en_4-10.pdf (accessed 31.05.2020).

12. Ivanin O.A. Optimization of energy complexes of small distributed energy // diss. Ph.D., JIHT RAS, 125C. 2018. Available at: https://jiht.ru/science/dissert-council/diss_texts/IvaninOA.pdf (accessed 31.05.2020).

13. Guzhov S.V. On the combination of deterministic and stochastic approaches in predicting the heat balance of a building for practicing water sports. *Izvestia of higher educational institutions. Energy problems*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 103-112 (In Russian), doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-103-112.

14. Guzhov S.V. Research and prediction of the quality of functioning of energy systems of buildings for practicing water sports under various external influences. *Vestnik MPEI*, 2016, no. 5, pp. 88-93 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Гужов Сергей Вадимович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»».

Красноказарменная ул., д. 14, стр. 1. вн. тер. муниципальный округ Лефортово, г. Москва, 111250, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных систем управления тепловыми процессами (АСУ ТП), НИУ «МЭИ».

Тел.: +7 (965) 294-91-11.

E-mail: GuzhovSV@mpei.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Гужов, С. В. Развитие моделей и методов предиктивного анализа энергопотребления региональных объектов в условиях недостатка информации / С. В. Гужов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 1 (53). – С. 110 – 120.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Guzhov Sergey Vadimovich

National Research University «Moscow Power Engineering Institute».

Krasnokazarmennaya st., 14, building 1. ext. ter. Lefortovo municipal district, Moscow, 111250, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department of automated control systems for thermal processes (ACS TP), NRU «MPEI».

Phone: +7 (965) 294-91-11.

E-mail: GuzhovSV@mpei.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Guzhov S.V. Development of models and methods for predictive analysis of energy consumption of regional facilities in conditions of lack of information. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 1 (53), pp. 110-120 (In Russian).

А. В. Малышев

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ С АКСИАЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОТОКОМ

Аннотация. Статья посвящена анализу работы системы векторного управления электродвигателем с аксиальным магнитным потоком. Несмотря на тот факт, что электродвигатель с аксиальным магнитным потоком был первым электродвигателем, изобретенным человечеством, его применение в промышленности и народном хозяйстве до недавнего времени было довольно ограничено. Данный тип электродвигателя представляет собой плохо демпфированную структуру, так как работать от сети переменного тока 50 Гц как асинхронный электродвигатель он не может. В связи с этим электродвигатель с аксиальным магнитным потоком питается от преобразователя, работа которого контролируется системой управления.

Автором рассматривается одна из наиболее распространенных систем управления синхронными двигателями с постоянными магнитами – векторное полеориентированное управление. Несмотря на тот факт, что данная система управления была разработана еще в 80-х гг. XX в., она до настоящего времени не теряет своей актуальности.

Для компьютерного моделирования работы системы управления представлены математическая модель электродвигателя, структура векторного полеориентированного управления и приведен принцип реализации опорного вектора напряжения.

Оценка работоспособности векторного управления электродвигателем с аксиальным магнитным потоком выполняется при двух режимах работы: в режиме холостого хода и в режиме полной механической нагрузки электродвигателя. Для каждого режима работы представлены графики электромагнитного момента, токов и напряжений статора, скорости вращения ротора.

Результаты анализа работы векторной системы управления показывают, что при данном типе управления электродвигателем с аксиальным магнитным потоком наблюдается низкий уровень пульсаций электромагнитного момента при холостом режиме работы и при полной механической нагрузке двигателя, а также отмечены преимущества и недостатки предложенной системы управления.

Ключевые слова: векторное управление, полеориентированное управление, электродвигатель с аксиальным магнитным потоком, система управления электродвигателем, пространственно-векторная модуляция.

Andrey V. Malyshev

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

MODELING THE VECTOR CONTROL SYSTEM OF THE AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET MOTOR

Abstract. The article is devoted to the analysis of the work of the vector control system by the Axial Flux Permanent Magnet (AFPM) motor. Despite the fact that the AFPM motor was the first electric motor invented by mankind, its use in industry and the national economy has been quite limited until recently. This type of motor is a poorly damped design as it cannot be directly driven from 50 Hz AC mains like an induction motor. Therefore, the AFPM motor is powered by a converter, the operation of which is controlled by the control system.

The author considers one of the most common control systems for permanent magnet synchronous motor – Field Oriented Control (FOC). Despite the fact that this control system was developed back in the 80s of the XX century, it has not lost its relevance to this day.

For computer simulation of the operation of the control system, a mathematical model of the motor, the structure of the FOC, and the principle of implementing the reference voltage vector are presented.

Evaluation of the efficiency of the FOC of the AFPM motor is performed in 2 modes of simulations: no-load simulations and full load simulations of the AFPM motor. For each simulation, graphs of the electromagnetic torque, stator currents and voltages, and rotor speed are presented.

The results of the analysis of the work of the FOC show that with this type of control of the AFPM motor, a low level of electromagnetic torque pulsations is observed at no-load operation and at full load of the motor. The advantages and disadvantages of the proposed control system are noted.

Keywords: vector control, Field Oriented Control (FOC), Axial Flux Permanent Magnet (AFPM) Motor, motor control systems, Space Vector Modulation.

Синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) широко применяются в различных сферах промышленности благодаря своей высокой энергоэффективности и удельной мощности электродвигателя. Существует две основные конфигурации СДПМ: электродвигатели с радиальным и аксиальным магнитным потоком. Как правило, когда употребляют термин «СДПМ», имеют в виду электродвигатель с радиальным магнитным потоком, так как именно этот тип электродвигателя получил среди СДПМ наибольшее распространение.

Несмотря на то, что электродвигатель с аксиальным магнитным потоком является первым электродвигателем, изобретенным человечеством, большое внимание к нему стало проявляться в последние 20 лет. Данный факт объясняется совершенствованием технологии производства, снижением цен на постоянные магниты, достижением большей удельной мощности по сравнению с электродвигателями с радиальным магнитным потоком [1].

Электродвигатель с аксиальным магнитным потоком, как и любой другой СДПМ, представляет собой плохо демпфированную структуру, т. е. работать от сети переменного тока без системы управления он не может [2]. При этом до настоящего времени не решена задача разработки энергоэффективной и отказоустойчивой системы управления данным типом электродвигателя.

В данной статье рассматривается векторная полеориентированная система управления (Field Oriented Control или FOC в англоязычной литературе) электродвигателем с аксиальным магнитным потоком. Следует подчеркнуть, что термин «Векторное управление» может применяться не только к полеориентированному управлению, но и к системе прямого управления моментом (Direct Torque Control или DTC в англоязычной литературе) [3]. Главное преимущество полеориентированной системы управления по сравнению с системой прямого управления моментом является низкий уровень пульсаций электромагнитного момента при изменениях нагрузки, однако, с другой стороны, система прямого управления момента имеет большее быстроедействие электромагнитного момента [4].

Математическая модель электродвигателя с аксиальным магнитным потоком. Математическое описание электродвигателя с аксиальным магнитным потоком такое же, как и для СДПМ. Поэтому уравнения, описывающие принцип работы электродвигателя в системе отсчета ротора, имеют вид [5]:

$$u_d = \frac{di_d}{dt} \cdot L_d + i_d \cdot R_s - \omega \cdot L_q \cdot i_q; \quad (1)$$

$$u_q = \frac{di_q}{dt} \cdot L_q + i_q \cdot R_s + \omega \cdot L_d \cdot i_d + \omega \cdot \psi_r; \quad (2)$$

$$M = \frac{mp}{2} \cdot [i_q \cdot \psi_r + i_d \cdot i_q \cdot (L_d - L_q)], \quad (3)$$

где u_d и u_q – напряжение статора по осям d и q соответственно, В;

i_d и i_q – ток статора по осям d и q соответственно, А;

R_s – активное сопротивление обмоток статора, Ом;

L_d и L_q – индуктивность обмоток статора по осям d и q соответственно, Гн;

ω – скорость вращения ротора в электрических рад/с;

M – электромагнитный момент, Н·м;

p – число пар полюсов;

ψ_r – потокосцепление ротора, Вб;

m – число фаз.

Необходимо отметить следующее: индуктивности статора по осям d и q у электродвигателей с аксиальным магнитным потоком можно принять одинаковыми, тогда электромагнитный момент двигателя [6]

$$M = \frac{mp}{2} \cdot i_q \cdot \psi_r. \quad (4)$$

Из уравнения (4) следует, что при фиксированном потокоцеплении ротора ψ_r момент электродвигателя зависит только от q -составляющей тока статора i_q . Однако когда требуется скорость вращения ротора выше номинальной скорости электродвигателя, используется алгоритм ослабления поля путем добавления d -составляющей тока статора i_d [7]. Также необходимо подчеркнуть, что при этом уменьшается выходной максимальный электромагнитный момент электродвигателя, так как q -составляющая тока статора i_q – уменьшается при неизменном токе статора [8]:

$$i_s = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \leq i_{s \max}. \quad (5)$$

Стоит заметить, что не рекомендуется в течение длительного времени создавать потоки, противоположные потокоцеплению ротора ψ_r , создаваемому постоянными магнитами. Данный факт может привести к размагничиванию постоянных магнитов, снижению создаваемого электромагнитного момента, а также к чрезмерному перегреву электродвигателя.

Векторное (полеориентированное) управление электродвигателем. Структура полеориентированного управления представлена на рисунке 1.

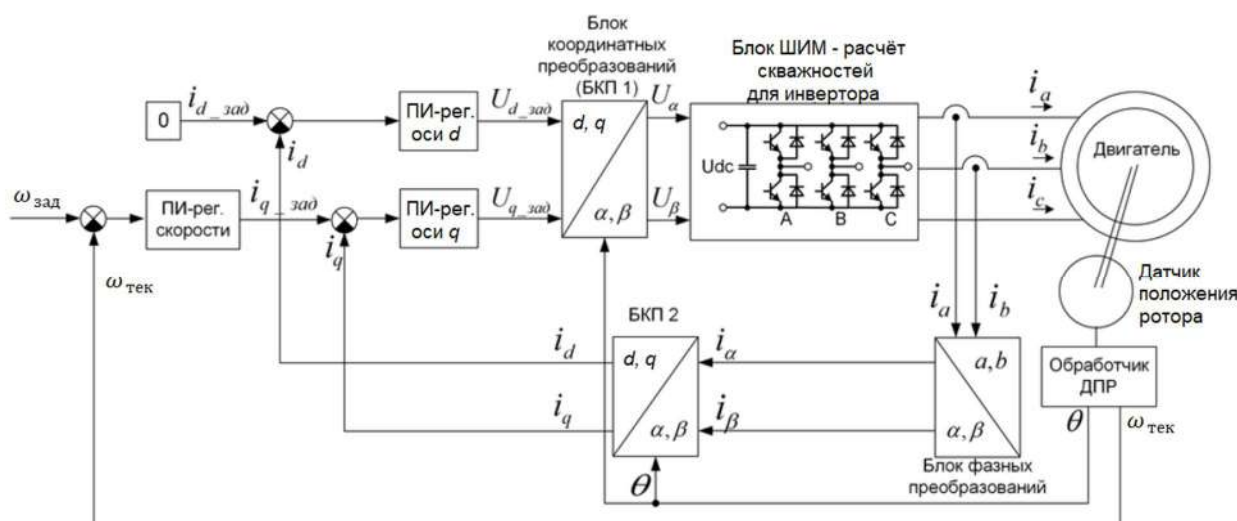


Рисунок 1 – Структура векторного (полеориентированного) управления [9]

Основным преимуществом данной системы управления является независимый контроль потокоцепления статора и электромагнитного момента двигателя. Для получения этой независимости токи статора представлены во вращающейся вместе с ротором системе координат d - q . Компонент i_d отвечает за регулировку магнитного потока статора, а i_q регулирует электромагнитный момент. Для получения максимального электромагнитного момента должно выполняться условие $i_d = 0$, тем самым получается, что фазовый сдвиг между потокоцеплениями ротора и статора должен быть равен 90° [8].

Для перехода от трехфазной системы к двухфазной (декартовой) применяются преобразования Кларка:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Если учесть, что система сбалансирована, то сумма трех токов равна нулю:

$$i_A + i_B + i_C = 0 \quad (7)$$

и уравнение (6) может быть упрощено:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & \sqrt{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Для перехода от неподвижной двухфазной системы координат α - β к вращающейся системе координат d - q , ориентированной по вектору потокосцепления ротора $\bar{\psi}_r$, применяются преобразования Парка:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где φ – электрический угол поворота ротора.

Обратное преобразование Парка используется для преобразования вращающейся системы d - q в стационарную систему α - β . Данное преобразование используется в блоке координатных преобразований БКП 1 (см. рисунок 1) опорных напряжений для модуляции блока ШИМ. Обратное преобразование Парка имеет вид:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Реализация опорного вектора напряжения. Согласно рисунку 1 алгоритм полеориентированного управления электродвигателем выдает два вектора напряжения статора в неподвижной двухфазной системе координат u_α и u_β .

Для реализации вектора напряжения статора $\bar{U}_S$ применяются восемь базовых векторов: шесть ненулевых – $\bar{V}_1, \bar{V}_2, \dots, \bar{V}_6$ – и два нулевых – $\bar{V}_0$ и $\bar{V}_7$ (рисунок 2).

Опорный вектор напряжения $\bar{U}_S$ при векторной широтно-импульсной модуляции (ШИМ) реализуется путем расчета времени включения базовых векторов в течение периода ШИМ. От угла δ (см. рисунок 2) зависит, в каком секторе расположен опорный вектор $\bar{U}_S$ и, следовательно, какие базовые векторы будут применяться для его определения (таблица 1).

Вектор напряжения статора может быть реализован путем генерации оцененных длительностей основных векторов в течение периода ШИМ. Набор используемых базовых векторов зависит от сектора угла, в котором расположен реализуемый вектор [10].

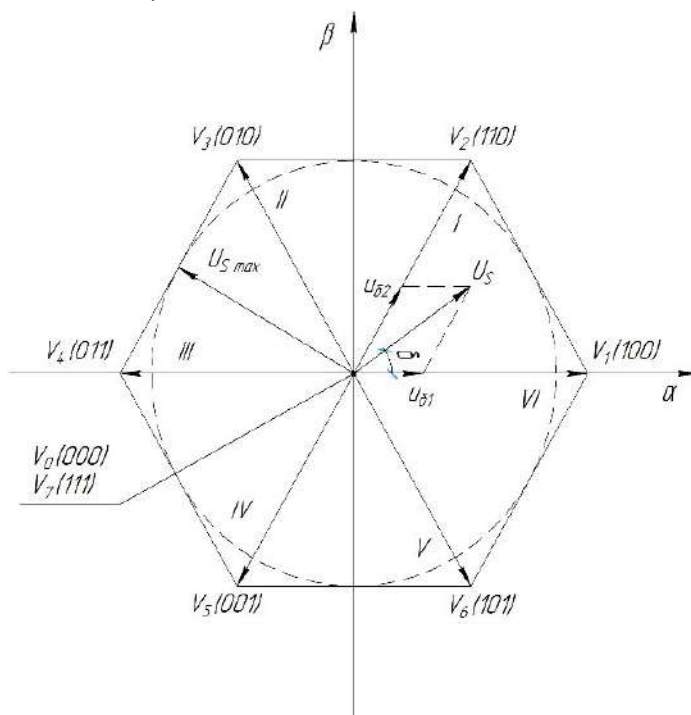


Рисунок 2 – Определение опорного вектора напряжения $\bar{U}_S$ в неподвижной системе координат α - β .

