

научно - технический

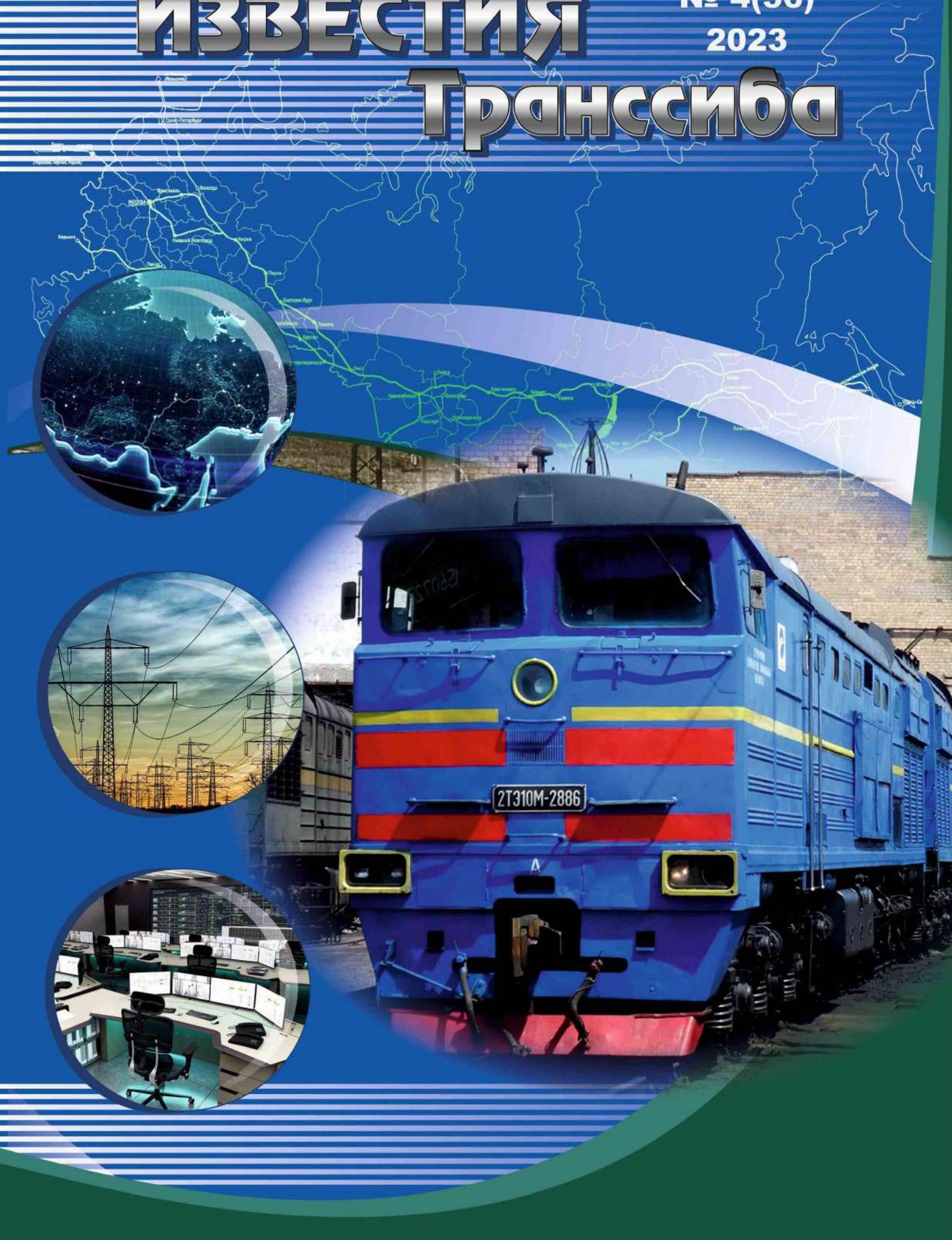
ISSN 2220-4245

журнал

ИЗВЕСТИЯ Транссиба

№ 4(56)

2023



РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

1. Овчаренко Сергей Михайлович – главный редактор, ректор ОмГУПСа, д.т.н., доцент (Омск).
2. Галиев Ильхам Исламович – зам. главного редактора, советник при ректорате ОмГУПСа, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ (Омск).
3. Шантаренко Сергей Георгиевич – зам. главного редактора, профессор кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» ОмГУПСа, 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» СГУПСа, д.т.н., профессор (Новосибирск).
6. Ведренченко Виктор Родионович – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПСа, д.т.н., профессор (Омск).
7. Глинка Тадеуш – доктор, профессор Сilesianского политехнического университета (Гливице, Польша).
8. Горюнов Владимир Николаевич – зав. кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГУ, д.т.н., профессор (Омск).
9. Гуда Александр Nikolaevich – профессор по научной работе РГУПСа, д.т.н., профессор (Ростов-на-Дону).
10. Зыкина Анна Владимировна – заведующая кафедрой «Прикладная математика и фундаментальная информатика» ОмГТУ, д.ф.-м.н., профессор (Омск).
11. Исааков Александр Леонидович – зав. кафедрой «Изыскания, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог» СГУПСа, д.т.н., профессор (Новосибирск).
12. Ким Константин Константинович – заведующий кафедрой «Электротехника и теплоэнергетика» ПГУПСа, д.т.н., профессор (Санкт-Петербург).
13. Комяков Александр Анатольевич – профессор кафедры «Теоретическая электротехника» ОмГУПСа, д.т.н., доцент (Омск).
14. Кошарев Александр Борисович – первый заместитель генерального директора АО «ВНИИЖТ», д.т.н., профессор (Москва).
15. Кузинов Андрей Албертович – заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника» ОмГУПСа, д.т.н., профессор (Омск).
16. Лебедев Виталий Матвеевич – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПСа, д.т.н., профессор (Омск).
17. Никитин Александр Борисович – заведующий кафедрой «Автоматика и телемеханика на железнодорожных дорогах» ПГУПСа, д.т.н., профессор (Санкт-Петербург).
18. Лившиц Александр Валерьевич – заведующий кафедрой «Автоматизация производственных процессов» ИрГУПСа, 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» ОмГТУ, д.т.н., доцент (Омск).
21. Сидоров Олег Алексеевич – профессор кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПСа, д.т.н., профессор (Омск).
22. Смердин Александр Nikolaevich – профессор по научной работе ОмГУПСа, д.т.н., доцент (Омск).
23. Солоненко Владимир Гельевич – профессор кафедры «Подвижной состав» АЛТУ, д.т.н., профессор (Алматы, Республика Казахстан).
24. Файзбай Шерзод Сабирovich – профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» ТГТУ, д.т.н., профессор (Ташкент, Республика Узбекистан).
25. Харламов Виктор Васильевич – заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПСа, д.т.н., профессор (Омск).

EDITORIAL BOARD

1. Ovcharenko Sergey Mikhaylovich – chief editor, the rector of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
2. Galiev Ikhlan Islamovich – deputy chief editor, the advisor to the rector's office of OSTU, D. Sc., professor, the honored worker of science and engineering of the Russian Federation (Omsk, Russia).
3. Shantarenko Sergey Georgievich – deputy chief editor, professor of the department «Technologies of transport engineering and rolling stock repair» of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
4. Alekseev Viktor Mikhaylovich – professor of the department of Information Control and Protection of RUT, D. Sc., professor (Moscow, Russia).
5. Bessonenko Sergey Anatolyevich – head of the department «Track Maintenance Management» of STU, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
6. Vedrenchenko 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 OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
9. Huda Alexander Nikolaevich – Vice-rector for scientific-work of RSTU, D. Sc., professor (Rostov-on-Don, Russia).
10. Zykina Anna Vladimirovna – head of the department «Applied mathematics and fundamental computer science» of OmskSTU, 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 Anatol'evich – 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 Alberthovich – 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 Valer'evich – 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 Mikhaylovich – professor of the department «Heat-power engineering» of OmSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
21. Sidorov Oleg Alexeyevich – professor of the department «Power supply of railway transport» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
22. Smerdin Aleksandr Nikolaevich – vice-rector by scientific work of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
23. Solonenko Vladimir Gelyevich – professor of the department «Rolling stock» of ALT, D. Sc., professor (Almaty, Kazakhstan).
24. Fayzbaev Sherzod Sabirovich – professor of the department «Wagons and wagon facilities» of TSTU, D. Sc., professor (Tashkent, Uzbekistan).
25. Kharlamov Viktor Vasil'yevich – 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

Минаков В. А., Носков В. О., Фоменко В. К., Четвергов В. А. Анализ эффективности работы искрогасителя грузового локомотива серии 2ТЭ10 и оценка вероятности возникновения пожара.....	2
Ковалев А. А., Андрюков А. В. Исследование надежности работы устройств контактной сети железных дорог в условиях гололедообразования.....	9
Гельвер С. А., Дроздова И. А. Исследование напряженно-деформированного состояния хребтовой балки грузового полувагона из алюминиевых сплавов методом нелинейного статического анализа.....	18
Гардеенков А. М., Логинова Е. Ю., Буйкин М. А. Снижение температуры обмотки якоря электрической машины постоянного тока.....	25

Управление процессами перевозок

Кучуков А. С., Шугаев О. В. Анализ зависимости отклонения временных показателей работы грузовых фронтов углепогрузочной станции от текущих расчетных данных....	36
Котенко А. Г., Сатторов С. Б. К вопросу усиления пропускной способности линии при введении ускоренных грузовых перевозок.....	44
Расулов М. Х., Каюмов Ш. Ш. Разработка устройства для эффективного закрытия разгрузочных люков полувагонов при выполнении грузовых операций на транспорте....	56

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Ильиных А. С., Кочергин В. И., Галай М. С. Моделирование процесса нагрева рельсовой плети при вводе в температурный режим.....	63
--	----

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

Ларин А. Н., Ларина И. В. Развитие транспортных коридоров в современных условиях.....	71
---	----

Энергетические системы и комплексы

Финиченко А. Ю., Полозкова А. П., Гусаров А. С. Исследование работы гидравлической системы солнечного коллектора с обратным дренажем.....	82
---	----

Электроэнергетика

Сапычина Е. Ю., Абуюев Р. Б. Алгоритм управления процессом точной синхронизации энергогорячона с сетью энергосистемы.....	90
Есаулов А. В., Тигунцев С. Г., Аиненков Е. О. Определение места повреждения в тяговой сети системы 2×25 кВ.....	101

Электротехнические комплексы и системы

Харламов В. В., Москалев Ю. В., Милютин А. Ю. Оптимизация полюсных наконечников ротора синхронной машины с постоянными магнитами.....	113
Кузнецов А. А., Волчанина М. А., Горлов А. В. Сравнение акустических сигналов и видеоизображений высоковольтных разрядов в масле в задачах диагностирования силовых трансформаторов.....	121

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

Лакин И. К. Анализ результатов разработки и внедрения системы автоматизированного управления надежностью локомотивов производства компании «Трансмашхолдинг».....	134
---	-----

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС (ОМНИИТ))»

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

УДК 629.4.069

В. А. Минаков, В. О. Носков, В. К. Фоменко, В. А. Четвергов

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

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ИСКРОГАСИТЕЛЯ ГРУЗОВОГО ЛОКОМОТИВА СЕРИИ 2ТЭ10 И ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОЖАРА

Аннотация. Рассмотрена конструкция системы искрогашения дизелей типа Д100, установленных на тепловозах серии 2ТЭ10, и выполнена оценка вероятности попадания искр в атмосферу после прохождения искрогасителя локомотива. Искрогаситель служит для исключения попадания искр выпускных газов в атмосферу. От исправной работы искрогасителя зависят степень пожароопасности на локомотиве и безопасность следования поездов в целом. При неисправной работе искрогасителя в совокупности с неисправной работой узлов дизеля локомотива возрастает вероятность попадания искр в атмосферу и, как следствие, повышается вероятность возникновения пожаров вдоль железнодорожных путей.

В статье выполнен анализ эффективности работы системы искрогашения, применяемой на грузовых локомотивах серии 2ТЭ10. Рассмотрена схема газовоздушного тракта тепловоза и выполнен анализ траектории движения искры, вылетающей из выхлопного коллектора локомотива. По результатам анализа установлено, что с учетом габаритов локомотива и профиля железнодорожного пути дальность полета искры из выхлопного коллектора локомотива может составлять от 8 до 26 м при скорости ветра до 6 м/с. Представлены результаты исследования нагретых частиц, вылетающих из глушителя тепловоза. Исследования выполнены в процессе испытаний локомотива на всех режимах работы дизель-генераторных установок, близких к номинальной мощности. В процессе испытаний зафиксирован вылет твердых частиц из выхлопной системы в размере, не превышающем 5 мм. Приведено распределение температурного поля по поверхности искрогасителя и вылетающих частиц нагара с помощью инфракрасного приемника – тепловизора. По результатам испытаний установлено, что температура на внутренней поверхности искрогасителя при работе двигателя на номинальной мощности находится в пределах 250 – 260 °C, а температура нагретых частиц снижается на 65 °C – с 253 до 188 °C – за время полета не более двух секунд.

Представленные в статье данные подтверждают важность контроля системы искрогашения на локомотивах, с целью исключения возникновения пожара и повышения безопасности эксплуатации поездов.

Ключевые слова: тепловоз, искрогаситель, дизель, повышение безопасности, пожароопасность, тепловизионный контроль.

Vitalii A. Minakov, Vitaliy O. Noskov, Valentin K. Fomenko, Vitaliy A. Chetvergov

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

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF THE SPARK EXTINGUISHER OF THE 2TE10 SERIES FREIGHT LOCOMOTIVE AND ASSESSMENT OF THE PROBABILITY OF A FIRE

Abstract. The design of the spark extinguishing system of diesel engines of the D100 type installed on diesel locomotives of the 2TE10 v/i series is considered and the probability of sparks entering the atmosphere after passing the spark extinguisher of the locomotive is estimated. The spark extinguisher is used to exclude the ingress of exhaust gas sparks into the atmosphere. The degree of fire hazard on the locomotive and the safety of the train as a whole depends on the proper operation of the spark extinguisher. In case of faulty operation of the spark extinguisher in conjunction with the faulty operation of the diesel engine components of the locomotive, the probability of sparks entering the atmosphere increases and, as a result, the probability of fires along the railway tracks increases.

The article analyzes the efficiency of the spark extinguishing system used on 2TE10 series freight locomotives. The scheme of the gas-air path of the locomotive is considered and the analysis of the trajectory of the spark flying out of the exhaust manifold of the locomotive is performed. According to the results of the analysis, it was found that, taking into account the dimensions of the locomotive and the profile of the railway track, the range of the spark from the exhaust manifold of the locomotive can be from 8 to 26 m, with a wind speed of up to 6 m/s. The results of the study of heated particles flying out of the muffler of the locomotive are presented. The research was carried out in the process of testing the locomotive in all operating modes of diesel generator sets close to the rated power. During the tests, the departure of solid particles from the exhaust system in a size not exceeding 5 mm was recorded. The distribution of the temperature field over the surface of the spark extinguisher and the outgoing carbon particles using an infrared thermal imager

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

receiver is given. According to the test results, it was found that the temperature on the inner surface of the spark extinguisher when the engine is running at rated power is in the range of 250–260 °C. And the temperature of the heated particles decreases by 65 °C from 253 °C to 188 °C during the flight of no more than two seconds.

The data presented in the article emphasize the importance of controlling the spark extinguishing system on locomotives, in order to avoid fire and improve the safety of train operation.

Keywords: diesel locomotive, spark extinguisher, diesel, safety improvement, fire hazard, thermal imaging control.

Пожары на локомотивах – это происшествия, связанные с возгоранием или появлением открытого огня на железнодорожном подвижном составе, приводящие к остановке движения и требующие применения экстренных мер по тушению огня и устранению последствий. Последствия, к которым могут привести пожары, имеют не только значительные материальные потери, к которым относится задержка движения поездов или порча подвижного состава, но могут привести и к травмам или гибели людей. Необходимо отметить, что тяжесть последствий пожаров на локомотиве и вне его зависит от множества факторов, таких как грамотные действия локомотивных бригад при пожаре, техническое состояние системы пожаротушения, наличие исправных узлов систем пожарной сигнализации и пожаротушения на локомотиве и др. Возникновение пожара на железнодорожном транспорте нарушает процесс эксплуатации и бесперебойность движения, что идет вразрез со стратегией развития железных дорог [1].