Таблица 1 – Зависимость используемых базовых векторов от сектора расположения опорного вектора $\overline{U}_s$

Номер сектора	Электрические градусы	Используемые векторы
I	0...60	$\overline{V}_1, \overline{V}_2, \overline{V}_0, \overline{V}_7$
II	60...120	$\overline{V}_2, \overline{V}_3, \overline{V}_0, \overline{V}_7$
III	120...180	$\overline{V}_3, \overline{V}_4, \overline{V}_0, \overline{V}_7$
IV	180...240	$\overline{V}_4, \overline{V}_5, \overline{V}_0, \overline{V}_7$
V	240...300	$\overline{V}_5, \overline{V}_6, \overline{V}_0, \overline{V}_7$
VI	300...360	$\overline{V}_6, \overline{V}_1, \overline{V}_0, \overline{V}_7$

Результаты моделирования системы векторного управления электродвигателем с аксиальным магнитным потоком (АМП).

Для моделирования системы векторного управления взят электродвигатель с АМП, имеющий параметры, указанные в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики испытуемого электродвигателя с АМП

Наименование параметра	Значение параметра
Номинальная мощность P , кВт	30
Номинальная скорость ω , об/мин	6000
Номинальное напряжение U , В	187
Номинальный ток I , А	113,5
Электромагнитный момент M , Н·м	47,7
Число полюсов p	8
Номинальная частота питающей сети f , Гц	400
Постоянное сопротивление обмоток статора R_s , мОм	19,35
Момент инерции ротора J , кг·м ²	$5,86 \cdot 10^{-3}$
Индуктивность статора по осям d и q L_{sd}, L_{sq} , мкГн	100

Режим холостого хода.

Сначала проведено моделирование системы без механической нагрузки на валу электродвигателя, т. е. в режиме холостого хода. Чтобы преодолеть момент инерции ротора, был приложен опорный момент $M_{оп} = 7 \text{ Н} \cdot \text{м}$. После достижения установившегося режима работы электродвигателя опорный момент $M_{оп} = 0 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

На рисунке 3 показаны временные диаграммы опорного $M_{оп}$ и электромагнитного M моментов при работе системы управления в режиме холостого хода. Несложно заметить, что электромагнитный момент двигателя следует за заданным опорным моментом лишь небольшой отрезок времени. После этого электромагнитный момент двигателя снижается примерно до $2,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$, что соответствует окончанию переходного процесса, т. е. когда угловое ускорение двигателя с АМП уменьшается до нуля, а создаваемый электромагнитный момент зависит исключительно от сил трения системы.

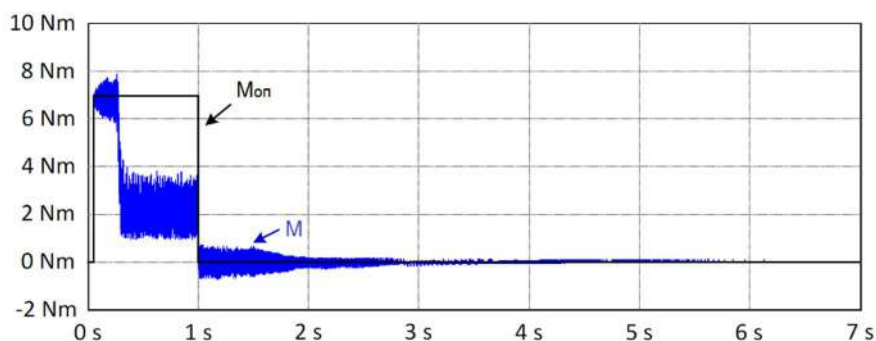


Рисунок 3 – Временной график задания опорного момента $M_{оп}$ и выходной характеристики электромагнитного момента M при работе электродвигателя с АМП в режиме холостого хода

На рисунке 4 показаны временные диаграммы опорного $I_{q\text{оп}}$ и полученного тока статора I_q .

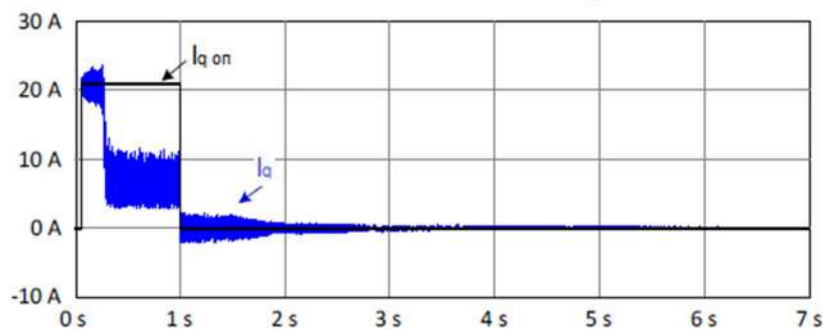


Рисунок 4 – Временной график задания опорного тока статора $I_{q\text{оп}}$ и выходной характеристики тока статора I_q при работе электродвигателя с АМП в режиме холостого хода

После анализа рисунков 3 и 4 становится очевидно, что выходные характеристики тока статора I_q и электромагнитного момента M аналогичны, что в свою очередь подтверждает, что электромагнитный момент M прямо пропорционален току статора I_q .

На рисунке 5 продемонстрирован график скорости вращения ротора электродвигателя с АМП в режиме холостого хода, на основе которого можно сделать вывод о быстродействии системы управления двигателем, которая позволяет достичь установившегося режима работы примерно за 0,2 с.

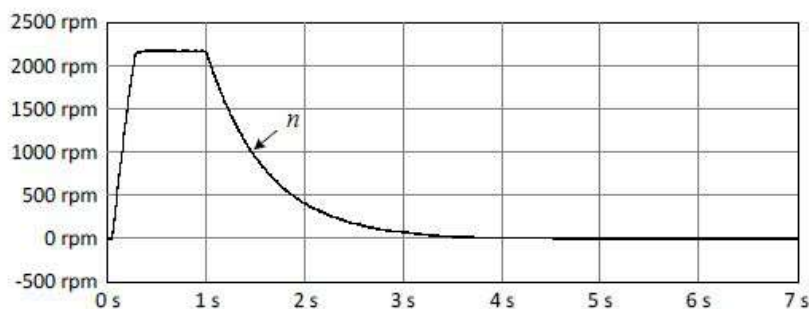


Рисунок 5 – График скорости электродвигателя с АМП в режиме холостого хода

Графики напряжений (u_{AB}, u_{BC}, u_{CA}) и токов (i_A, i_B, i_C) двигателя с АМП при установившемся состоянии работы в режиме холостого хода показаны на рисунке 6. Действующее значение напряжения составляет 62,5 В, а действующее значение тока статора – 5,9 А.

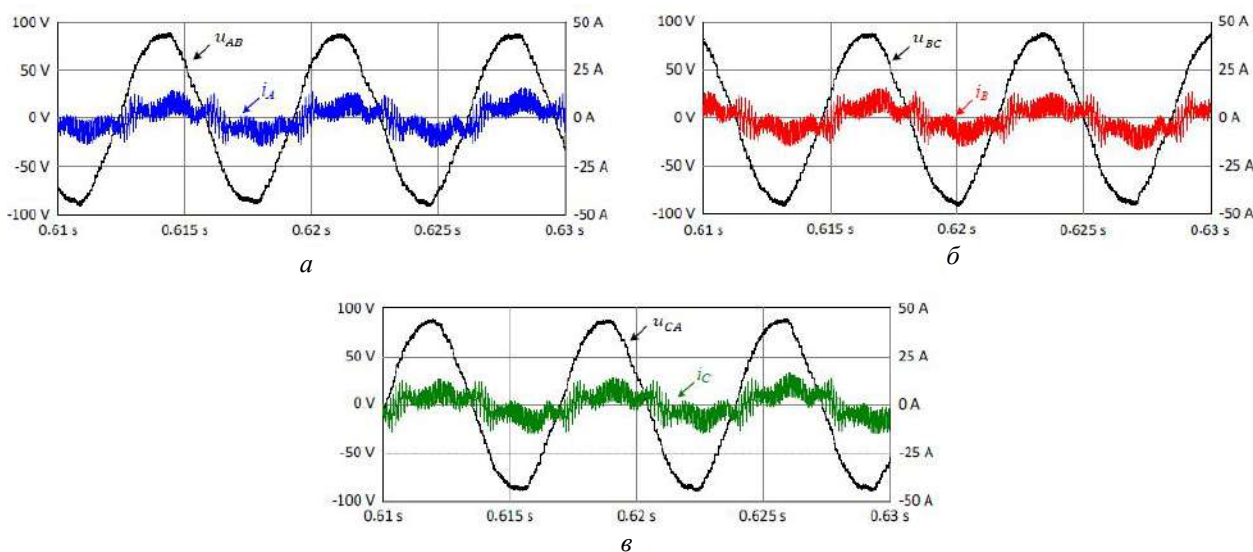


Рисунок 6 – Графики напряжений и токов электродвигателя с АМП, управляемого векторной системой, в режиме холостого хода: u_{AB} и i_A (а); u_{BC} и i_B (б); u_{CA} и i_C (в)

Режим работы электродвигателя при полной механической нагрузке.

Моделирование работы векторной системы управления электродвигателем с АМП выполнялось при механическом моменте на валу ротора 47,7 Н·м. Заданный опорный момент и соответствующий ему полученный электромагнитный момент изображены на рисунке 7.

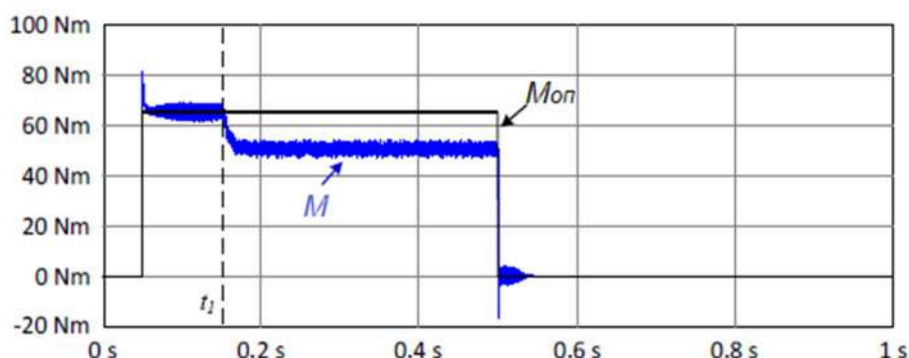


Рисунок 7 – Временной график задания опорного момента $M_{оп}$ и выходной характеристики электромагнитного момента M при работе электродвигателя с АМП в режиме номинальной нагрузки

Из графика, представленного на рисунке 7, видно, что электромагнитный момент совпадает с опорным моментом до момента времени t_1 , в течение которого электромагнитный момент двигателя равен сумме момента от углового ускорения и момента от сил трения системы. После момента времени t_1 электромагнитный момент двигателя становится равным моменту механической нагрузки. Затем, когда опорный момент стал равен нулю, электромагнитный момент двигателя тоже стал равен нулю.

График изменения скорости электродвигателя во времени при его работе с полной механической нагрузкой (47,7 Н·м) изображен на рисунке 8, результат анализа которого показывает, что электродвигатель с АМП способен достичь скорости 2970 об/мин за 0,1 с.

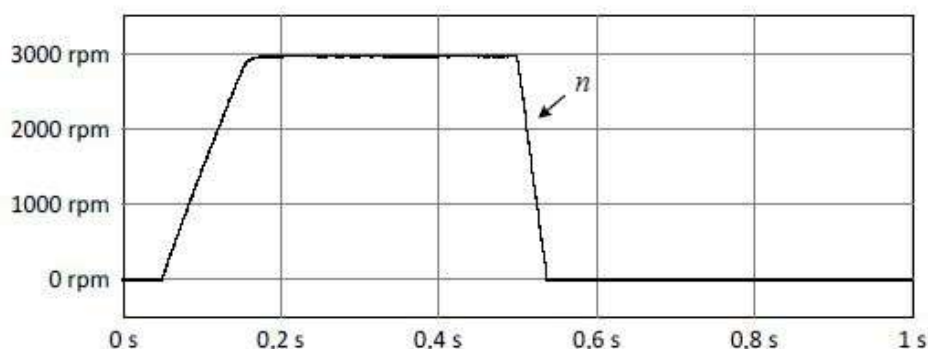


Рисунок 8 – График скорости электродвигателя с АМП при номинальной нагрузке

Графики напряжений (u_{AB}, u_{BC}, u_{CA}) и токов (i_A, i_B, i_C) двигателя с АМП при полной механической нагрузке показаны на рисунке 9.

Действующее значение напряжения на рисунке 9 составляет 95,3 В, а действующее значение тока статора – 108,4 А. Пульсирующие значения токов обуславливаются частотой коммутации преобразователя питающей электродвигателя сети (частота питающей электродвигателя сети 200 Гц при частоте коммутации преобразователя всего 8 кГц). При этом, если сравнивать уровень пульсаций токов при работе электродвигателя с полной механической нагрузкой и при режиме холостого тока, то наблюдается значительное их снижение, что в свою очередь связано с большим значением уровня действующего тока (108,4 А по сравнению с 5,9 А).

В данной статье описана система векторного управления электродвигателем с аксиальным магнитным потоком, а также приведены результаты компьютерного моделирования работы векторной системы управления при холостом ходе и при полной механической нагрузке двигателя.