В настоящее время актуален вопрос о последствиях возгораний растительности, расположенной вблизи железнодорожной инфраструктуры, при эксплуатации железнодорожного транспорта. Статистические данные за последние годы указывают на отсутствие снижения числа пожаров на железнодорожном транспорте. Причины возгораний на локомотивах различные и в большинстве случаев возникают из-за технических неисправностей оборудования. Если рассматривать электровозы, то чаще всего причиной возгорания являются короткое замыкание в силовых цепях, повреждение силовых кабелей и круговой огонь в тяговых электродвигателях. На тепловозах к уже указанным причинам можно отнести неисправность системы смазки дизеля и турбокомпрессора, утечки топлива, в результате чего может произойти попадание горящего вещества (искр) в атмосферу и на крышу локомотива.

Попадание искр в атмосферу может привести к возгоранию как самого локомотива, так и окружающих его объектов и сухой травы, расположенных вдоль железной дороги. Часто причинами видимого огня или наличия искр в выпускном тракте двигателя является работа дизель-генераторной установки (ДГУ), имеющей неудовлетворительное техническое состояние узлов, на номинальных режимах дизеля.

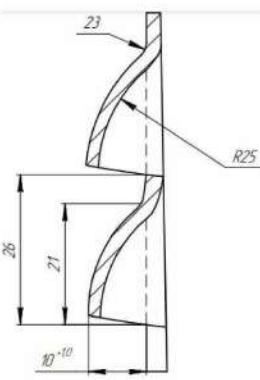
Для гашения образующихся искр в выпускном тракте дизеля, уносимых с отработавшими газами в атмосферу, служит искрогаситель (рисунок 1) [2 – 4].



a



б



в

Рисунок 1 – Искрогаситель тепловоза серии 2ТЭ10:
а – вид сверху; б – вид сбоку; в – чертежный размер

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Работа искрогасителя заключается в дожигании искр в корпусе до того, как они попадут в атмосферу. От исправной работы искрогасителя зависят степень пожароопасности на локомотиве и безопасность следования поездов в целом [7].

При неисправной работе искрогасителя в совокупности с работой двигателя, имеющего неисправности в узлах, на номинальных режимах возрастает вероятность возникновения возгорания объектов, расположенных вдоль железнодорожного полотна. Для моделирования и расчета дальности и времени полета искры на рисунке 2 приведена схема направления движения горючего вещества (искры), вылетающего из искрогасителя локомотива.

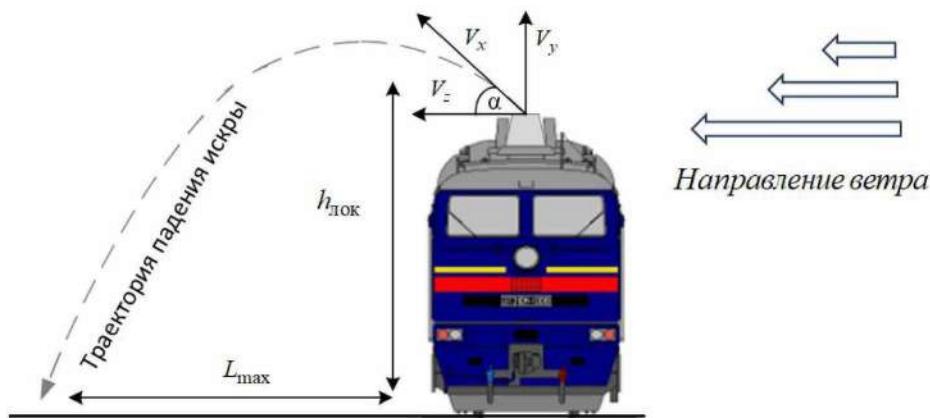


Рисунок 2 – Схема направления движения искры

На рисунке 2 обозначена скорость выхлопных газов V_y , скорость ветра V_x , скорость искры V_z , таким образом, скорость движения искры можно определить так:

$$V_z = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}. \quad (1)$$

Направление вылета искры из выхлопного тракта локомотива определяется углом α к горизонту:

$$\alpha = \arctg \frac{V_y}{V_x}. \quad (2)$$

Преобразуя представленную на рисунке 2 схему в систему координат, движение искры можно описать так:

$$x(t) = v_z \cos \alpha t; \quad (3)$$

$$y(t) = h_{\text{лок}} + v_z \sin \alpha t - \frac{gt^2}{2}, \quad (4)$$

где $h_{\text{лок}}$ – высота локомотива;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Учитывая, что в момент падения искры $x = L$, $y = 0$, где L – дальность полета искры, получим расстояние полета искры до падения на землю, м,

$$L = v_z \cos \alpha t; \quad (5)$$

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

время полета искры до падения на землю, с,

$$t = \left(v_z \sin \alpha + \sqrt{(v_z \sin \alpha)^2 + 2gh_{\text{лок}}} \right) / g. \quad (6)$$

Результаты расчета параметров движения искры, вылетающей из выхлопного коллектора грузового локомотива серии 2ТЭ10М, с учетом технических характеристик (высота локомотива – 4,9 м, высота железнодорожного полотна – 1,8 м) представлены в таблице.

Параметры движения искры

Скорость ветра, м/с	Угол вылета искры к горизонту	Скорость искры до падения на землю, м/с	Расстояние полета искры до падения на землю, м	Время падения, с
2	1,47	20,09	8,8	4,44
3	1,42	20,2	13,3	4,44
4	1,37	20,39	17,7	4,44
5	1,32	20,61	22,2	4,44
6	1,27	20,88	26,6	4,44

По результатам расчета с учетом габаритов локомотива и профиля железнодорожного пути установлено, что дальность полета искры из искрогасителя локомотива составляет от 8 до 26 м при скорости ветра до 6 м/с.

Вероятность возникновения возгорания сухой растительности от попадания искры зависит от размеров и температуры раскаленного вещества.

Оценка параметров раскаленной частицы, вылетающей из искрогасителя, выполнена в процессе испытаний локомотива на режимах работы дизель-генераторных установок, близких к номинальной мощности, где зафиксирован вылет твердых частиц из газовоздушного тракта. Оценка размера выявленных твердых частиц нагара приведена на рисунке 3.

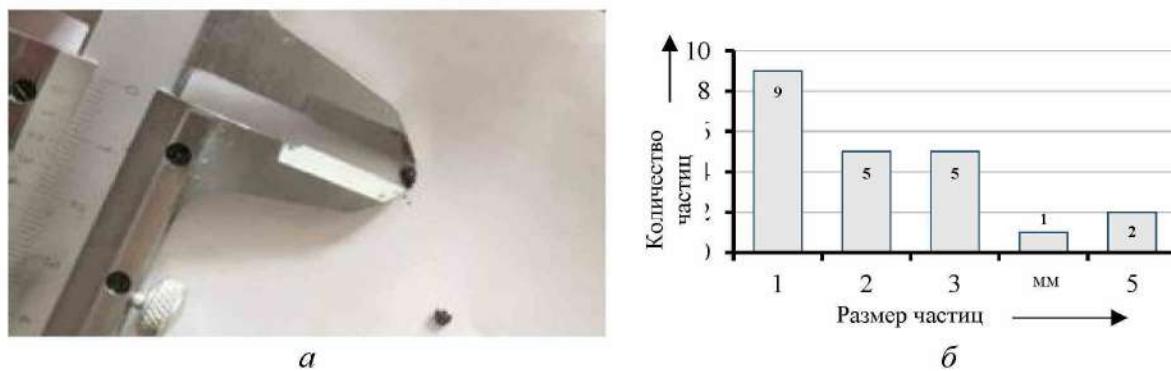


Рисунок 3 – Оценка размера выявленных твердых частиц нагара:
а – измерение твердых частиц; б – гистограмма распределения частиц

По результатам замера твердых частиц нагара установлено, что размер наибольшей частицы нагара не превышал 5 мм.

Следует отметить, что согласно ГОСТ 33754–2016 удельный средневзвешенный выброс твердых частиц не нормируется для данных двигателей и, следовательно, на данном этапе сложно выполнить оценку технического состояния двигателя внутреннего сгорания локомотива или работы системы искрогашения. Однако данный факт указывает на то, что в выпускных трактах дизелей присутствуют отложения нагара, которые выбрасываются в атмосферу в виде твердых раскаленных частиц потоком уходящих отработавших газов.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Стоит отметить, что при исследовании локомотива в цилиндрах дизеля происходило полное и равномерное сгорание топливно-воздушной смеси по всем цилиндрам, так как давление сгорания (вспышки) находилось в пределах нормы, температура отработавших газов не превышала регламентированных 430 °C, а разность температуры по цилиндрам не превышала 8 °C.