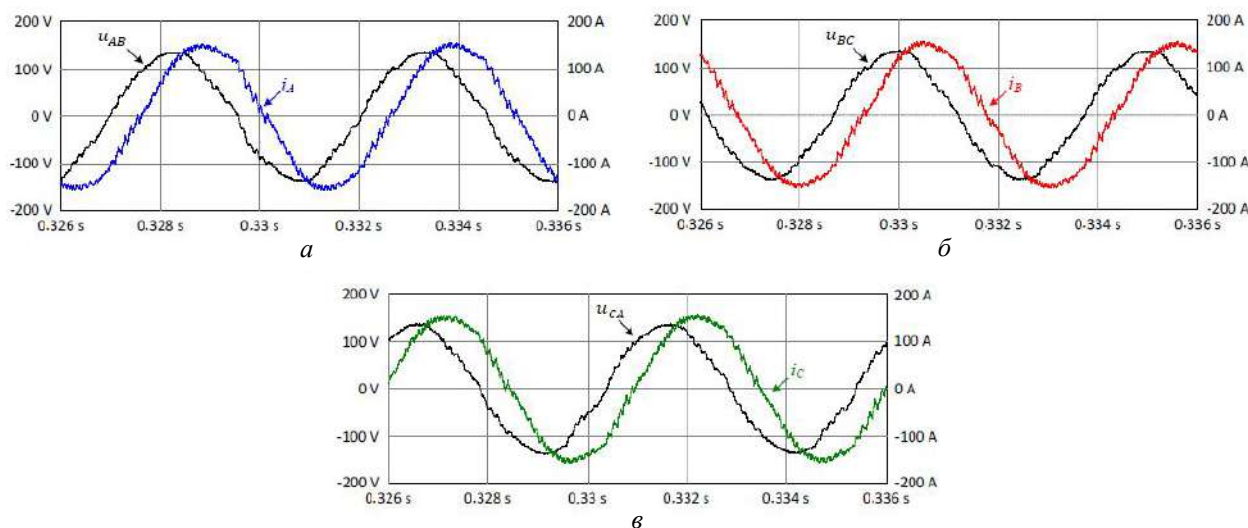


Рисунок 9 – График напряжений и токов электродвигателя с АМП, управляемого векторной системой, в режиме полной нагрузки: u_{AB} и i_A (а); u_{BC} и i_B (б); u_{CA} и i_C (в)

На основе анализа результатов компьютерного моделирования можно сделать вывод о том, что при векторном управлении электродвигателем с АМП наблюдается низкий уровень пульсаций электромагнитного момента при холостом режиме работы и при полной механической нагрузке двигателя. Формы сигналов, полученные от токов и напряжений статора, имеют некоторую пульсацию вследствие низкой частоты коммутации применяемого трехфазного преобразователя.

Список литературы

1. R. Di Stefano and F. Marignetti, «Electromagnetic analysis of axial flux permanent magnet synchronous machines with fractional windings with experimental validation», *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 6, pp. 2573–2582, Jun. 2012.
2. Анучин, А. С. Системы управления электроприводов : учебник / А. С. Анучин. – Москва : МЭИ, 2015. – 373 с. – Текст : непосредственный.
3. Hendershot J.R. and Miller T.J.E. Design of Brushless Permanent-Magnet Motors. Motor Design Books LLC Publ., 2010, 822 p.
4. M. Abassi, A. Khlaief, O. Saadaoui, A. Chaari and M. Boussak, «Performance analysis of FOC and DTC for PMSM drives using SVPWM technique», *2015 16th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, Monastir, 2015, pp. 228-233.
5. L. Tang, L. Zhong, M. F. Rahman, Y. Hu, «A Novel Direct Torque Control for Interior Permanent-Magnet Synchronous Machine Drive With Low Ripple in Torque and Flux – A Speed-Sensorless Approach», *IEEE Trans. Ind. Application.*, vol. 39, no. 6, pp. 1748-1756, Nov. 2003.
6. Калачев, Ю. Н. Векторное регулирование (заметки практика) / Ю. Н. Калачев. – Москва : ЭФО, 2013. – 72 с. – Текст : непосредственный.
7. Gieras J.F., Wang R-J, Kamper M.J. Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines, Springer Science Publ., 2008, 362 p.
8. D. Pedrosa, J. Carvalho, H. Gonçalves, V. Monteiro, A. Fernandes and J. L. Afonso, «Field oriented control of an axial flux permanent magnet synchronous motor for traction solutions», *IECON*

2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Dallas, TX, 2014, pp. 1466-1472.

9. Лашкевич, М. М. Векторное управление электродвигателем «на пальцах» // ru.habr.com : сайт. – Текст электронный. – URL: https://geektimes.ru/company/npf_vektor/blog/269486/ (дата обращения: 17.01.2023).

10. Borisavljevic A. Limits, Modeling and Design of High-Speed Permanent Magnet Machines: The Thesis for PhD degree. Delft University of Technology of Eindhoven. *Springer Berlin, Heidelberg*, 2012, October, 218 p.

References

1. R. Di Stefano and F. Marignetti, «Electromagnetic analysis of axial flux permanent magnet synchronous machines with fractional windings with experimental validation», *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 6, pp. 2573–2582, Jun. 2012.

2. Anuchin A.S. *Sistemy upravleniya jelektroprivodov* [Electric drive control systems]. Moscow, MEI Publ., 2015, 373 p. (In Russian).

3. Hendershot J.R. and Miller T.J.E. Design of Brushless Permanent-Magnet Motors. Motor Design Books LLC Publ., 2010, 822 p.

4. M. Abassi, A. Khlaief, O. Saadaoui, A. Chaari and M. Boussak, «Performance analysis of FOC and DTC for PMSM drives using SVPWM technique», *2015 16th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, Monastir, 2015, pp. 228-233.

5. L. Tang, L. Zhong, M. F. Rahman, Y. Hu, «A Novel Direct Torque Control for Interior Permanent-Magnet Synchronous Machine Drive With Low Ripple in Torque and Flux – A Speed-Sensorless Approach», *IEEE Trans. Ind. Application.*, vol. 39, no. 6, pp. 1748-1756, Nov. 2003.

6. Kalachev Ju.N. *Vektornoe regulirovanie (zametki praktika)* [Vector regulation: practice notes]. Moscow, JeFO Publ., 2013, 72 p. (In Russian).

7. Gieras J.F., Wang R-J, Kamper M.J. Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines, Springer Science Publ., 2008, 362 p.

8. D. Pedrosa, J. Carvalho, H. Gonçalves, V. Monteiro, A. Fernandes and J. L. Afonso, «Field oriented control of an axial flux permanent magnet synchronous motor for traction solutions», *IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Dallas, TX, 2014, pp. 1466-1472.

9. Lashkevich M.M. Vektornoe upravlenie jelektroprivigatelem «na pal'cah» [Vector control of the motor «on the fingers»]. Available at: https://geektimes.ru/company/npf_vektor/blog/269486/ (accessed 17.01.2023).

10. Borisavljevic A. Limits, Modeling and Design of High-Speed Permanent Magnet Machines: The Thesis for PhD degree. Delft University of Technology of Eindhoven. *Springer Berlin, Heidelberg*, 2012, October, 218 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Малышев Андрей Владимирович

Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ).

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

Аспирант кафедры «Электротехника, электропривод и промышленная электроника», СибГИУ.

Тел.: +7 (923) 626-33-05.

E-mail: malyshev1994@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Malyshev Andrey Vladimirovich

Siberian State Industrial University (SibSIU).

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

Postgraduate student of the department «Electrical engineering, electric drive and industrial electronics», SibSIU.

Phone: +7 (923) 626-33-05.

E-mail: malyshev1994@yandex.ru

Малышев, А. В. Моделирование системы векторного управления электродвигателем с аксиальным магнитным потоком / А. В. Малышев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 1 (53). – С. 121 – 130.

Malyshev A.V. Modeling the vector control system of the axial flux permanent magnet motor. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 1 (53), pp. 121-130 (In Russian).

УДК 621.314.25

Ю. В. Москалев

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

АНАЛИЗ СХЕМ СОЕДИНЕНИЯ ТРЕХФАЗНЫХ ВЕНТИЛЬНЫХ ОБМОТОК ВЫПРЯМИТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Аннотация. В статье рассмотрены различные схемы соединения трехфазных вентильных обмоток выпрямительного трансформатора, которые позволяют обеспечить необходимые значения начальных фаз линейных напряжений для работы эквивалентной многофазной схемы выпрямления. У трансформатора двенадцатипульсового выпрямителя две вентильные обмотки соединены «звездой» и «треугольником», при этом углы между одноименными линейными напряжениями составляют тридцать градусов. Для увеличения пульсности выпрямителя необходимые углы между линейными напряжениями вентильных обмоток обеспечиваются за счет соединения этих обмоток «зигзагом», «многоугольником» или «треугольником с продолженными сторонами». Каждая из таких трехфазных обмоток состоит из шести катушек, размещенных по две на каждом из трех стержней сердечника трансформатора, три катушки на разных стержнях выполняют с одинаковым направлением намотки и количеством витков. При этом возможны различные варианты соединения катушек вентильной обмотки, для которых будут получены схемы соединения «зигзаг», «многоугольник» или «треугольник с продолженными сторонами», например, прямой и обратный «зигзаг». В статье рассмотрены различные варианты соединения трехфазных вентильных обмоток – «зигзаг», «многоугольник» или «треугольник с продолженными сторонами», приведены расчетные выражения для определения количества витков катушек этих обмоток при различных значениях начальной фазы линейных напряжений. Выполнено сравнение массы обмоточного провода, который необходим для изготовления катушек вторичной обмотки выпрямительного трансформатора с различными схемами соединения. Представлены векторные диаграммы для рассмотренных схем соединения вентильных обмоток. Наименьший расход обмоточного провода (при сравнении трех рассмотренных схем соединения) будет при соединении катушек вторичных вентильных обмоток «треугольником с продолженными сторонами».

Ключевые слова: выпрямительный трансформатор, трехфазная вентильная обмотка, схема соединения, «зигзаг», «многоугольник», «треугольник с продолженными сторонами».

Yuriy V. Moskaev

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

THREE-PHASE SECONDARY WINDINGS SCHEMES ANALYSIS OF RECTIFIER TRANSFORMER

Abstract. The article discusses various connection schemes of three-phase valve windings of a rectifier transformer, which allow providing the necessary values of the initial phases of linear voltages for the operation of an equivalent multiphase rectifier circuit. In the transformer of a twelve-pulse rectifier, two valve windings are connected by a "star" and a "triangle", while the angles between the linear voltages of the same name are thirty degrees. To increase the pulses amount of the rectifier, the necessary angles between the linear voltages of the valve windings are provided by connecting these windings with a "zigzag", "polygon" or "triangle with extended sides". Each of these three-phase windings consists of six coils placed two on each of the three rods of the transformer core, three coils on different rods are performed with the same winding direction and number of turns. At the same time, various options for connecting the coils of the winding are possible, for which connection schemes "zigzag", "polygon" or "triangle with extended sides" will be obtained, for example, a straight and reverse "zigzag". The article discusses various options for connecting three-phase valve windings "zigzag", "polygon" or "triangle with extended sides", calculation expressions are given to determine the number of coils

of these windings at different values of the initial phase of linear voltages. The comparison of the mass of the winding wire, which is necessary for the manufacture of coils of the secondary winding of a rectifier transformer with various connection schemes, is carried out. Vector diagrams for the considered connection schemes of windings are presented. The lowest consumption of the winding wire (when comparing the three connection schemes considered) will be when connecting the coils of the secondary valve windings with a "triangle with extended sides".

Keywords: rectifier transformer, three-phase valve winding, connection diagram, "zigzag", "polygon", "triangle with extended sides".

Повышение энергетической эффективности и улучшение электромагнитной совместимости выпрямителей и инверторов с питающей сетью можно обеспечить за счет увеличения пульсности преобразователя [1 – 7].

У выпрямительных трансформаторов эквивалентной многофазной схемы выпрямления (ЭМСВ) обычно изготавливают несколько трехфазных вторичных обмоток, что позволяет обеспечить оптимальную длительность протекания тока в катушках каждой из этих обмоток [1]. При этом одноименные линейные напряжения трехфазных вентильных обмоток, к которым подключаются трехфазные мостовые схемы выпрямления, должны быть смещены между собой на угол $360/p$, где p – пульсность выпрямителя ($p = 12, 18, 24, \dots$).

Если принять, что начальная фаза линейного напряжения U_{ab} трехфазной вентильной обмотки, соединенной «треугольником», равна нулю, то для реализации ЭМСВ с любым заданным значением пульсности p начальные фазы одноименных линейных напряжений других трехфазных вентильных обмоток трансформатора должны находиться в диапазоне от 0 до ± 60 градусов.

При $p = 12$ линейные напряжения вентильной обмоткой, соединенной «звездой», смещены на ± 30 градусов относительно одноименных линейных напряжений обмотки, соединенной «треугольником». При $p > 12$ для получения заданного угла сдвига между одноименными линейными напряжениями трехфазные вентильные обмотки трансформатора ЭМСВ необходимо соединять «зигзагом», «многоугольником», «треугольником с продолженными сторонами» [2, 7 – 10]. Каждая из таких трехфазных обмоток состоит из шести катушек, размещенных по две на каждом из трех стержней сердечника трансформатора, при этом три катушки на разных стержнях выполняют с одинаковым направлением намотки и количеством витков (рисунок 1).

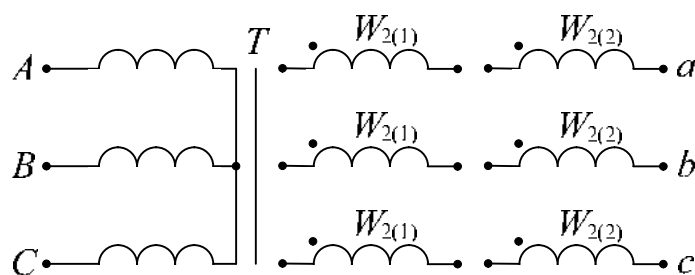


Рисунок 1 – Схема размещения катушек трансформатора

Для сравнения схем «зигзаг», «многоугольник», «треугольник с продолженными сторонами» определим необходимое количество витков $W_{2(1)}$ и $W_{2(2)}$ катушек, при которых будет обеспечены заданные начальные фазы и одинаковые действующие значения линейных напряжений обмоток.

При анализе приняты следующие допущения: трансформатор идеальный, первичная обмотка трансформатора подключена к сети с симметричным трехфазным напряжением, магнитные потоки синусоидальные с одинаковым амплитудным значением, потоки в стержнях смещены между собой по фазе на 120 градусов, обмотки изготовлены из одного материала, их катушки имеют одинаковую среднюю длину витка.

На рисунке 2 приведены схемы замещения вторичной обмотки выпрямительного трансформатора, соединенной «зигзагом».

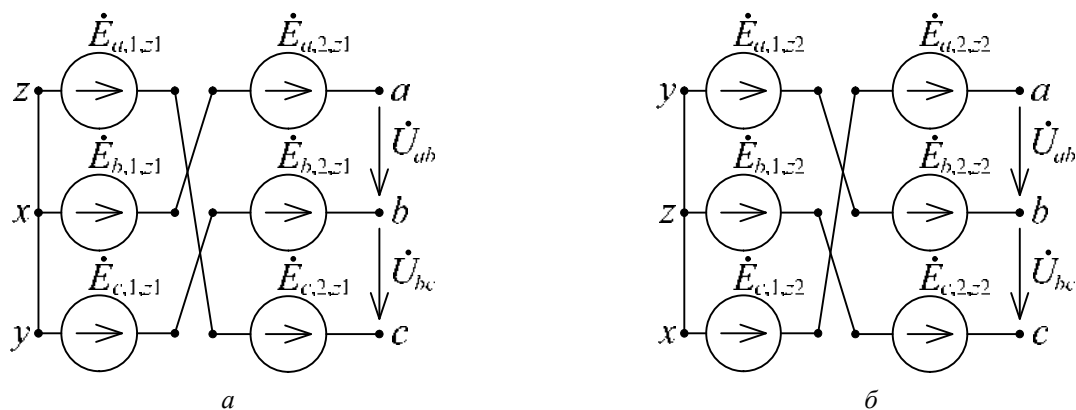


Рисунок 2 – Схемы замещения вторичной вентильной обмотки, соединенной «зигзагом»

С использованием второго закона Кирхгофа для схемы замещения, приведенной на рисунке 2, а, составлена система уравнений:

$$\begin{cases} \dot{U}_{ab} = \dot{E}_{a,2,1} - \dot{E}_{b,2,1} + \dot{E}_{b,1,1} - \dot{E}_{c,1,1}; \\ \dot{U}_{bc} = \dot{E}_{b,2,1} - \dot{E}_{c,2,1} + \dot{E}_{c,1,1} - \dot{E}_{a,1,1}; \\ \dot{U}_{ca} = \dot{E}_{c,2,1} - \dot{E}_{a,2,1} + \dot{E}_{a,1,1} - \dot{E}_{b,1,1}. \end{cases} \quad (1)$$

Систему уравнений (1) можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} E_{2,1} - E_{2,1}a^2 + E_{1,1}a^2 - E_{1,1}a = U_{ab}e^{j\varphi}; \\ E_{2,1}a^2 - E_{2,1}a + E_{1,1}a - E_{1,1} = U_{ab}e^{j(\varphi-2\pi/3)}; \\ E_{2,1}a - E_{2,1} + E_{1,1} - E_{1,1}a^2 = U_{ab}e^{j(\varphi+2\pi/3)}, \end{cases} \quad (2)$$

где a – комплексный оператор поворота, $a = -0,5 + j0,866$;

$E_{1,1}, E_{2,1}$ – действующие значения ЭДС первой и второй катушек, размещенных на каждом стержне сердечника трансформатора, В.

Уравнения, входящие в систему (2), тождественны между собой, при умножении второго и третьего уравнения на комплексные операторы поворота a и a^2 соответственно будет получено первое уравнение этой системы.

Первое уравнение системы (2) можно записать следующим образом:

$$3E_{2,1} + j\sqrt{3}(E_{2,1} - 2E_{1,1}) = 2U_{ab}e^{j\varphi}. \quad (3)$$

Решением уравнения (3) являются выражения:

$$E_{1,1} = \frac{U_{ab}}{\sqrt{3}} \frac{2}{\sqrt{3}} \cos(\varphi + \pi/3); \quad (4)$$

$$E_{2,1} = \frac{U_{ab}}{\sqrt{3}} \frac{2}{\sqrt{3}} \cos(\varphi). \quad (5)$$

При расчете ЭДС с использованием выражений (4) и (5) могут быть получены отрицательные значения, в этом случае ЭДС этих катушек направлено встречно условно выбранному направлению (см. рисунок 2, а). Это также необходимо учитывать при соединении катушек вторичной обмотки трансформатора (см. рисунок 1).

С использованием выражений (4) и (5) можно определить необходимое количество витков каждой катушки для схемы соединения «зигзагом» (см. рисунок 2, а):

$$W_{1,1} = W_Y \frac{2}{\sqrt{3}} |\cos(\varphi + \pi/3)|; \quad (6)$$

$$W_{2.1} = W_Y \frac{2}{\sqrt{3}} |\cos(\varphi)|, \quad (7)$$

где W_Y – количество витков катушки вентильной обмотки, соединенной «звездой».

Аналогично получены расчетные выражения для определения необходимого количества витков катушек трехфазной обмотки, схема замещения которой приведена на рисунке 2, б:

$$W_{1.2} = W_Y \frac{2}{\sqrt{3}} |\sin(\varphi - \pi/6)|; \quad (8)$$

$$W_{2.2} = W_Y \frac{2}{\sqrt{3}} |\sin(\varphi + \pi/6)|. \quad (9)$$

При соединении вентильной обмотки «многоугольником» возможны различные варианты подключения катушек вторичной обмотки трансформатора. Схемы замещения трехфазных обмоток, соединенных «многоугольником», приведены на рисунке 3.

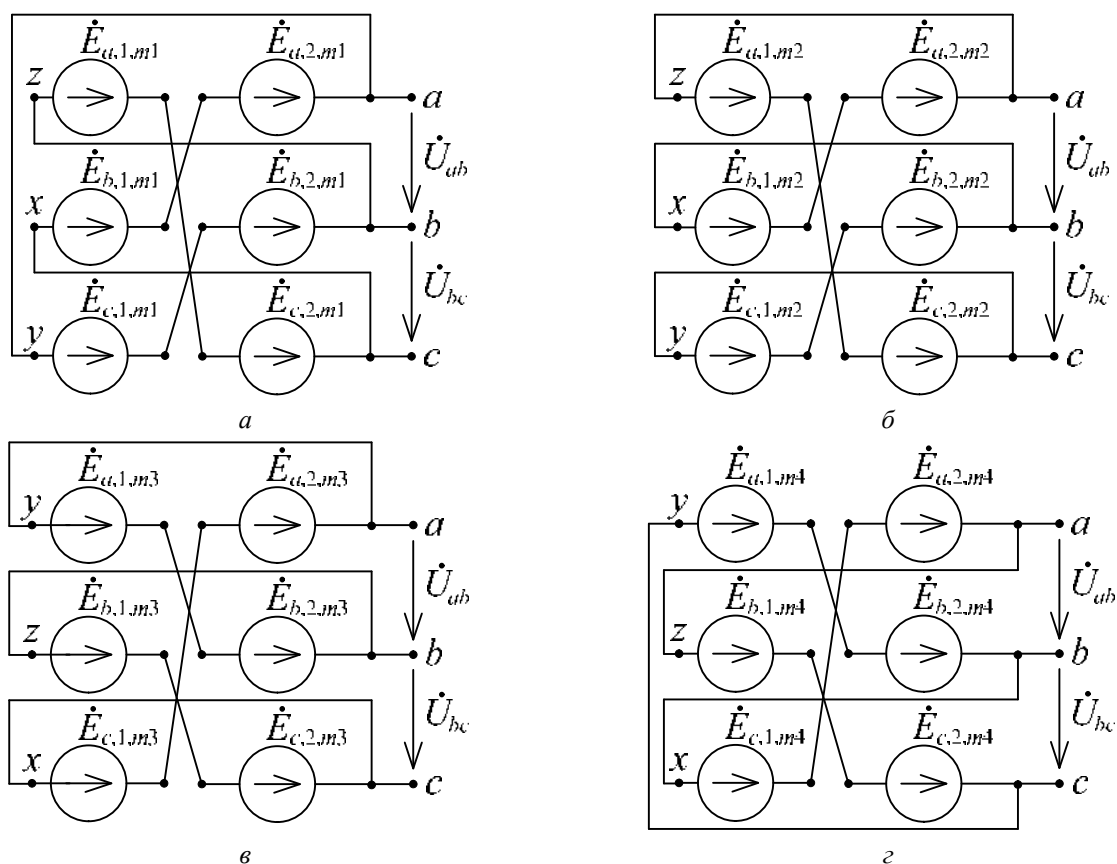


Рисунок 3 – Схемы замещения вторичной вентильной обмотки, соединенной «многоугольником»

Расчетные выражения для определения необходимого количества витков обмоток, соединенных «многоугольником» (см. рисунок 3), приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Расчетные выражения для определения числа витков катушек трехфазной вентильной обмотки, соединенной «многоугольником»

Схема замещения	Число витков $W_{2(1)}$	Число витков $W_{2(2)}$
Рисунок 3, а	$W_{1.m1} = 2W_Y \cos(\varphi + \pi/6) $	$W_{2.m1} = 2W_Y \cos(\varphi - \pi/6) $
Рисунок 3, б	$W_{1.m2} = 2W_Y \cos(\varphi + \pi/2) $	$W_{2.m2} = 2W_Y \cos(\varphi + \pi/6) $
Рисунок 3, в	$W_{1.m3} = 2W_Y \sin(\varphi - \pi/3) $	$W_{2.m3} = 2W_Y \sin(\varphi) $
Рисунок 3, г	$W_{1.m4} = 2W_Y \sin(\varphi) $	$W_{2.m4} = 2W_Y \sin(\varphi + \pi/3) $

Рассмотрим различные варианты соединения катушек вторичной обмотки, обеспечивающие формирование схемы «треугольник с продолженными сторонами». Схемы замещения обмоток, соединенных «треугольником с продолженными сторонами», приведены на рисунке 4.

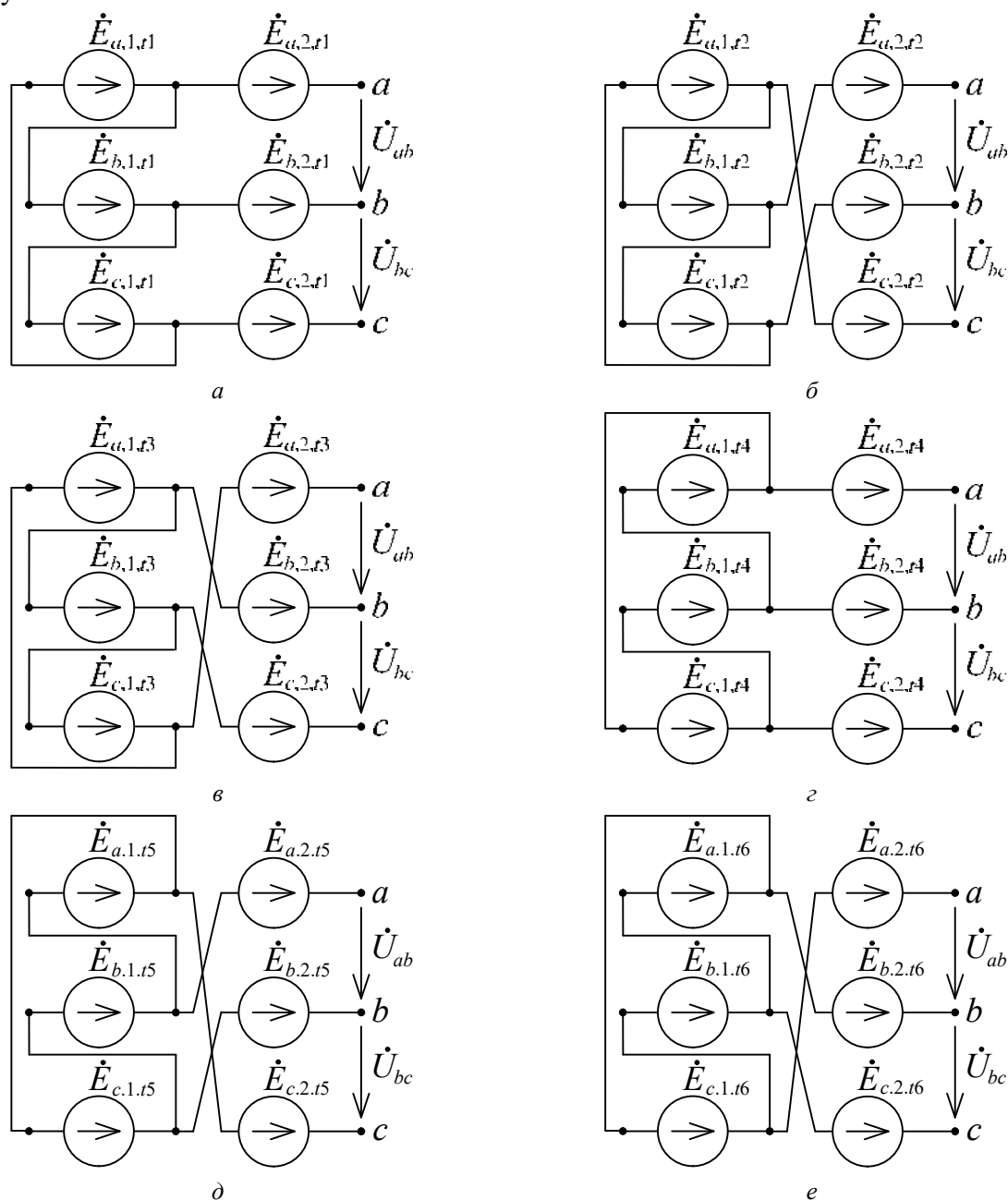


Рисунок 4 – Схемы замещения вторичной вентильной обмотки, соединенной «треугольником с продолженными сторонами»

Расчетные выражения для определения необходимого количества витков катушек, соединенных «треугольником с продолженными сторонами» (см. рисунок 4), приведены в таблице 2.

По известному количеству витков катушек каждой из рассмотренных схем соединения трехфазной обмотки можно определить массу обмоточного провода, который необходим для формирования вентильной обмотки, кг:

$$m = 3\rho l_{\text{вит}} (W_1 S_{\text{обм.1}} + W_2 S_{\text{обм.2}}), \quad (10)$$

где ρ – плотность материала обмоточного провода, кг/м^3 ;

$l_{\text{вит}}$ – средняя длина витка катушки обмотки, м;

$S_{\text{обм}}$ – площадь поперечного сечения обмоточного провода, м².

Таблица 2 – Расчетные выражения для определения числа витков катушек вентильной обмотки, соединенной «треугольником с продолженными сторонами»

Схема замещения	Число витков $W_{2(1)}$	Число витков $W_{2(2)}$
Рисунок 4, а	$W_{1.1} = 2\sqrt{3}W_Y \sin(\varphi - \pi/6) $	$W_{2.1} = 2W_Y \cos(\varphi + \pi/6) $
Рисунок 4, б	$W_{1.2} = \sqrt{3}W_Y \cos(\varphi + \pi/3) $	$W_{2.2} = W_Y \sin(\varphi + \pi/3) $
Рисунок 4, в	$W_{1.3} = 2\sqrt{3}W_Y \sin(\varphi - \pi/6) $	$W_{2.3} = 2W_Y \sin(\varphi) $
Рисунок 4, г	$W_{1.4} = 2\sqrt{3}W_Y \cos(\varphi + \pi/3) $	$W_{2.4} = 2W_Y \sin(\varphi) $
Рисунок 4, д	$W_{1.5} = 2\sqrt{3}W_Y \cos(\varphi + \pi/3) $	$W_{2.5} = 2W_Y \cos(\varphi + \pi/6) $
Рисунок 4, е	$W_{1.6} = \sqrt{3}W_Y \sin(\varphi - \pi/6) $	$W_{2.6} = W_Y \sin(\varphi + \pi/3) $

Масса обмоточного провода вентильной обмотки, соединенной «звездой»,

$$m_Y = 3\rho l_{\text{вит}} W_Y S_Y. \quad (11)$$

При одинаковых значениях длины витка катушки, площади поперечного сечения и материала, из которого изготовлен обмоточный провод, с использованием выражений (10) и (11) можно определить, во сколько раз масса обмоточного провода трехфазной обмотки, соединенной «зигзагом», будет больше, чем у вентильной обмотки, соединенной «звездой»:

$$\frac{m_z}{m_Y} = \frac{3\rho l_{\text{вит}} S_Y (W_1 + W_2)}{3\rho W_Y l_{\text{вит}} S_Y} = \frac{W_{1.z} + W_{2.z}}{W_Y}. \quad (12)$$

При допущении, что сечение обмоточного провода катушек, соединенных «многоугольником», S_m в $\sqrt{3}$ раз меньше, чем сечение провода катушек, соединенных «звездой», $S_Y = \sqrt{3}S_m$, соотношение масс обмоточного провода схемы «многоугольник» (см. рисунок 3) и «звезда» будет таким:

$$\frac{m_m}{m_Y} = \frac{3\rho l_{\text{вит}} S_m (W_1 + W_2)}{3\rho W_Y l_{\text{вит}} S_Y} = \frac{W_{1.m} + W_{2.m}}{\sqrt{3}W_Y}. \quad (13)$$

Если принять, что сечение обмоточного провода катушек схемы «треугольник с продолженными сторонами», соединенных «треугольником», S_t в $\sqrt{3}$ раз меньше ($S_t = S_Y / \sqrt{3}$), а сечение провода катушек – продолжений сторон треугольника – равно сечению провода катушек, соединенных «звездой» ($S'_t = S_Y$), то соотношение масс обмоточного провода схем «треугольник с продолженными сторонами» (см. рисунок 3) и «звезда» будет таким:

$$\frac{m_t}{m_Y} = \frac{3\rho l_{\text{вит}} (W_{1.t} S_{1.t} + W_{2.t} S_{2.t})}{3\rho W_Y l_{\text{вит}} S_Y} = \frac{W_{1.t} / \sqrt{3} + W_{2.t}}{W_Y}. \quad (14)$$

На рисунках 4 – 6 приведены графики зависимостей $m(\varphi) / m_Y$ для различных схем соединения трехфазной обмотки в диапазоне изменения угла φ линейного напряжения U_{ab} от 0 до 60 градусов, построенные с использованием расчетных выражений (6) – (9), (12) – (14) и формул в таблицах 1 и 2.