При проведении испытаний с помощью тепловизионной камеры Testo 875-2i выполнена оценка параметров температурного поля искрогасителя и частиц нагара. По результатам испытаний определено распределение температуры на внутренней поверхности корпуса искрогасителя (рисунок 4) и температуры раскаленной частицы нагара из газовоздушного тракта тепловоза (рисунок 5). Установлено, что температура на внутренней поверхности искрогасителя при работе двигателя на номинальной мощности находится в пределах 250 – 260 °C.

Испытания проходили на 15-й позиции контроллера машиниста (КМ) при отсутствии видимых языков пламени. Нагретые частицы нагара из газовоздушного тракта обнаружены только на крыше локомотива [5, 6].

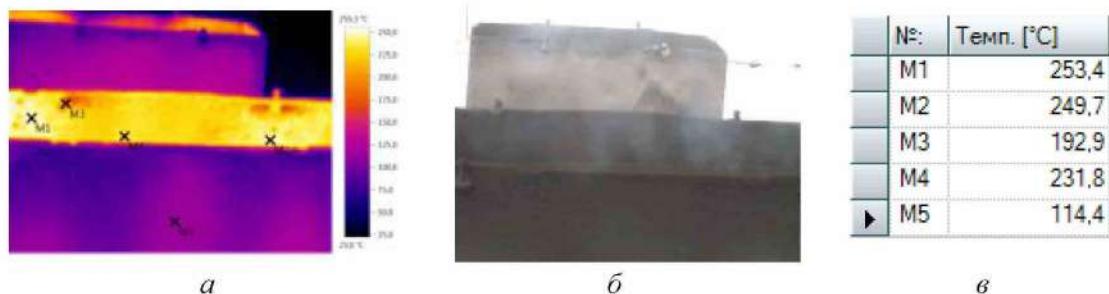


Рисунок 4 – Распределение температуры на внутренней поверхности корпуса искрогасителя на 15-й позиции контроллера машиниста: *а* – термограмма корпуса искрогасителя; *б* – корпус искрогасителя; *в* – температура корпуса искрогасителя

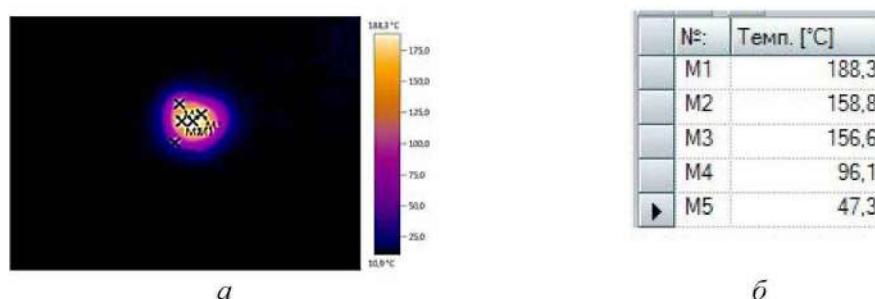


Рисунок 5 – Распределение температуры нагретой частицы нагара из газовоздушного тракта тепловоза 2ТЭ10У № 0250: *а* – термограмма искры; *б* – температура искры

Согласно полученным термограммам температура частиц нагара понизилась на 65 °C – с 253 до 188 °C, при этом за время полета и фиксации искры прошло не более 2 с. Следует отметить, что размер частицы 5 мм не изменился с момента падения до момента полного остывания частицы, что в свою очередь указывает на то, что данная частица не содержит химического состава, способного к дальнейшему окислению и преобразованию внутренней энергии химического соединения в дополнительную тепловую энергию при температуре ниже 250 °C. Вместе с тем довольно быстрое остывание частицы и отсутствие уменьшения ее размеров при остывании указывают на отсутствие процесса тления частицы нагара.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Время до полного остывания частицы определяется как $\tau = \frac{F_0}{\lambda} d_q C \rho$, где F_0 – критерий Фурье; λ – коэффициент теплопроводности частицы; d_q – диаметр частицы; C – теплоемкость материала частицы; ρ – плотность частицы.

При расчете времени полного остывания с учетом исходных данных, полученных по результатам испытаний, установлено, что до полного остывания частицы нагара с момента ее попадания на крышу локомотива проходит время $\tau = 2,6$ с.

Выводы сделаны на основании п. 5 прил. 3 «Метод определения возникновения пожара (взрыва) в пожаровзрывоопасном объекте» ГОСТ 12.1.004–91 «Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования» [9].

Учитывая результаты проведенных исследований о работе системы искрогашения на локомотиве и результаты теоретических исследований полета искры из искрогасителя тепловоза, можно сделать вывод о том, что вероятность возникновения пожара на прилегающей к железнодорожным путям территории при исправной работе дизеля узлов локомотива исключена. Стоит отметить, что оценку работоспособности искрогасителя в процессе эксплуатации локомотивов не проводят, ограничиваясь только внешним осмотром на текущем ремонте в объеме ТР-1, и при необходимости выполняют его очистку от нагара [8].

Для снижения вероятности возникновения пожара от вылетающих раскаленных частиц в атмосферу необходимо выполнять следующее:

комиссионный осмотр на предмет наличия исправной системы искрогашения, ее соответствия технической документации с указанием даты установки, технических характеристик, информации о техническом состоянии, последнем проведенном ремонте или обслуживании;

проверку исправности систем искрогашения на тепловозе с указанием даты и записью в журнал ТУ-28;

полный разбор системы искрогашения не реже чем на каждом ТР-2;

проверку работы системы искрогашения на реостатных или сдаточных испытаниях дизель-генераторной установки локомотива с записью в журнал ТУ-28 [10].

Представленные результаты подчеркивают важность контроля системы искрогашения на локомотивах с целью исключения возникновения пожара и повышения безопасности эксплуатации поездов.

Список литературы

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года. Утв. распоряжением Правительства Российской Федерации 17 июня 2008 г. № 877-р. – Москва : Правительство Российской Федерации; Транспорт, 2008. – 171 с. – Текст : непосредственный.
2. Семенов, А. П. Разработка модели управления жизненным циклом локомотивов с использованием современных методов технического диагностирования / А. П. Семенов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 3 (43). – С. 58–65.
3. Пассажирский тепловоз ТЭП70 / В. Г. Быков, Б. Н. Морошкин, Г. В. Серделевич, Ю. В. Хлебников. – Москва : Транспорт, 1976. – 232 с. – Текст : непосредственный.
4. Тепловоз ТЭ10М. Руководство по эксплуатации. – Москва : Транспорт, 1985. – 421 с. – Текст : непосредственный.
5. Устройство и ремонт тепловозов : учебник / Л. А. Собенин, В. И. Бахолдин, О. В. Зинченко, А. А. Воробьев. – Москва : Академия, 2004. – 416 с. – Текст : непосредственный.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

6. Теория и конструкция локомотивов / Г. С. Михальченко, В. Н. Кашников, В. С. Косов, В. А. Симонов. – Москва : Транспорт, 2006. – 584 с. – Текст : непосредственный.
7. Асламова, В. С. Системный анализ причин возникновения пожаров на локомотивах ОАО «РЖД» / В. С. Асламова, Е. Ю. Фролова. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2018. – № 4 (60). – С. 63–70.
8. Кононов, В. Е. Справочник машиниста тепловоза / В. Е. Кононов, А. В. Скалин, Н. М. Хуторянский. – Москва : Транспорт, 2005. – 293 с. – Текст : непосредственный.
9. ГОСТ 12.1.004–91. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования. – Москва : Стандартинформ, 2006. – 68 с. – Текст : непосредственный.
10. Аврунин, А. Г. Тепловозные дизели 2Д100 и 10Д100 / А. Г. Аврунин. – Москва : Транспорт, 1970. – 320 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Russian Federation. Government. Strategy for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030. Moscow, Transport Publ., 2008, 171 p. (In Russian).
2. Semenov A.P. A model develop for the locomotives life cycle managing of using modern technical diagnosis methods. *Izvestia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2020, no. 3 (43), pp. 58-65 (In Russian).
3. Bykov B.G. *Passazhirskij teplovoz TEP70* [Passenger diesel locomotive TEP70]. Moscow, Transport Publ., 1976, 232 p. (In Russian).
4. *Teplovoz TE10M. Rukovodstvo po ekspluatacii*. [TE10M diesel locomotive. User Manual]. Moscow, Transport Publ., 1985, 421 p. (In Russian).
5. Sobenin L.A., Baholdin V.I., Zinchenko O.V., Vorob'ev A.A. *Ustrojstvo i remont teplovozov: uchebnik* [Construction and repair of diesel locomotives: textbook]. Moscow, Academy Publ., 2004, 416 p. (In Russian).
6. Mihalchenko G.S., Kosov V.S., Simonov V.A. *Teoriya i konstrukciya lokomotivov* [Theory and design of locomotives]. Moscow, Transport Publ., 2006, 584 p. (In Russian).
7. Aslamova V.S., Frolova E.U. System analysis of the causes of fires on locomotives of JSC «Russian Railways» [Sistemnyj analiz prichin vozniknoveniya pozharov na lokomotivah OAO «RZHD»]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2018, no. 4 (60), pp. 63-70 (In Russian).
8. Kononov V.E. *Spravochnik mashinista teplovoza* [Diesel locomotive Driver's Handbook]. Moscow, Transport Publ., 2005, 293 p. (In Russian).
9. National Standard 12.1.004–91. The system of occupational safety standards. Fire safety. General requirements. Moscow, Standartinform Publ., 2006, 68 p. (In Russian).
10. Avrunin A.G. *Teplovoznye dizeli 2D100 i 10D100* [Diesel of locomotives 2D100 and 10D100]. Moscow, Transport Publ., 1970, 320 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Минаков Виталий Анатольевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.
Тел.: +7 (3812) 37-60-82.
E-mail: vitalya_13@mail.ru