Из графиков, приведенных на рисунках 5 – 7, можно видеть, что наименьший расход обмоточного провода будет при соединении трехфазной вентильной обмотки «треугольником с продолженными сторонами». На рисунке 8 приведены графики зависимости $m(\varphi) / m_Y$ для трехфазной обмотки, соединенной «треугольником с продолженными сторонами», которым

соответствуют схемы замещения (см. рисунки 4, в, г) при $0 \leq \varphi \leq 30$ и схемы замещения (см. рисунки 4, а, д) при $30 < \varphi \leq 60$.

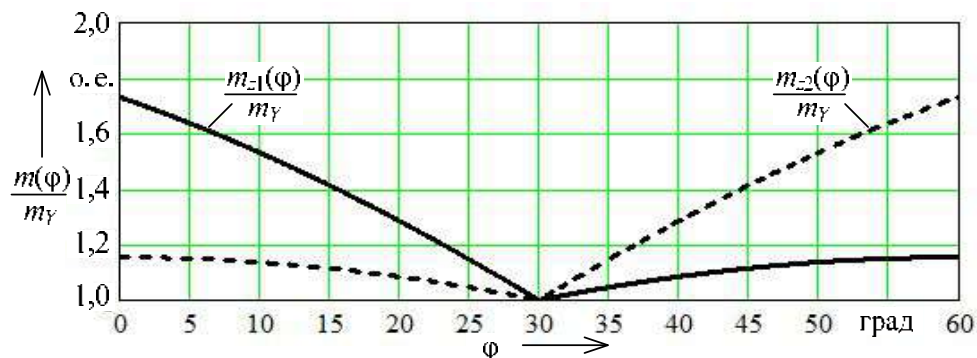


Рисунок 5 – Графики зависимости $m_z(\varphi) / m_\gamma$ для схемы соединения «зигзаг»

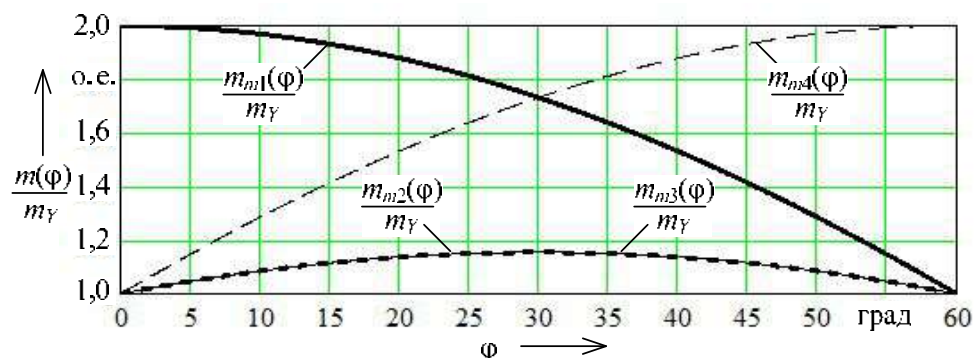


Рисунок 6 – Графики зависимости $m_m(\varphi) / m_\gamma$ для схемы соединения «многоугольник»

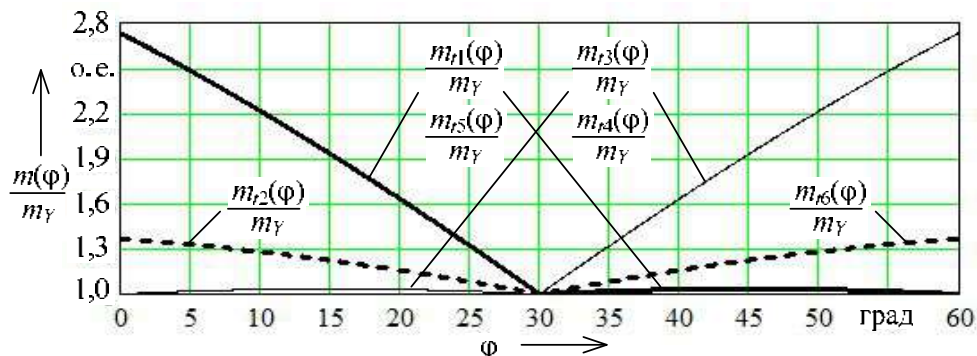


Рисунок 7 – Графики зависимости $m_t(\varphi) / m_\gamma$ для схемы соединения «треугольник с продолженными сторонами»

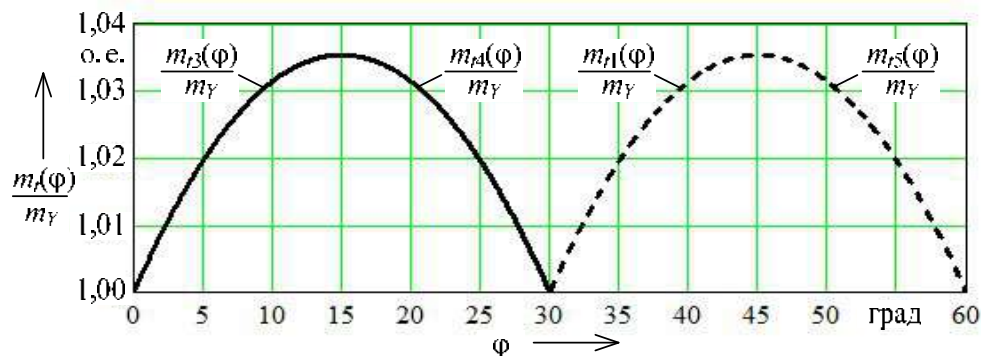


Рисунок 8 – Графики зависимости $m_t(\varphi) / m_\gamma$ для схемы трехфазной вентильной обмотки с наименьшей массой обмоточного провода

В качестве примера рассмотрим ЭМСВ с $p=36$. В этом случае у специального трансформатора будет шесть трехфазных вентильных обмоток, две из них соединены «звездой»

и «треугольником», а четыре обмотки должны быть соединены «зигзагом», «многоугольником» или «треугольником с продолженными сторонами». Угол сдвига между одноименными линейными напряжениями вентильных обмоток при $p=36$ равен 10 градусам. Масса обмоточного провода четырех трехфазных обмоток, соединенных «зигзагом» или «многоугольником», равна $4,44m_y$, четырех обмоток, соединенных «треугольником с продолженными сторонами», – $4,13m_y$. Таким образом, при соединении четырех вентильных обмоток «треугольником с продолженными сторонами» масса обмоточного провода будет меньше на 7 %, чем при соединении этих обмоток «зигзагом» или «многоугольником».

На рисунках 9 – 11 представлены схемы и векторные диаграммы вентильных обмоток, соединенных «зигзагом», «многоугольником» и «треугольником с продолженными сторонами». Все схемы позволяют обеспечить симметричные системы напряжений на выводах обмоток с одинаковыми значениями линейных напряжений (начальная фаза напряжения U_{ab} принята равной 10 градусам).

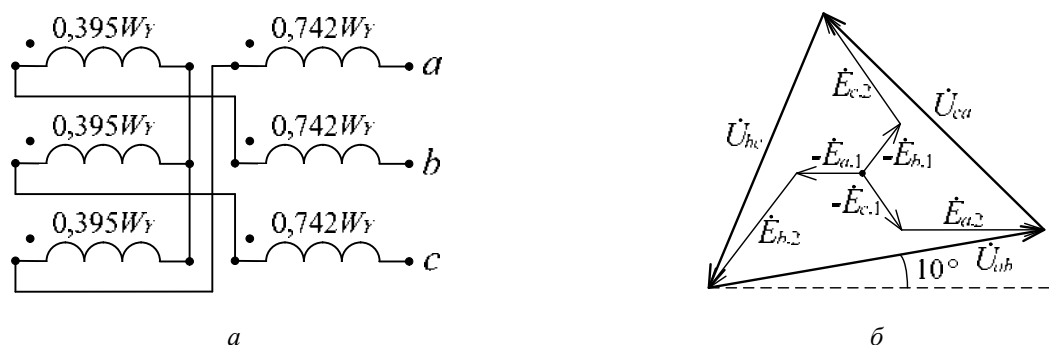


Рисунок 9 – Схема соединения и векторная диаграмма ЭДС вентильной обмотки, соединенной «зигзагом»

Количество витков катушек обмотки, соединенной «зигзагом» (рисунок 9, а), рассчитано с использованием формул (8) и (9).

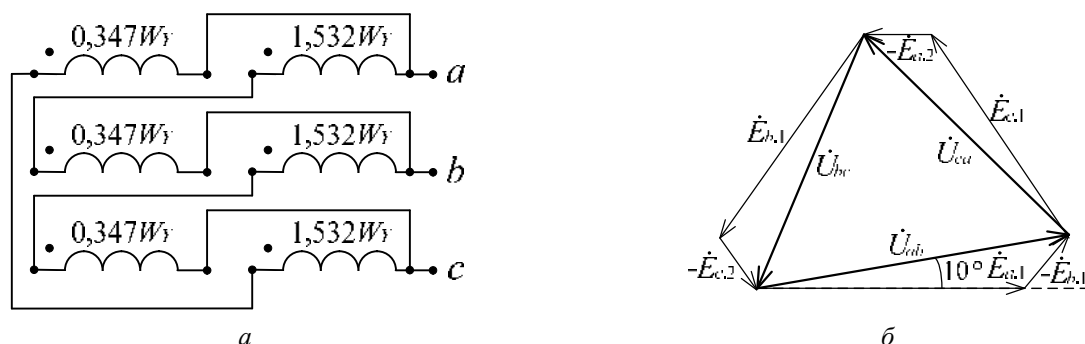


Рисунок 10 – Схема соединения и векторная диаграмма ЭДС вентильной обмотки, соединенной «многоугольником»

Количество витков катушек обмотки, соединенной «многоугольником» (рисунок 10, а), рассчитано с использованием формул в таблице 1, соответствующих рисунку 3, б.

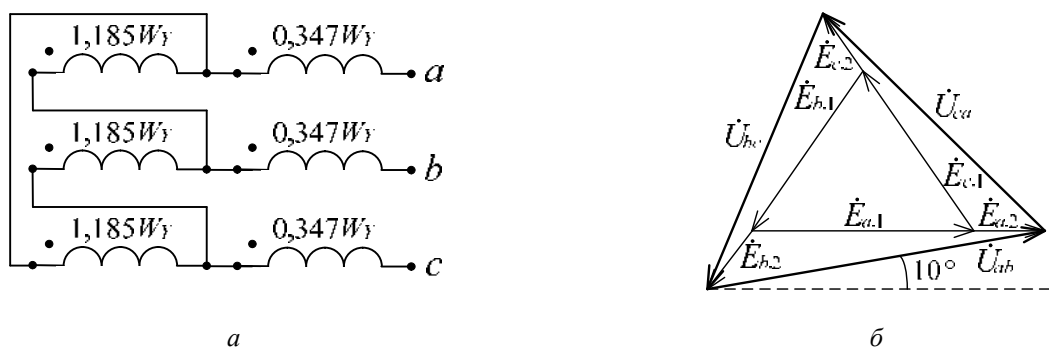


Рисунок 11 – Схема соединения и векторная диаграмма ЭДС вентильной обмотки, соединенной «треугольником с продолженными сторонами»

Количество витков катушек обмотки, соединенной «треугольником с продолженными сторонами» (рисунок 11, а), рассчитано с использованием формул в таблице 2, соответствующих рисунку 4, з.

В результате можно сделать следующие выводы.

1) Расчетные выражения для определения количества витков катушек вторичных обмоток, соединенных «зигзагом», «многоугольником», «треугольником с продолженными сторонами», могут быть использованы при проектировании активной части трансформаторов эквивалентных многофазных схем выпрямления. Анализ различных вариантов схем позволит обеспечить условия для равномерной загрузки трехфазных вентильных обмоток.

2) Выполнено сравнение массы обмоточного провода, необходимого для изготовления трехфазных вентильных обмоток, соединенных «зигзагом», «многоугольником», «треугольником с продолженными сторонами». Наименьший расход обмоточного провода (при сравнении трех рассмотренных схем) будет при соединении катушек вентильных обмоток выпрямительного трансформатора «треугольником с продолженными сторонами».

Список литературы

1. Зиновьев, Г. С. Основы силовой электроники / Г. С. Зиновьев. – Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 1999. – Ч. 1. – 199 с. – Текст : непосредственный.

2. Бадер, М. П. Электромагнитная совместимость / М. П. Бадер. – Москва : Учебно-методический кабинет МПС, 2002. – 638 с. – Текст : непосредственный.

3. Бурков, А. Т. Электронная техника и преобразователи / А. Т. Бурков. – Москва : Транспорт, 1999. – 464 с. – Текст : непосредственный.

4. Евдокимов, С. А. Структурный синтез многофазных вентильных преобразователей : монография / С. А. Евдокимов, Н. И. Щуров. – Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2010. – 424 с. – Текст : непосредственный.

5. Расчет установленных мощностей обмоток трансформаторных преобразователей числа фаз для многопульсных выпрямителей / С. В. Мятёж, Г. Н. Ворфоломеев, С. А. Евдокимов, Н. И. Щуров. – Текст : непосредственный // Электротехника. – 2005. – № 4. – С. 28–36.

6. Рогинская, Л. Э. Улучшение электромагнитной совместимости преобразовательных устройств с сетью и нагрузкой с помощью многофазных трансформаторов / Л. Э. Рогинская, А. С. Горбунов, З. И. Ялалова. – Текст : непосредственный // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2014. – № 3. – Т. 10. – С. 21–29.

7. Салита, Е. Ю. Улучшение показателей энергетической эффективности многопульсовых выпрямителей тяговых подстанций / Е. Ю. Салита, Т. В. Ковалева, Т. В. Комякова. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2017. – № 3 (31). – С. 114–123.

8. Каминский, Е. А. Звезда, треугольник, зигзаг / Е. А. Каминский. – Москва : Энергоатомиздат, 1984. – 104 с. – Текст : непосредственный.

9. Патент № 1638779 СССР, МПК H02M 7/12. Преобразователь переменного тока в постоянный : № 4686552/07 : заявлено 29.04.1989 : опубликовано 30.03.1991. Бюл. № 12 / Барковский Б. С., Магай Г. С., Маценко В. П., Пономарев А. Г., Салита Е. Ю. – 3 с.: ил. – Текст : непосредственный.

10. Патент № 1744779 СССР, МПК H02M 7/08. Преобразователь многофазного переменного напряжения в постоянное : № 4706205/07 : заявлено 15.06.1989 : опубликовано 30.06.1992. Бюл. № 24 / Фокин В. А., Фокин О. В. – 6 с.: ил. – Текст : непосредственный.

Referenses

1. Zinovev G.S. *Osnovy silovoj elektroniki* [Fundamentals of Power electronics]. Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University Publishing House, 1999, 199 p. (In Russian).

2. Bader M.P. *Elektromagnitnaya sovместimost* [Electromagnetic compatibility]. Moscow, Teaching and Methodical Cabinet MPS Publ., 2002, 638 p. (In Russian).
3. Burkov A.T. *Elektronnaya tekhnika i preobrazovateli* [Electronic equipment and converters]. Moscow, Transport Publ., 1999, 464 p. (In Russian).
4. Evdokimov S.A., Shchurov N.I. *Strukturnyj sintez mnogofaznyh ventil'nyh preobrazovatelej* [Structural synthesis of multiphase gate converters]. Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University Publ., 2010, 424 p. (In Russian).
5. Myatezh S.V., Vorfolomeev G.N., Evdokimov S.A., Shchurov N.I. Calculation transformer converters capacities windings for multi-pulse rectifiers. *Electrical engineering*, 2005, no. 4, pp. 28-36 (In Russian).
6. Roginskaya L.E., Gorbunov A.S., Yalalova Z.I. Improvement of electromagnetic compatibility of converter devices with the network and load using multiphase transformers. *Electrical and information complexes and systems*, 2014, no. 3, issue 10, pp. 21-29 (In Russian).
7. Salita E.Yu., Kovaleva T.V., Komyakova T.V. Improvement of energy efficiency indicators of multi-pulse rectifiers of traction substations. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2017, no. 3 (31), pp. 114-123 (In Russian).
8. Kaminskij E.A. *Zvezda, treugol'nik, zigzag* [Star, Triangle, Zigzag]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984, 104 p. (In Russian).
9. Barkovskij B.S., Magaj G.S., Macenko V.P., Ponomarev A.G., Salita E.Yu. *Patent SU 1638779 A1*, 30.03.1991.
10. Fokin V.A., Fokin O.V. *Patent SU 1744779 A1*, 30.06.1992.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Москалев Юрий Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: yuriyvm@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Moskalev Yuriy Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Electric machines and electrical engineering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: yuriyvm@mail.ru.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Москалев, Ю. В. Анализ схем соединения трехфазных вентильных обмоток выпрямительного трансформатора / Ю. В. Москалев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 1 (53). – С. 130 – 139.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Moskalev Yu.V. Three-phase secondary windings schemes analysis of rectifier transformer. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 1 (53), pp. 130-139 (In Russian).

В. В. Петров, А. С. Окишев, К. С. Петров

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

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАСТРОЙКИ СИСТЕМЫ МАГНИТОИНДУКЦИОННЫХ ДАТЧИКОВ ОСЕЙ ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ОСНОВЕ СТОХАСТИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Аннотация. В работе описаны результаты исследования отклонений межосевых расстояний вагонов от нормативных значений в процессе равномерного движения состава над комплектом магнитоиндукционных датчиков. Цель данной работы состоит в обосновании возможности применения стохастического подхода к автоматизации процесса настройки измерительной системы и магнитоиндукционных датчиков, входящих в ее состав, на основе статистической обработки измеренных данных и вычисления оценок случайных последовательностей (выборок) вычисленных межосевых интервалов. Любые отклонения межосевых расстояний возникают в процессе постепенного износа движущихся деталей в реальных условиях эксплуатации вагонного парка и приводят к изменению статистических оценок этих параметров подвижного состава. Представлен анализ статистических параметров эмпирических гистограмм различных типов межосевых расстояний на степень соответствия нормальному закону распределения для оценки перспективности применения одного из них для автоматической настройки измерительного тракта системы, обеспечивающей диагностирование технического состояния подвижного состава в процессе движения его над комплектом датчиков осей колесных пар. Предложенный аддитивный метод для автоматической настройки системы, реализованный на основе вычисления математического ожидания отклонений межосевых расстояний вагонных тележек, позволяет снизить эксплуатационные затраты на диагностирование технического состояния подвижного состава. Эффективность оценки математического ожидания подтверждается нормальным законом распределения параметра, используемого для настройки системы, и стохастическим законом больших чисел.

Ключевые слова: автоматизация, настройка системы, стохастические методы, вагонная тележка, отклонения параметров, межосевые расстояния колесных пар, магнитоиндукционные датчики осей.

Vladimir V. Petrov, Andrey S. Okishev, Konstantin S. Petrov

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

AUTOMATION OF THE SETUP OF THE SYSTEM OF MAGNETIC INDUCTION SENSORS OF AXES FOR ROLLING STOCK TECHNICAL CONDITION DIAGNOSTICS ON THE BASIS OF THE STOCHASTIC APPROACH

Abstract. The paper describes the results of a study of deviations of interaxle distances of cars from standard values in the process of uniform movement of a train over a set of magnetic induction sensors. The purpose of this work is to substantiate the possibility of applying a stochastic approach to automating the process of setting up a measuring system and magnetic induction sensors included in it, based on statistical processing of measured data and calculation of estimates of random sequences (samples) of calculated center intervals. Any deviations of center distances occur in the process of gradual wear of moving parts in real operating conditions of the rolling stock and lead to a change in the statistical estimates of these parameters of the rolling stock. An analysis of the statistical parameters of empirical histograms of various types of center distances for the degree of compliance with the normal distribution law is presented to assess the prospects for using one of them to automatically adjust the measuring path of the system, which provides diagnostics of the technical condition of the rolling stock in the process of its movement over a set of sensors for the axles of wheel sets. The proposed additive method for automatic tuning of the system, implemented on the basis of calculating the mathematical expectation of deviations in the center distances of wagon bogies, can reduce the operating costs for diagnosing the technical condition of the rolling stock. The effectiveness of the estimation of the mathematical expectation is confirmed by the normal distribution law of the parameter used to tune the system, and based on the stochastic law of large numbers.

Keywords: automation, system tuning, stochastic methods, wagon bogie, parameter deviations, axle distances of wheelsets, magnetic induction axle sensors.

Современное развитие цифровых технологий позволяет реализовать новый принцип взаимодействия человека и любых технических объектов, таких как «интернет вещей» или

«цифровая железная дорога», которые фактически являются всеобъемлющими системами сетецентрического мониторинга различного оборудования для повышения эффективности и надежности эксплуатации любых сложных технических объектов. Наиболее перспективное направление применения интеллектуальных технологий на железнодорожном транспорте – это реализация цифровых двойников каждой единицы подвижного состава, которые могут постоянно сравниваться с реальным объектом в процессе движения состава вдоль цифровых сканеров, установленных в контрольных пунктах железнодорожной сети [1]. В настоящее время контроль технического состояния подвижного состава осуществляется в пунктах технического обслуживания на основе специализированных измерительных стендов после разборки каждого узла, что приводит к значительным материальным и финансовым затратам [2].

В процессе механического износа деталей возникают отклонения конструктивных параметров тележек подвижного состава от номинальных значений. При наличии комплекта магнитоиндукционных датчиков, закрепленных на подошве рельсов, имеется возможность измерения и регистрации этих отклонений. После обработки сигналов, поступающих от датчиков, вычисляются межосевые расстояния всех подвижных единиц, проходящих над комплектом датчиков, и перекосы осей колесных пар относительно линии, перпендикулярной рельсовому пути. На основе этих данных и соответствующих математических моделей [3] осуществляется инструментальное диагностирование в специализированных пунктах контроля технического состояния подвижного состава с использованием стандарта ОАО «РЖД» [4]. Структурная схема микропроцессорного устройства для регистрации и обработки сигналов, поступающих от датчиков осей вагонных тележек [5], представлена на рисунке 1.

Магнитоиндукционные датчики установлены в составе комплекта напольного оборудования в пунктах КТСМ, примерная схема размещения которых изображена на рисунке 2.

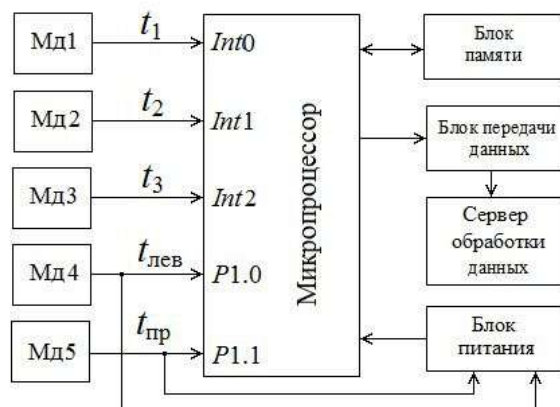


Рисунок 1 – Структурная схема микропроцессорного устройства для измерения и предварительной обработки межосевых интервалов

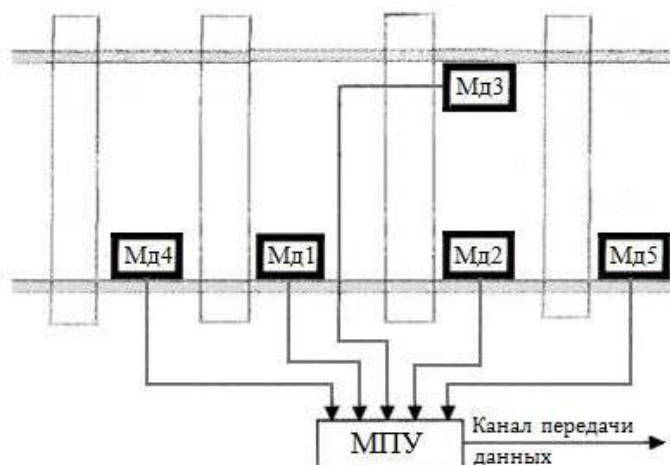


Рисунок 2 – Схема размещения датчиков на железнодорожном пути

Математическое обеспечение и алгоритм работы устройства для инструментальной калибровки и тестирования измерительного тракта системы на основе персонального компьютера описаны в источнике [6]. Диаграмма, поясняющая принцип формирования измеряемых временных интервалов, представлена на рисунке 3, где высокий уровень сигнала означает момент прохождения колесной пары между датчиками Мд1 и Мд2.

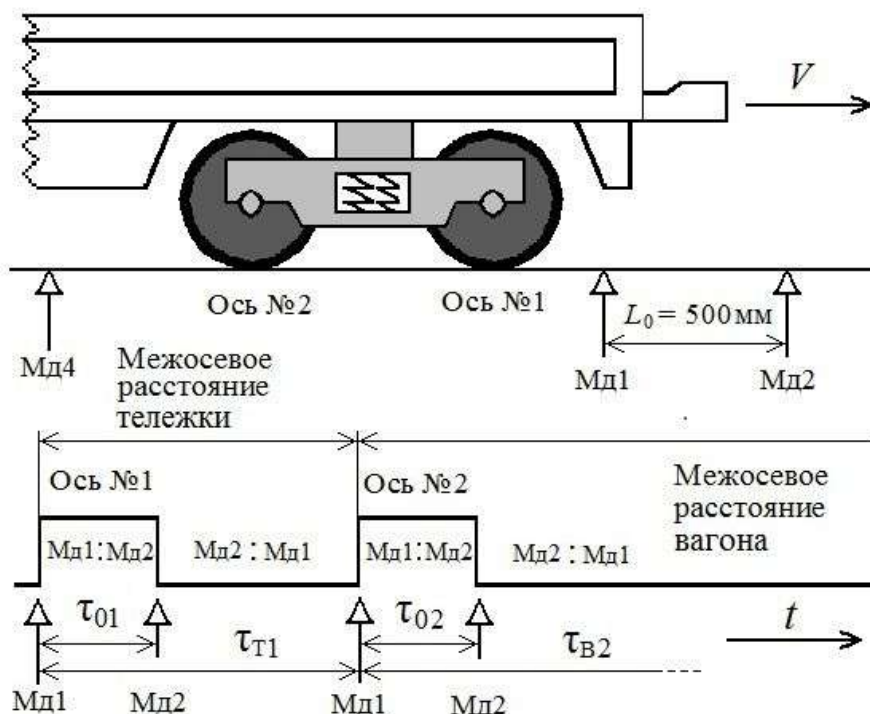


Рисунок 3 – Принцип формирования временных интервалов

Предлагаемая система содержит пять магнитоиндукционных датчиков (Мд1 – Мд5), причем Мд4 и Мд5 определяют направление приближения состава к напольному оборудованию и обеспечивают электропитание микропроцессорного устройства (см. рисунки 2, 3), а датчики Мд2 и Мд3 предназначены для измерения угла перекоса оси каждой колесной пары. Расстояние между датчиками Мд1 и Мд2 L_0 фиксировано и составляет 500 мм, а интервалы времени прохождения осей между этими датчиками (при равномерном движении состава $V_{\text{равн}}$) связаны соотношением:

$$V_{\text{равн}} = \frac{L_0}{\tau_{0j}} = \frac{L_{\text{тj}}}{\tau_{\text{тj}}} = \frac{L_{\text{вj}}}{\tau_{\text{вj}}} = \frac{L_{\text{сj}}}{\tau_{\text{сj}}}, \quad (1)$$

где τ_{0j} – интервалы времени прохождения осей между датчиками Мд1 и Мд2. Таким образом, в общем виде межосевые расстояния вычисляются по выражению:

$$L_{xj} = \frac{L_0}{\tau_{0j}} \tau_{xj}. \quad (2)$$

Все измеренные данные хранятся в памяти микропроцессорного устройства (МПУ). Сформированный массив данных передается по каналу связи в центр обработки данных (специализированный сервер). Вычисляемые межосевые расстояния вагонов (1), (2) можно разделить на три группы:

- 1) $L_{\text{тj}}$ – массив расстояний между осями тележек;
- 2) $L_{\text{вj}}$ – массив расстояний между ближайшими осями смежных тележек вагонов;

3) L_{cj} – массив расстояний между ближайшими осями тележек смежных вагонов (с учетом сцепки между вагонами), которые изображены на рисунке 4 (на примере полувагонов).