Носков Виталий Олегович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Minakov Vitalii Anatolievich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

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

Phone: +7 (3812) 37-60-82.
E-mail: vitalya_13@mail.ru

Noskov Vitaliy Olegovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Старший преподаватель кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: vitalik_noskov@mail.ru

Фоменко Валентин Константинович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», директор Института повышения квалификации и переподготовки, ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: fomenkovk@mail.ru

Четвергов Виталий Алексеевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, профессор.

Тел.: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: ChetvergovVA@omgups.ru

Senior Lecturer of the department «Locomotives», OSTU.

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

E-mail: vitalik_noskov@mail.ru

Fomenko Valentin Konstantinovich
Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Locomotives», director of the Institute of Advanced Training and Retraining, OSTU.

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

E-mail: fomenkovk@mail.ru

Chetvergov Vitaliy Alekseevich
Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor of Sciences in Engineering, professor.

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

E-mail: ChetvergovVA@omgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Анализ эффективности работы искрогасителя грузового локомотива серии 2ТЭ10 и оценка вероятности возникновения пожара / В. А. Минаков, В. О. Носков, В. К. Фоменко, В. А. Четвергов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 4 (56). – С. 2 – 9.

Minakov V.A., Noskov V.O., Fomenko V.K., Chetvergov V.A. Analysis of the efficiency of the spark extinguisher of the 2TE10 series freight locomotive and assessment of the probability of a fire. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 4 (56), pp. 2-9 (In Russian).

УДК 629.039.58

А. А. Ковалев, А. В. Андрюков

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

ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ УСТРОЙСТВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ В УСЛОВИЯХ ГОЛОЛЕДООБРАЗОВАНИЯ

Аннотация. Наибольшее количество отказов на контактной сети происходит из-за недостатков в эксплуатационной работе, отклонений в технических параметрах элементов системы. Значительная часть нарушений связана с внешними климатическими факторами, например, с гололедом, который существенно повышает нагрузку на провода. Гололед является основным препятствием в процессе передачи тока по контактным проводам. Несмотря на то, что его продолжительность в течение года невелика, серьезные последствия, которые могут возникнуть в результате гололедообразования, требуют тщательной подготовки к борьбе с ним. Гололедообразование на контактном проводе ухудшает токосъем, вызывая образование электрической дуги. В статье приведена классификация состояний контактной сети, которая позволит правильно оценить работоспособность системы и обеспечит правильные условия эксплуатации устройств контактной сети. По классификационному признаку выделено три вида состояния: работоспособное, предотказное и неработоспособное. На основе метода «псевдостояний» был рассмотрен процесс возникновения отказов контактной сети по причине гололедообразования в виде графа состояний и переходов, который позволяет повысить надежность устройств контактной сети на участках железнодорожных магистралей и спланировать мероприятия по предотвращению гололедообразования на проводах контактной подвески. Предложена структурная схема надежности при токосъеме, отличающаяся тем, что предлагаемая математическая модель процесса отказов устройств контактной сети будет иметь ряд обоснованных допущений и упрощений, позволяющих решить систему уравнений. По разработанной математической модели

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

было составлено уравнение Колмогорова, которое позволяет рассчитать работоспособное состояние контактной сети и предотказное состояние ее устройств, подвергшихся гололедообразованию.

Ключевые слова: контактная сеть, надежность, отказ, неисправность, повреждение, граф состояний, железная дорога.

Alexey A. Kovalev, Alexander V. Andryukov

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

RESEARCHING THE RAILWAYS CONTACT NETWORK DEVICES OPERATION RELIABILITY UNDER ICE FORMATION CONDITIONS

Abstract. The largest number of failures on the contact network occurs due to deficiencies in operational work, deviations in the technical parameters of the system elements. A significant part of the violations is associated with external climatic factors, for example, with ice, which significantly increases the load on the wires. Ice is the main obstacle in the process of transmitting current through the contact wires. Despite the fact that its duration during the year is small, the serious consequences that may arise as a result of ice formation require careful preparation to combat it. Ice formation on the contact wire worsens the current collection, causing the formation of an electric arc. The article presents a classification of the contact network states, which will allow to correctly assess the system performance and ensure the correct operating conditions of the contact network devices. According to the classification feature, three types of condition can be distinguished: operable, pre-failure and inoperable. Based on the "pseudo-states" method, the process of contact network failures due to ice formation was considered in the form of a graph of states and transitions, which will increase the reliability of contact network devices on railway sections and plan measures to prevent ice formation on contact suspension wires. A physical model of the elements of the contact network exposed to ice is proposed, characterized in that the proposed mathematical model of the failure process of the contact network devices will have a number of assumptions and simplifications that allow it to be solved. According to the developed mathematical model, the Kolmogorov equation was compiled, which will allow calculating the operational state of the contact network and the pre-failure state of its devices subjected to ice formation.

Keywords: contact network, reliability, failure, malfunction, damage, status graph, railway.

За надежную работу любой технической системы отвечают все этапы ее жизненного цикла. Возьмем за пример такой элемент тягового электроснабжения, как контактная сеть, на которую воздействуют токовые (тяговые), эксплуатационные, механические и климатические нагрузки. Контактная сеть должна обеспечивать бесперебойную эксплуатацию всех своих устройств, состоящих из последовательно и параллельно соединенных элементов, которые в процессе эксплуатации подвергаются старению, разрегулировкам и отказам. Элементы контактной сети, соединенные между собой последовательно, приводят к отказу всей системы при отказе одного из них, поэтому обеспечивать безаварийную работу контактной сети – комплексная задача для отрасли [1].

Устройства контактной сети подвержены гололеду. Образование гололеда на устройствах контактной сети влияет на отказ системы. Обрыв струн может привести к повреждению токоприемника и т. д. Обеспечение работоспособности и надежного взаимодействия устройств контактной сети между собой при образовании гололеда является одной из главных проблем в отрасли железнодорожного транспорта [2].

Рассмотрим виды состояния контактной сети и влияние ее надежности на работоспособность железнодорожной транспортной инфраструктуры, которая обеспечит требуемые условия эксплуатации устройств контактной сети (рисунок 1).

Для возможности последующего применения устройств контактной сети можно выделить три вида состояний: работоспособное, предотказное и неработоспособное состояние [3].

Работоспособным называется такое состояние контактной сети, при котором значения всех параметров, характеризующих ее способность выполнять все заданные функции, соответствуют требованиям нормативной документации, а именно:

1) равномерная эластичность контактной подвески и постоянная масса ее по длине пролета, отсутствие резких изменений уклонов контактного провода в вертикальной плоскости и сосредоточенных масс на контактном проводе;

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

- 2) постоянное контактное нажатие при движении токоприемника;
- 3) допустимая стрела провеса контактного провода и несущего троса в середине пролета [4].