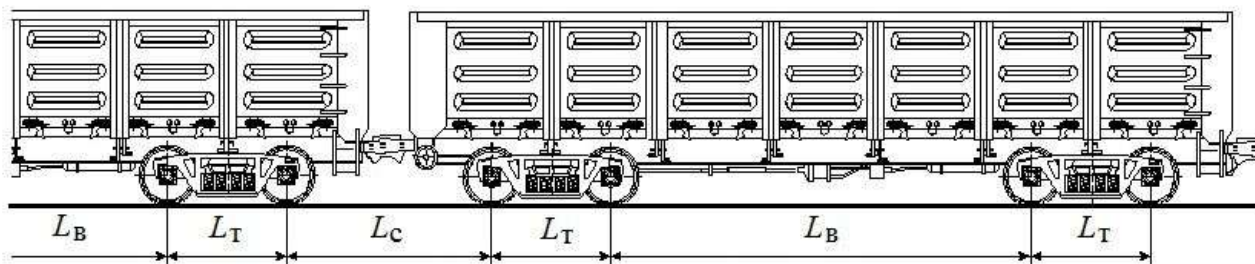


Рисунок 4 – Последовательность межосевых расстояний

Эксплуатация напольного оборудования (комплекта магнитоиндукционных датчиков) осуществляется в сложных погодных условиях и при постоянных вибрационных воздействиях, что негативно влияет на стабильность работы системы диагностирования. Для обеспечения высокой точности измерения перечисленных параметров следует осуществлять регулярную калибровку и тестирование всего измерительного тракта системы, что требует применения специального инструментария, т. е. дополнительных материальных и трудовых затрат.

Цель данной работы состоит в обосновании возможности применения стохастического подхода к автоматизации процесса настройки измерительной системы и магнитоиндукционных датчиков, входящих в ее состав, на основе статистической обработки измеренных данных и вычисления оценок случайных последовательностей (выборок) измеренных межосевых интервалов.

Если учесть, что параметры всех вагонов в составе поезда независимы и все вагоны регулярно проходят техническое обслуживание и инструментальный контроль, то согласно закону больших чисел отклонения измеряемых параметров в реальной системе подчиняются нормальному закону распределения с определенными значениями математического ожидания и среднего квадратичного отклонения. Среднее время эксплуатации вагонного парка до первого капитального ремонта (с учетом ежегодного депоовского ремонта) составляет 22 года [7]. Учитывая это обстоятельство, можно допустить, что возможность возникновения неисправности конкретного вагона составляет всего 4,5 % (в составе каждого поезда). Таким образом, большинство вагонов, входящих в состав конкретного поезда, находятся в эксплуатации в нормативном исправном состоянии [8]. Следовательно, средние значения параметров, измеренных не менее чем у 95 % подвижного состава, можно использовать в качестве эталонных, что и положено в основу предлагаемого метода автоматической настройки системы.

Если учесть, что на основании стохастического закона больших чисел оценка математического ожидания отклонений межосевых расстояний состава по выборке из генеральной совокупности описывается нормальным законом распределения, то такая оценка обладает свойствами состоятельности и эффективности и совпадает с оценками на основе методов моментов и максимального правдоподобия. Таким образом, для достижения поставленной цели основная задача – это исследование закона распределения измеренных реализаций случайной величины и проверка гипотезы о соответствии его нормальному закону распределения. Если этот закон соответствует закону распределения Гаусса и полученные оценки являются значимыми и эффективными, то допустимо использовать параметр математического ожидания для компенсации аддитивной погрешности всех элементов, входящих в измерительный тракт системы, независимо от положения или характеристик датчиков в составе напольного оборудования.

Кроме того, необходимо выяснить, какой тип из межосевых интервалов является наиболее информативным для решения поставленной задачи. Исследование статистических характе-

ристик указанных случайных величин рассмотрим на примере состава, состоящего из 67 полувагонов типа 12-119 с тележками типа 18-100 [9], имеющих следующие нормативные размеры межосевых расстояний: $L_{\text{вн}} = 6800$ мм, $L_{\text{сн}} = 4200$ мм, $L_{\text{тн}} = 1850 \pm 16$ мм. Такой нормативный допуск $\Delta L_{\text{тн}}$ отклонения межосевых расстояний от номинального значения с нулевым значением математического ожидания (МО) соответствует диапазону среднего квадратичного отклонения (СКО) в 2σ с учетом гипотезы о нормальном законе распределения, что и соответствует вероятности примерно 0,95. В процессе исследований необходимо найти статистические оценки реальных значений этих параметров.

Задача ставится следующим образом. Имеется три группы наблюдений – $L_{\text{т}}$, $L_{\text{в}}$, $L_{\text{с}}$ (векторов измеренных межосевых расстояний), необходимо вычислить и исследовать статистические характеристики их отклонений $\Delta L_{\text{т}}$, $\Delta L_{\text{в}}$, $\Delta L_{\text{с}}$ от нормативных значений $L_{\text{тн}}$, $L_{\text{вн}}$, $L_{\text{сн}}$:

$$\begin{cases} \Delta L_{\text{т}} = L_{\text{т}} - L_{\text{тн}}; \\ \Delta L_{\text{в}} = L_{\text{в}} - L_{\text{вн}}; \\ \Delta L_{\text{с}} = L_{\text{с}} - L_{\text{сн}}. \end{cases} \quad (3)$$

При этом предполагается, что вычисленные значения отклонений можно рассматривать как реализации случайных величин с нормальной функцией распределения элементов $\Delta L_{\text{т}j}$, $\Delta L_{\text{в}j}$, $\Delta L_{\text{с}j}$, входящих в состав этих векторов, где j – номер элементов в составе каждого вектора, которые в статистических исследованиях рассматриваются как выборка из генеральной совокупности случайной величины. Таким образом, методами математической статистики необходимо проверить гипотезу о нормальном законе распределения этих случайных величин и принять решение о том, что предложенная гипотеза принимается или отвергается.

Если количество наблюдений в каждой реализации 60 и более, то можно воспользоваться критерием согласия Карла Пирсона (критерием χ^2) для сгруппированных наблюдений. При этом необходимо учитывать, что в таком случае рекомендовано принимать от шести до девяти интервалов для подсчета числа наблюдений, которые попали в каждый из них.

Идея критерия χ^2 основана на сравнении отклонений экспериментальной (эмпирической) гистограммы от теоретической гистограммы, имеющей нормальный закон распределения. Причем обе гистограммы имеют одинаковое количество интервалов и одинаковые параметры математического ожидания и дисперсии. Сумма квадратов относительных значений разностей частот по всем интервалам гистограммы не должна превышать критического значения $\chi^2_{(\alpha, \eta)}$, которое можно найти по соответствующим таблицам в зависимости от уровня значимости критерия α и числа степеней свободы η .

Алгоритм реализации критерия χ^2 рассмотрим на примере вычисления основных оценок случайной величины $\Delta L_{\text{т}}$ (выборки отклонений межосевых расстояний вагонных тележек грузового состава от нормативного значения). В общем виде вычисление среднего арифметического случайных значений для сгруппированных наблюдений производится по формуле:

$$x_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k m_i x_{0i}, \quad (4)$$

где m_i – эмпирические частоты гистограммы; n – число наблюдений в данной реализации; x_{0i} – середина интервалов эмпирической гистограммы; k – число интервалов гистограммы. Несмещенные оценки дисперсии отклонений случайной величины $\Delta L_{\text{т}}$ и среднего квадратичного отклонения определяют так:

$$S_{\text{нс}}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^k m_i (x_{0i} - x_{\text{ср}})^2, \quad S_{\text{нс}} = \sqrt{S_{\text{нс}}^2}. \quad (5)$$

Проверка с помощью критерия χ^2 гипотезы о соответствии нормальному распределению отклонений межосевых расстояний ΔL_T осуществляется следующим образом. Предлагается две гипотезы: гипотеза H_0 о том, что нормальное распределение не является функцией распределения случайной величины отклонений межосевых расстояний ΔL_T и гипотеза H_1 , предполагающая, что нормальное распределение Гаусса является функцией распределения случайной величины отклонений межосевых расстояний ΔL_T . Вычисление параметра χ^2 для эмпирических (наблюдаемых) данных осуществляется по формуле:

$$\chi^2_{\text{эмп}} = \sum_{i=1}^k \frac{(m_i - m_i^{\text{теор}})^2}{m_i^{\text{теор}}}, \quad (6)$$

где $m_i^{\text{теор}}$ – теоретические частоты гистограммы нормального закона распределения:

$$m_i^{\text{теор}} = n \Delta x_{0i} f_k(x_{0i}), \quad (7)$$

где Δx_{0i} – размер интервала; $f_k(x_{0i})$ – теоретическая функция распределения Гаусса:

$$f_k(x_i) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x_{0i} - a)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (8)$$

имеющая параметры $a = x_{\text{ср}}$ и $\sigma = S_{\text{нс}}$. Вычисления (3) – (8) выполнены в приложении Excel с использованием имеющихся в библиотеке статистических функций [10].

В данном примере число степеней свободы определяется так:

$$\eta = k - p - 1, \quad (9)$$

где $k = 6$ – число интервалов гистограммы; $p = 2$ – число параметров функции распределения Гаусса, которые использованы в критерии χ^2 для вычисления теоретических значений гистограммы нормального закона распределения. В таблице 1 представлены результаты промежуточных расчетов показателя разности частот и суммарного значения критерия согласия $\chi^2_{\text{эмп}}$.

Таблица 1 – Результаты промежуточных вычислений $\chi^2_{\text{эмп}}$

i	x_{0i}	m_i	$f_k(x_{0i})$ (8)	$m_i^{\text{теор}}$ (7)	$\chi^2_{\text{эмп}}$ (6)
1	-31	10	0,003764489	8,575504974	0,236625841
2	-14	29	0,011628692	26,49015929	0,237797754
3	3	42	0,018673034	42,53717116	0,006783546
4	20	32	0,01558684	35,5068224	0,346350434
5	37	16	0,006763328	15,40686153	0,022834842
6	54	5	0,001525534	3,475167316	0,669065545
Итого	$\Delta x_{0i} = 17$	134	0,057941917	131,9916867	1,519457962

По таблице значений распределения $\chi^2_{\text{крит}}$ (для уровня значимости $\alpha = 0,05$ и числа степеней свободы $\eta = 3$) находим критическое (предельное) значение $\chi^2_{\text{крит}} = 7,814$. В данном случае $\chi^2_{\text{эмп}} = 1,519 < \chi^2_{\text{крит}}$, поэтому гипотеза о нормальном законе распределения случайной величины отклонений межосевых расстояний тележки L_T принимается, а вероятность того, что получаемое значение $\chi^2_{\text{эмп}}$ превысит $\chi^2_{\text{крит}}$, равна α , т. е. довольно мала.

Уровень значимости критерия α выбирают достаточно малым для того, чтобы уменьшить вероятность отклонения правильной гипотезы (совершить ошибку первого рода). С другой стороны, слишком малое значение α увеличивает вероятность принятия ложной гипотезы, т. е. совершения ошибки второго рода.

На рисунке 5 изображены гистограмма эмпирического распределения отклонений межосевых расстояний ΔL_T от их номинальных значений и соответствующий теоретический график функции плотности распределения Гаусса.

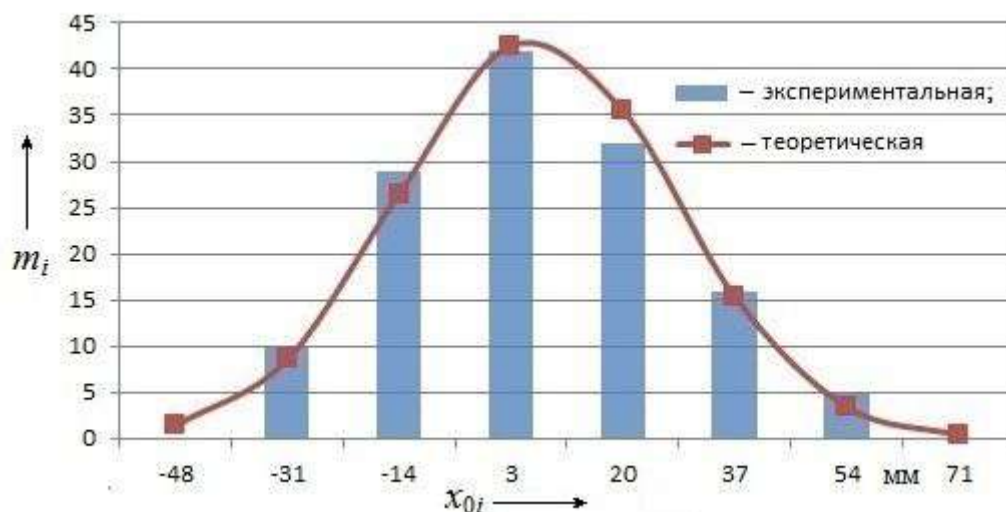


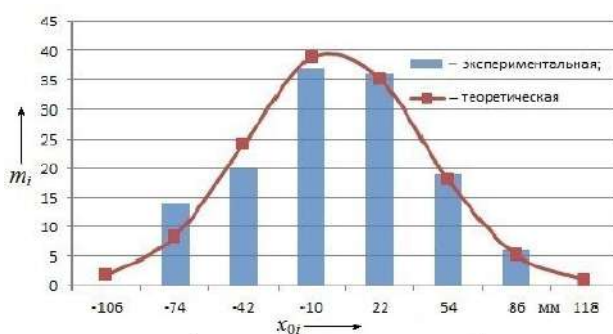
Рисунок 5 – Гистограмма ΔL_T эмпирического распределения отклонений межосевых расстояний от их номинальных значений и соответствующий график теоретического распределения Гаусса

В таблице 2 представлены результаты вычисления статистических параметров и значения оценок $\chi^2_{\text{эмп}}$ для сравнительного анализа трех выборок межосевых расстояний ΔL_T , ΔL_B , ΔL_C в результате применения встроенных функций Excel.