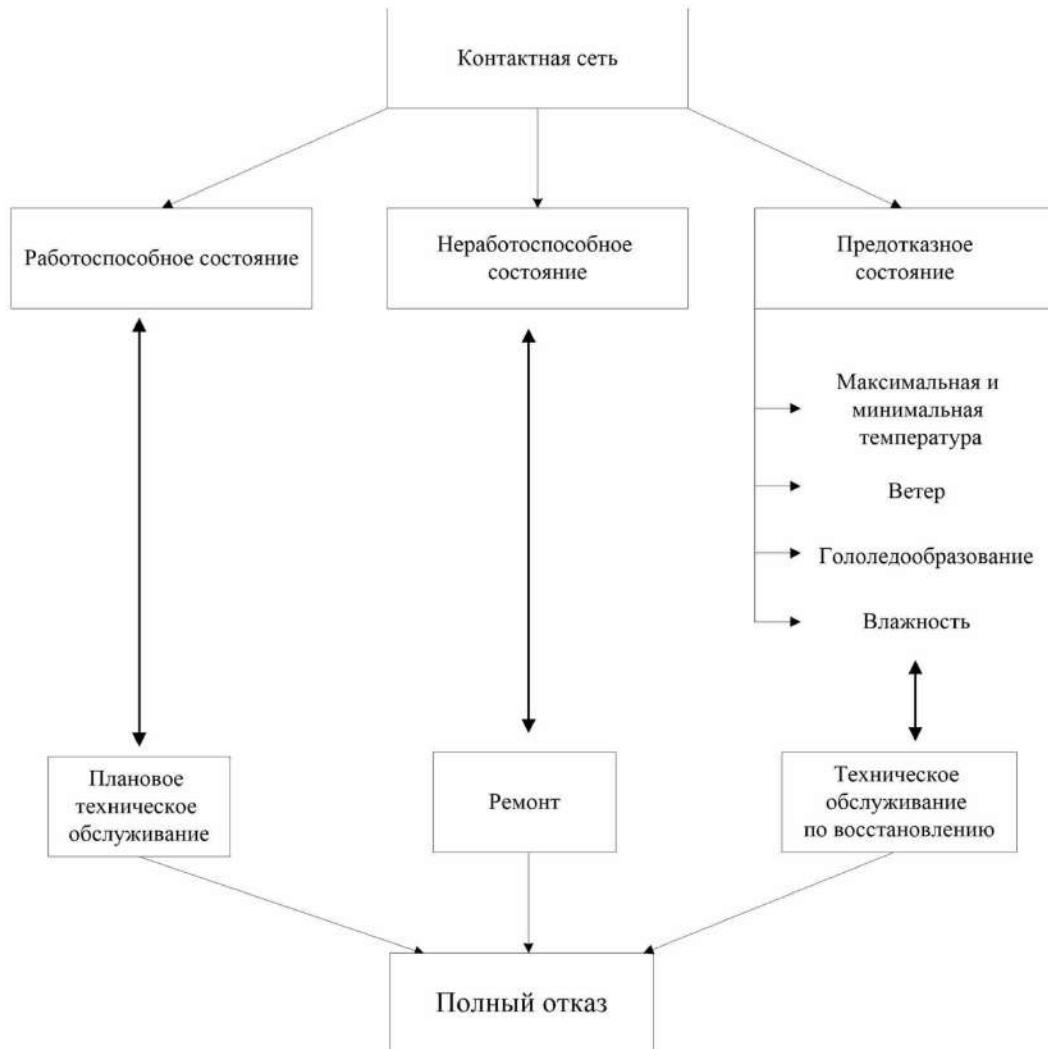


Рисунок 1 – Виды состояния контактной сети

Для того чтобы поддерживать работоспособность и исправность всех элементов контактной сети при их эксплуатации, необходимо проводить своевременное техническое обслуживание. В ходе осмотра контактной сети оценивается состояние устройств с устранением повреждений при их обнаружении, а при проследовании электроподвижного состава во время обходов визуально оценивается качество токосъема [5].

Неработоспособным состоянием контактной сети называется такое состояние, при котором она не может выполнить хотя бы одну из требуемых функций, которые в нее заложены.

После отказа всей системы контактной сети должно производиться внеплановое техническое обслуживание и при необходимости ремонт (замена) проводов контактной подвески. Все работники, обслуживающие контактную сеть, должны ознакомиться с заявками машинистов о неисправностях контактной сети и устранять эти неисправности, а также выявлять степень износа контактного провода и наличия на нем надломов, проводить мероприятия по предотвращению возникновения гололеда [5].

Предотказным состоянием называется состояние контактной сети, характеризуемое повышенным риском его отказа. Существует несколько климатических важных факторов, которые вызывают предотказное состояние контактной сети:

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

- 1) минимальная и максимальная температура окружающей среды;
- 2) гололедообразование;
- 3) атмосферное давление;
- 4) относительная влажность воздуха;
- 5) количество выпавших осадков.

Сведения о климатических условиях структурных подразделений Трансэнерго уточняются с использованием карты районирования территории Российской Федерации по климатическим характеристикам. Для выбора параметров окружающей среды, при которых возможно образование льда, можно использовать данные метеостанций и метеодатчиков Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды [6].

Ликвидация повреждения, вызванного процессом перевода контактной сети из предотказного состояния в исправное работоспособное, производится путем технического обслуживания по восстановлению.

Существует такое предельное состояние контактной сети, когда ее дальнейшая эксплуатация недопустима, либо техническое обслуживание, восстановление его работоспособного состояния и ремонт также нецелесообразны. Переход в такое состояние приводит к полному отказу всей системы (отклонение параметров от норм, при котором использование данной системы невозможно).

Для оценки надежности работы системы используется участок железнодорожной магистрали. Данный участок как сложная система функционирует дискретно в пространстве состояний и непрерывно во времени. Назначение такой системы заключается в том, чтобы обеспечить работоспособное состояние контактной сети при образовании гололеда на ее устройствах. С помощью метода «псевдосостояний» имеющий место в этом случае немарковский процесс сводится к марковскому, т. е. когда будущее поведение системы зависит от настоящего и не зависит от предыстории процесса при введении следующих допущений [7]:

1) потоки отказов и восстановлений элементов контактной сети ординарны (отказ или восстановление не более одного элемента);

2) функционирование устройств контактной сети является случайным процессом, т. е. интенсивность появления отказа элемента контактной сети зависит от времени и представляет собой значение, равное среднему числу событий, наступивших в единицу времени.

На рисунке 2 представлена математическая модель в виде процесса отказов устройств контактной сети по причине гололедообразования.

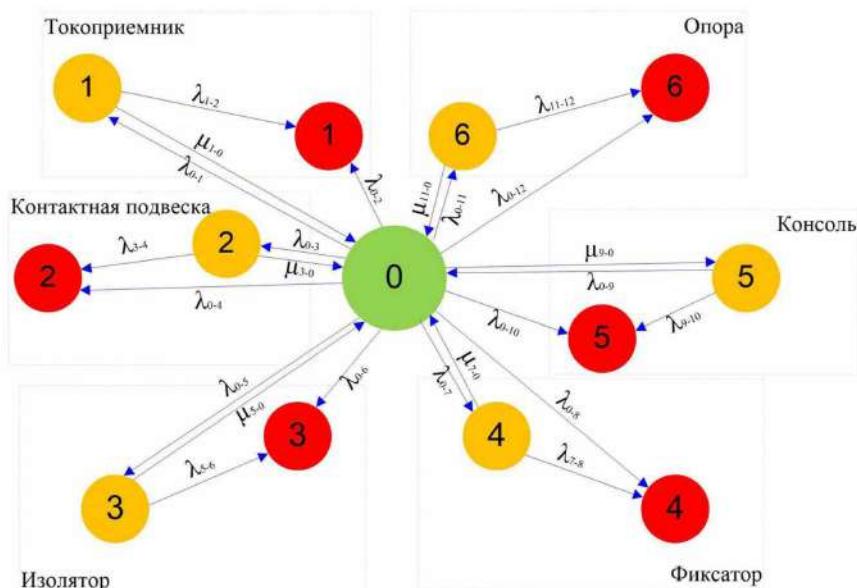


Рисунок 2 – Граф состояний и переходов контактной сети в состояние отказа при наличии гололедообразования для участков железнодорожной магистрали

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Система может находиться

- в исправном состоянии (0) и обеспечивать движение поездов на 100 %;
- работать с пониженной эффективностью из-за повреждения одного из элементов (состояния оранжевого цвета);
- в неработоспособном состоянии из-за полного отказа одного из элементов контактной сети (состояние красного цвета).

Переход из одного состояния в другое характеризуется отказом или восстановлением только одного устройства контактной сети. Каждый элемент характеризуется средним временем между его отказами T_{oi} и интенсивностью отказов λ_{ij} , средним временем восстановления T_{bi} и интенсивностью восстановления μ_{ij} , где i – состояние элемента перед отказом (после восстановления); j – состояние элемента после отказа. Исходя из решения этой системы и знания средних значений времени между отказами элементов контактной сети и времени их восстановления могут быть рассчитаны основные показатели надежности:

$$\lambda_{ij} = \frac{1}{T_{oi}}, \quad (1)$$

где λ_{ij} – интенсивность отказов,

$$\mu_{ij} = \frac{1}{T_{bi}}, \quad (2)$$

где μ_{ij} – интенсивность восстановлений.

Для расчета надежности любых систем с целью определения наиболее эффективных режимов эксплуатации, стратегий технического обслуживания и ремонтов необходимо правильно составить структурную схему надежности – наглядное представление условий, при которых работает или не работает исследуемая система [7, 8].

На рисунке 3 представлен вариант последовательной структуры в виде работы элементов контактной сети при токосъеме, подвергающихся различным климатическим факторам, на основе которой будет выполнен расчет схемы надежности.

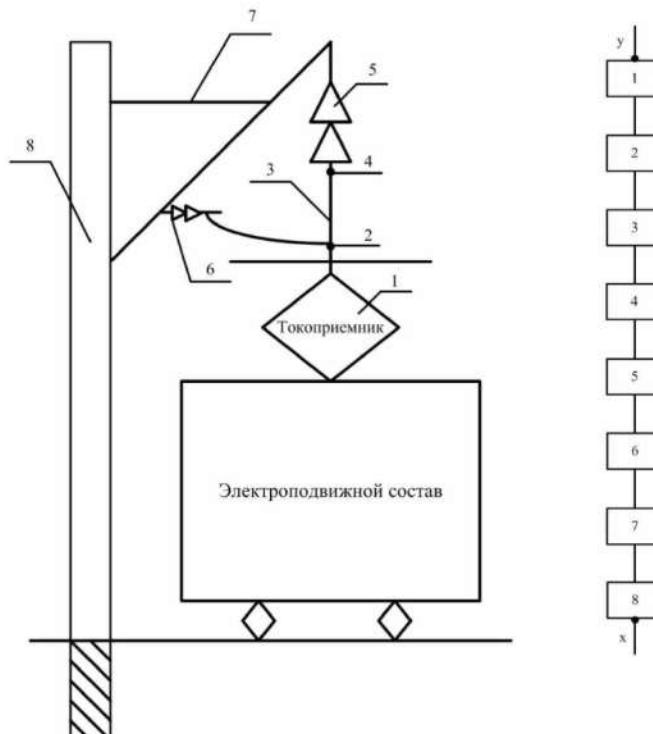


Рисунок 3 – Структурная схема надежности контактной сети при токосъеме

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Рассмотрим работу устройств контактной сети. С точки зрения надежности все элементы контактной сети имеют последовательную структуру, т. е. последовательно соединяются элементы контактной сети, повреждение каждого из которых приводит к повреждению системы. Система состоит из восьми объектов. Повреждение системы наступает тогда, когда произойдет частичный отказ опоры контактной сети (8), консоли (7), фиксатора (6), изолятора (5), несущего троса (4), струны (3), контактного провода (2) и токоприемника (1).

Тогда граф состояний и переходов контактной сети в состояние предотказа в условия гололедообразования при последовательном соединении элементов будет иметь ветвящийся вид (рисунок 4).

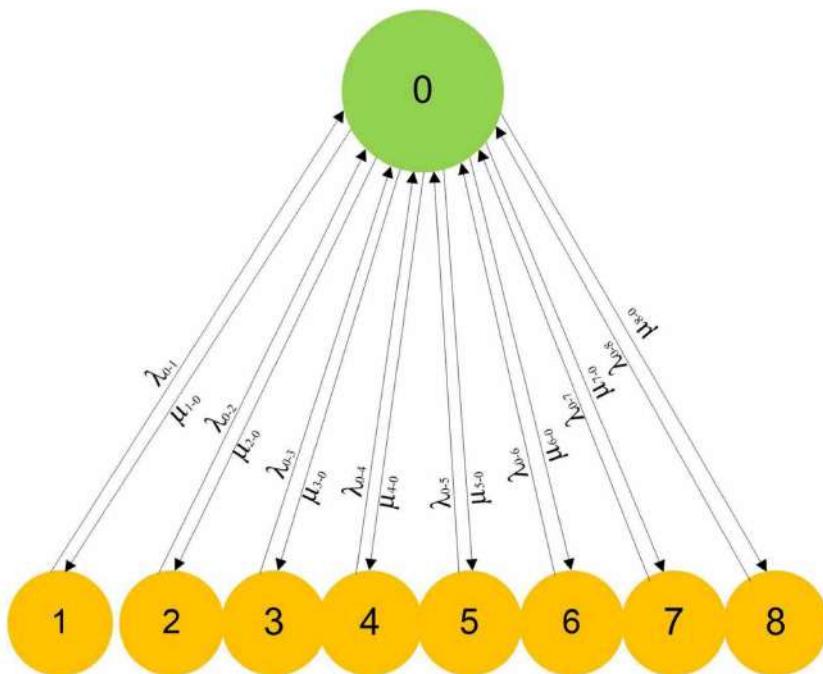


Рисунок 4 – Итоговая математическая модель процесса отказов устройств в условиях гололедообразования

При расчете надежности математической модели с восстановлением необходимо учитывать некоторые особенности системы.

После включения питания контактная сеть должна безотказно работать заданное время и перерывы в работе недопустимы. Для системы с восстановлением рассчитывается вероятность непрерывной безотказной работы (условная вероятность безотказной работы).

При этом возможность обратных переходов из неработоспособного (поглощающего) состояния в исправное работоспособное не рассматривается [9].

Описать исследуемый процесс можно с помощью системы уравнений Колмогорова, которая включает в себя нахождение вероятностей в исправном работоспособном состоянии контактной сети и предотказном состоянии ее устройств, подвергшихся гололедообразованию.

Составим такую систему уравнений (3) по следующим правилам:

слева от знака равенства в уравнениях системы (3) находится производная от вероятности $dP_i(t)/dt$;

справа от знака равенства в уравнениях системы (3) стоит сумма произведений вероятностей всех переходов, входящих в состояние системы (входящие стрелки), на интенсивности состояния, умноженная на суммарную интенсивность переходов, выводящих из данного состояния систему.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_0(t)}{dt} = (-\lambda_{01} - \lambda_{02} - \lambda_{03} - \lambda_{04} - \lambda_{05} - \lambda_{06} - \lambda_{07} - \lambda_{08})P_0(t) + \\ + \mu_{10}P_1(t) + \mu_{20}P_2(t) + \mu_{30}P_3(t) + \mu_{40}P_4(t) + \mu_{50}P_5(t) + \mu_{60}P_6(t) + \mu_{70}P_7(t) + \mu_{80}P_8(t); \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = \lambda_{01}P_0(t) - \mu_{10}P_1(t); \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_{02}P_0(t) - \mu_{20}P_2(t); \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda_{03}P_0(t) - \mu_{30}P_3(t); \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = \lambda_{04}P_0(t) - \mu_{40}P_4(t); \\ \frac{dP_5(t)}{dt} = \lambda_{05}P_0(t) - \mu_{50}P_5(t); \\ \frac{dP_6(t)}{dt} = \lambda_{06}P_0(t) - \mu_{60}P_6(t); \\ \frac{dP_7(t)}{dt} = \lambda_{07}P_0(t) - \mu_{70}P_7(t); \\ \frac{dP_8(t)}{dt} = \lambda_{08}P_0(t) - \mu_{80}P_8(t). \end{array} \right. \quad (3)$$

Для решения системы (3) нужно добавить еще одно уравнение, которое определяет нормировочное условие, поскольку сумма вероятностей всех состояний системы равна единице:

$$P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) + P_5(t) + P_6(t) + P_7(t) + P_8(t) = 1. \quad (4)$$

Начальные условия решения системы (3):

$$\left\{ \begin{array}{l} P_0(t) = 1; \\ P_1(0) = P_2(0) = \dots = P_8(0). \end{array} \right. \quad (5)$$

В установившемся режиме эксплуатации $t \rightarrow \infty$. Чтобы найти финальные вероятности состояний, в уравнениях Колмогорова отбросим первое уравнение и найдем P_0 из последнего уравнения. Данная система принимает следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_{01}P_0(t) - \mu_{10}P_1(t) = 0; \\ \lambda_{02}P_0(t) - \mu_{20}P_2(t) = 0; \\ \lambda_{03}P_0(t) - \mu_{30}P_3(t) = 0; \\ \lambda_{04}P_0(t) - \mu_{40}P_4(t) = 0; \\ \lambda_{05}P_0(t) - \mu_{50}P_5(t) = 0; \\ \lambda_{06}P_0(t) - \mu_{60}P_6(t) = 0; \\ \lambda_{07}P_0(t) - \mu_{70}P_7(t) = 0; \\ \lambda_{08}P_0(t) - \mu_{80}P_8(t) = 0. \end{array} \right. \quad (6)$$

Предлагаемая модель процесса отказов устройств контактной сети при образовании гололеда позволит повысить надежность работы устройств контактной сети в условиях

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

образования гололеда и обеспечит нормальную совместную работу контактной сети с токоприемниками:

1) уменьшается вероятность снижения статического контактного нажатия на токоприемник;

2) уменьшается вероятность обрыва и пережога контактных проводов при наличии гололеда.