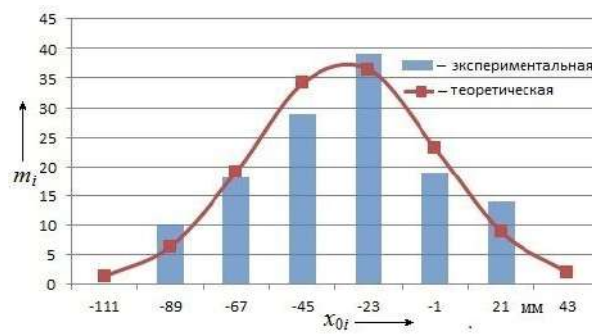
Таблица 2 – Статистические параметры и оценки χ^2 для трех видов отклонений межосевых расстояний L_T , L_B , L_C

Группа выборки	Функция Excel: СРЗНАЧ (ΔL)	Функция Excel: СТАНДОТКЛОН.В (ΔL)	Функция Excel: ДОВЕРИТ.НОРМ (0,05; σ ;n)	Оценка: $\chi^2_{\text{эмп}}$ (x_{0i} ; m_i)	Оценка: $\chi^2_{\text{крит}}$ (0,05;3)	Функция Excel: ХИ2.ТЕСТ (m_i ; $m_i^{\text{теор}}$)
ΔL_T	7,2835820	23,2455386	3,9358207	1,519457	7,814727	0,9108135
ΔL_B	-1,2238805	43,0335839	7,2862355	4,811531	7,814727	0,4393115
ΔL_C	-25,171641	35,4747662	6,0064135	6,848547	7,814727	0,2321498

На рисунке 6 представлены гистограммы эмпирических распределений отклонений межосевых расстояний ΔL_B , ΔL_C от их номинальных значений и соответствующие им теоретические графики плотности распределения закона Гаусса.



a



b

Рисунок 6 – Гистограммы эмпирического распределения отклонений межосевых расстояний от их номинальных значений и соответствующих графиков теоретического распределения Гаусса:

a – для ΔL_B ; *b* – для ΔL_C

На основе представленных в таблице 2 результатов можно сделать вывод о том, что распределение отклонений межосевых расстояний ΔL_t от номинальных значений имеет наибольшее приближение к нормальному закону распределения (с вероятностью 91 %) и эффективную оценку математического ожидания. Это подтверждает наибольшую перспективность математического ожидания (выборочного среднего) отклонений межосевых расстояний тележки (ΔL_t) для автоматической настройки всего измерительного тракта системы и магнитоиндукционных датчиков путем компенсации возникающей аддитивной погрешности. Предлагаемая структура системы и алгоритм ее настройки может являться элементом сетецентрической системы контроля технического состояния подвижного состава.

Распределение отклонений межосевых расстояний ΔL_v от номинальных значений имеет меньшее согласие с частотами закона распределения Гаусса (с вероятностью 43 %), что не подтверждает перспективность использования этого параметра для автоматизации настройки системы. Это имеет логичное объяснение, так как вагонные тележки имеют дополнительную степень свободы относительно рамы вагона (как следствие влияния детерминированного фактора перекаса тележек, который является косвенным признаком существенного износа поверхности катания и профиля колес вагонных тележек).

Гистограмма отклонений межосевых расстояний ΔL_c от номинальных значений имеет еще меньшее согласие с частотами закона распределения Гаусса (с вероятностью всего 23 %), что не позволяет использовать этот параметр для автоматической настройки системы. Это также имеет логичное объяснение, так как на межосевые расстояния сцепки между вагонами влияют дополнительные неслучайные факторы, связанные с динамическими воздействиями локомотива на состав (режим тяги, замедления или дополнительного сопротивления движению вагона при заклинивании узлов тележки, которые могут иметь и нестационарный характер). Кроме того, влияние поглощающих аппаратов в составе конструкции автосцепки вводит еще одну дополнительную степень свободы межосевых расстояний смежных вагонов (как следствие влияния демпфирующих свойств автосцепки). Влияние перечисленных выше факторов на техническое состояние подвижного состава требует дополнительных исследований для повышения качества автоматизированной системы диагностирования.

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Оценка математического ожидания (вычисленного по выборке из генеральной совокупности измеренных значений) отклонений межосевых расстояний тележек подвижного состава от номинальных значений имеет наибольшую перспективность для автоматической настройки измерительного тракта системы диагностирования благодаря наилучшему приближению гистограммы этого параметра к нормальному закону распределения, что гарантирует эффективность применения этой оценки.

2. Повышение точности диагностирования технического состояния подвижного состава осуществляется с помощью автоматической настройки системы путем компенсации систематической погрешности, возникающей из-за воздействия различных внешних факторов на комплект магнитоиндукционных датчиков и элементы всего измерительного тракта.

3. Применение описанной процедуры автоматической настройки измерительного тракта в составе информационной системы позволяет повысить эффективность применения сетецентрической системы диагностирования для повышения надежности и безопасности эксплуатации подвижного состава на железнодорожном транспорте.

Список литературы

1. Тамаркин, В. М. Технологии промышленного интернета вещей в рамках идеологии цифровой железной дороги // Наука и технологии железных дорог: Ежеквартальное сетевое научно-методическое издание. АО «НИИАС». – 2017. – № 2 (2). – С. 76–84. / В. М. Тамаркин, Т. Э. Лобанова. – <https://www.elibrary.ru> : сайт. – Текст : электронный. – URL : <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29437722> (дата обращения: 05.12.2022).

2. Классификатор неисправностей вагонных колесных пар и их элементов // www.rcit.su : сайт. – Текст : электронный. – URL : <http://www.rcit.su/techinfo51.html> (дата обращения: 05.12.2022).

3. Петров, К. С. Алгоритм цифровой ретроспективной обработки магнитограммы развертки поверхности катания колеса для системы диагностирования технического состояния подвижного состава на основе магнитоиндукционных датчиков / К. С. Петров, А. С. Окишев, В. В. Петров. – Текст : непосредственный // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте : материалы пятой всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2022. – С. 311–319.

4. Система калибровки средств измерений в ОАО «РЖД». Общие положения. СТО «РЖД» 1.06.001-2006 // static.scbist.com : сайт. – Текст : электронный. – URL : <http://static.scbist.com/scb/СТО/СТО%20RZD%201.06.001-2006.pdf> (дата обращения: 04.12.2022).

5. Патент № 193429 Российская Федерация, МПК В61К 9/12. Устройство для определения положения колесных пар подвижного состава относительно прямолинейного рельсового пути : № 2019118943 : заявлено 17.06.2019 : опубликовано 29.10.2019 / Кондратенко Е. В., Петров В. В., Петров К. С. – 6 с. : ил. – Текст : непосредственный.

6. Петров, В. В. Аппаратно-программный имитатор для тестирования автоматической системы диагностирования отклонений кинематических параметров подвижного состава / В. В. Петров, К. С. Петров, Н. А. Тихонова. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы науч. конф. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2018. – С. 203–210.

7. ГОСТ 26725–97. Полувагоны четырехосные универсальные магистральных железных дорог колеи 1520 мм. – Москва : Стандартинформ, 2004. – 11 с. – Текст : непосредственный.

8. Петров, К. С. Разработка системы магнитоиндукционных датчиков для диагностирования износа гребней колесных пар подвижного состава / К. С. Петров, Е. В. Кондратенко, В. В. Петров. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Приборостроение. – 2022. – Т. 65. – № 8. – С. 157–166.

9. Тележка двухосная модели 18-100: руководство по ремонту // opzt.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL : https://opzt.ru/wp-content/uploads/2018/03/Rukovodstvo-po-remontu-Telezhka-dvuhosnaya-modeli-18-100_.pdf (дата обращения: 03.12.2022).

10. Критерий независимости Хи-квадрат в Microsoft Excel // excel2.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL : <https://excel2.ru/articles/kriteriy-nezavisimosti-hi-kvadrat-v-ms-excel> (дата обращения: 02.12.2022).

References

1. Tamarkin V. M., Lobanova V. M. Technologies of the Industrial Internet of Things within the Ideology of the Digital Railway [Tekhnologii promyshlennogo interneta veshchey v ramkakh ideologii tsifrovoy zheleznoy dorogi]. *Nauka i tehnologii zheleznih dorog* – The journal of Railway Science and Technology, 2017, no. 2 (2), pp. 76 – 84. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29437722> (accessed 05.12.2022).

2. *Klassifikator neispravnostej vagonnyh kolesnyh par i ih jelementov* [Classifier of malfunctions of wagon wheelsets and their elements]. Available at: <http://www.rcit.su/techinfo51.html> (accessed 05.12.2022).

3. Petrov K.S., Okishev A.S., Petrov V.V. Algorithm for digital retrospective processing of the magnetogram of the sweep of the wheel tread surface for the system for diagnosing the technical condition of rolling stock based on magnetic induction sensors. [Algoritm cifrovoj retrospektivnoj obrabotki magnitogrammy razvertki poverhnosti katanija kola dlja sistemy diagnostirovanija tehničeskogo sostojanija podvizhnogo sostava na osnove magnitoindukcionnyh datchikov] *Pribory i metody izmerenij, kontrolja kachestva i diagnostiki v promyshlennosti i na transporte : materialy*

pyatoy vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem [Devices and methods of measurement, quality control and diagnostics in industry and transport: Materials of the fifth All-Russian scientific and technical conference with international participation]. Omsk, 2022. pp. 311-319 (In Russian).

4. Sistema kalibrovki sredstv izmerenij v OAO «RZhD». Obshhie polozheniya. STO «RZhD» 1.06.001-2006. (Calibration system for measuring instruments at Russian Railways. General provisions. «Russian Railways» organization standard 1.06.001-2006). Available at: <http://static.scbist.com/scb/CTO/STO%20RZD%201.06.001-2006.pdf> (accessed 04.12.2022).

5. Kondratenko Ye.V., Petrov V.V., Petrov K.S. *Patent RU 193429*, 29.10.2019.

6. Petrov V.V., Petrov K.S., Tikhonova N.A. Hardware and software simulator for testing an automatic system for diagnosing deviations of the kinematic parameters of rolling stock [Apparatno-programmnyj imitator dlja testirovaniya avtomaticheskoy sistemy diagnostirovaniya otklonenij kinematicheskikh parametrov podvizhnogo sostava]. *Innovacionnyye proekty i tehnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte : materialy nauchnoj konferencii* [Innovative projects and technologies in education, industry and transport: materials of the scientific conference]. Omsk, 2018, pp. 203-210 (In Russian).

7. *Poluvagony chetyrehosnye universal'nye magistral'nyh zheleznih dorog kolei 1520 mm GOST 26725-97* (Four-axle universal gondola cars of 1520 mm gauge mainline railways, National Standard 26725-97), Moscow, Standardinform, 2004, 11 p. (In Russian).

8. Petrov K.S., Kondratenko Ye.V., Petrov V.V. Development of a system of magnetic induction sensors for diagnosing wear of wheel pair flanges of rolling stock [Razrabotka sistemy magnitoindukcionnyh datchikov dlja diagnostirovaniya iznosa grebnej kolesnyh par podvizhnogo sostava]. *Izvestiya vuzov. Priborostroyeniye. – The journal of University Studies. Instrumentation*, 2022, vol. 65, no. 8, pp. 157-166 (In Russian).

9. Telezhka dvuhosnaja modeli 18-100: rukovodstvo po remontu [Trolley two-axle model 18-100: repair manual]. Available at: https://opzt.ru/wp-content/uploads/2018/03/Rukovodstvo-po-remontu-_Telezhka-dvuhosnaya-modeli-18-100_.pdf (accessed 03.12.2022).

10. Kriteriy nezavisimosti Khi-kvadrat v Microsoft Excel [Chi-square independence criterion in Microsoft Excel]. Available at: <https://excel2.ru/articles/kriteriy-nezavisimosti-hi-kvadrat-v-ms-excel> (accessed 02.12.2022).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Петров Владимир Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: PetrovVV@omgups.ru

Окишев Андрей Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: OkishevAS@omgups.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Petrov Vladimir Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, chief scientific worker, associate professor of the department «Automation and control systems», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: PetrovVV@omgups.ru

Okishev Andrey Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Automation and control systems», OSTU.

Phone: (3812) 31-05-89.

E-mail: OkishevAS@omgups.ru

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

Петров Константин Сергеевич

Омский государственный университет путей
сообщения (ОМГУПС).

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

Студент ОМГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-55.

E-mail: iatit@omgups.ru

Petrov Konstantin Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

The student of OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-55.

E-mail: iatit@omgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Петров, В. В. Автоматизация настройки системы
магнитоиндукционных датчиков осей для диагнос-
тирования технического состояния подвижного
состава на основе стохастического подхода /
В. В. Петров, А. С. Окишев, К. С. Петров. – Текст :
непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. –
№ 1 (53). – С. 140 – 150.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Petrov V.V., Okishev A.S., Petrov K.S. Automation
of the setup of the system of magnetic induction sensors
of axes for rolling stock technical condition diagnostics on
the basis of the stochastic approach. *Journal of Transsib
Railway Studies*, 2023, no. 1 (53), pp. 140-150
(In Russian).

Уважаемые коллеги!

Редакция научно-технического журнала «Известия Транссиба» приглашает Вас публиковать результаты
научных исследований по тематическим направлениям журнала:

- подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация;
- управление процессами перевозок;
- железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог;
- транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация
производства на транспорте;
- теоретическая и прикладная теплотехника;
- энергетические системы и комплексы;
- электроэнергетика;
- электротехнические комплексы и системы;
- 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).

В тексте статьи обязательно указывается тематический раздел журнала, в который подается статья и научная
специальность, которой она соответствует.

Текст статьи включает в себя УДК, ФИО авторов, аффилиацию (место работы или учебы) авторов, название
статьи, аннотацию, ключевые слова (5 – 10 слов) на русском и английском языках, текст статьи, список
литературы (не менее трех наименований), транслитерацию и перевод списка литературы в романском алфавите,
сведения об авторах и библиографическое описание статьи на русском и английском языках.

Текст статьи оформляется в соответствии с образцом (прилагается).

Сведения об авторах включают в себя фамилию, имя, отчество, ученую степень и 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 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, например, как cos, sin, max, min, – прямым шрифтом;

текст в таблицах, подрисуночные 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 не должны отделяться друг от друга;

каждый рисунок дополнительно должен быть представлен в отдельном (исходном) файле в редактируемом виде;

рисунки и таблицы должны иметь только книжную ориентацию;

после текста статьи следуют списки литературы на русском языке и в романском алфавите (латинице) с переводом названий литературных источников на английский язык;

ссылки на литературу в тексте статьи указываются в квадратных скобках, список литературы имеет заголовок *Список литературы* (рекомендуемый объем списка – не менее трех наименований), библиографическое описание источников на русском языке оформляется по требованиям ГОСТ Р 7.0.100–2018;

в романском алфавите (латинице) список литературы имеет заголовок *References* и оформляется в соответствии с образцом (прилагается);

при публикации научной статьи на русском языке обязательным является наличие ключевых слов и аннотации на русском и английском языках; публикация статей с полным текстом на иностранном языке не допускается.

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 аннотаций и списков литературы. В ином случае вопрос по объему статьи также необходимо согласовать с редакцией журнала. Иллюстрации, схемы, 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»

№ 1 (53) 2023

Научно-технический журнал «Известия Транссиба» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 03 июня 2009 г., регистрационный номер – ПИ № ФС77-75780 от 23 мая 2019 г.

Номер ISSN – 2220-4245.

Подписной индекс в официальном каталоге «Подписные издания» АО «Почта России» – ПП914.

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 27.03.2023.

Формат 60 × 90/8.

Тираж 250 экз.

Дата выпуска: 31.03.2023.