На основе графа состояний и переходов для соединенных между собой устройств контактной сети можно произвести следующее:

рассчитать вероятность безотказной работы системы, вероятности предотказного состояния устройств и построить график функции надежности за определенный период наблюдения;

по полученному графику определить финальную вероятность отказа контактной сети из-за гололедообразования на участках железнодорожных магистралей, тем самым уточнить предлагаемый расчет;

оценить риск появления гололеда на участке контактной сети, где потребуется планирование мероприятий по предупреждению гололедообразования.

Для верификации модели планируется провести дополнительные исследования с целью определения факта возникновения неблагоприятных условий на участке контактной сети, которые могут привести к образованию гололеда.

Список литературы

1. Марквардт, К. Г. Контактная сеть / К. Г. Марквардт. – Москва : Транспорт, 1994. – 335 с. – Текст : непосредственный.
2. Бунзя, А. В. Разработка устройства удаления гололеда с двойного контактного провода импульсно-резонансным методом на основе управляемого преобразователя : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Бунзя Андрей Вадимович ; Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург, 2007. – 185 с. – Текст : непосредственный.
3. ГОСТ Р 27.102–2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. – Москва : Стандартинформ, 2021. – 40 с. – Текст : непосредственный.
4. Ковалев, А. А. Оценка влияния стрел провеса контактного провода на возможность повышения скорости движения на участке контактной сети «Екатеринбург – Челябинск» / А. А. Ковалев, А. В. Андрюков. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2023. – № 1 (76). – С. 116–119.
5. Бутенко, Е. А. Совершенствование технологии обслуживания контактной сети / Е. А. Бутенко, А. Н. Смердин, В. М. Павлов. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы науч. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2022. – С. 120–125.
6. Разработка вероятностной модели прогнозирования отказов в работе системы токосъема вследствие гололедообразования на проводах контактной сети / А. Н. Смердин, А. В. Тарабенко, И. Е. Чертков, А. С. Голубков. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 2 (46). – С. 62–71.
7. Галкин, А. Г. Основы теории надежности / А. Г. Галкин, А. А. Ковалев. – Екатеринбург : Уральский гос. ун-т путей сообщения, 2021. – 134 с. – Текст : непосредственный.
8. Галкин, А. Г. Применение контракта жизненного цикла для инфраструктурного комплекса системы токосъема / А. Г. Галкин, А. А. Ковалев, А. В. Микава. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2012. – № 3 (34). – С. 85–89.
9. Исследование надежности системы контактной сети железных дорог как фактора экономического развития региона / А. А. Ковалев, А. М. Маслов, Н. А. Аксенов,

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

А. Ю. Иванищев. – Текст : непосредственный // Транспортное дело России. – 2016. – № 4 (124). – С. 52–56.

References

1. Markvardt K.M. *Kontaktnaya set'* [Contact network]. Moscow, Transport Publ., 1994, 335 p. (In Russian).
2. Bunzya A.V. *Razrabotka ustroystva udalenia gololeda s dvoinogo kontaktnogo provoda impulsno-rezonansnym metodom na osnove upravlyayemogo preobrazovatelya* (Development of a device for removing ice from a double contact wire by pulse-resonance method based on a controlled converter). Doctor's thesis, Ekaterinburg, USURT, 2007, 185 p. (In Russian).
3. National Standard 27.102–2021. Reliability in technology. Reliability of the object. Terms and definitions. Moscow, Standardinform Publ., 2021, 40 p. (In Russian).
4. Kovalev A.A., Andryukov A.V. Assessment of the impact of the contact wire sag arrows on the possibility of increasing the speed of movement on the section of the contact network «Yekaterinburg – Chelyabinsk». *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2023, no. 1 (76), pp. 116–119 (In Russian).
5. Butenko E.A., Smerdin A.N., Pavlov V.M. Improvement of the contact network maintenance technology. *Innovacionnye proekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte. Materialy XVI nauchnoy konferencii, posvyaschennoy Dnyu Rossiiskoi nauki* [Innovative projects and technologies in education, industry and transport. Materials of the XVI scientific conference dedicated to the Day of Russian Science]. Omsk, 2022, pp. 120–125 (In Russian).
6. Smerdin A.N., Tarasenko A.V., Chertkov I.E., Golubkov A.S. Development of a probable failure prediction model in the operation of the current collection system due to ice formation on the wires of the contact network. *Izvestia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2021, no. 2 (46), pp. 62–71 (In Russian).
7. Galkin A.G., Kovalev A.A. *Osnovy teorii nadezhnosti* [Fundamentals of reliability theory]. Ekaterinburg, USURT Publ., 2021, 134 p. (In Russian).
8. Galkin A.G., Kovalev A.A., Mikava A.V. Application of the life cycle contract for the infrastructure complex of the current collection system. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2012, no. 3 (34), pp. 85–89 (In Russian).
9. Kovalev A.A., Maslov A.M., Aksenen N.A., Ivanishev A.Yu. Investigation of the reliability of the railway contact network system as a factor in the economic development of the region. *Transportnoe delo Rossii – Transport business of Russia*, 2016, no. 4 (124), pp. 52–56 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ковалев Алексей Анатольевич

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).
Колмогорова ул., д. 66, г. Екатеринбург, 620034,
Российская Федерация.

Кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Электроснабжение транспорта», УрГУПС.
Тел.: +7 (343) 221-24-78.
E-mail: akovalev@usurt.ru

Андрюков Александр Владимирович

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).
Колмогорова ул., д. 66, г. Екатеринбург, 620034,
Российская Федерация.

Ассистент кафедры «Электроснабжение транспорта», УрГУПС.
Тел.: +7 (343) 221-24-78.
E-mail: aandryukov@usurt.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kovalev Alexey Anatolievich

Ural State University of Railway Transport (USURT).
66, Kolmogorova st., Ekaterinburg, 620034, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, head of the department «Transport power supply», USURT.
Phone: +7 (343) 221-24-78.
E-mail: akovalev@usurt.ru

Andryukov Alexander Vladimirovich

Ural State University of Railway Transport (USURT).
66, Kolmogorova st., Ekaterinburg, 620034, the Russian Federation.

Assistant of the department «Transport power supply», USURT.
Phone: +7 (343) 221-24-78.
E-mail: aandryukov@usurt.ru

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Ковалев, А. А. Исследование надежности работы устройств контактной сети железных дорог в условиях гололедообразования / А. А. Ковалев, А. В. Андрюков. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 4 (56). – С. 9 – 18.

Kovalev A.A., Andryukov A.V. Researching the railways contact network devices operation reliability under ice formation conditions. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 4 (56), pp. 9-18 (In Russian).

УДК 629.463

С. А. Гельвер, И. А. Дроздова

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

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ХРЕБТОВОЙ БАЛКИ ГРУЗОВОГО ПОЛУВАГОНА ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ НЕЛИНЕЙНОГО СТАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Аннотация. В статье рассматривается напряженно-деформированное состояние хребтовой балки грузового полувагона из алюминиевого сплава АМг6 производства Уралвагонзавода (УВЗ) при воздействии на нее нормативных нагрузок. Для алюминиевых сплавов характерна нелинейная зависимость между напряжениями и деформациями (физическая нелинейность). Существующими нормативными документами для расчета грузовых вагонов на прочность учет этого явления не предусмотрен. Поэтому в работе решается задача оценки влияния физической нелинейности на напряженно-деформированное состояние хребтовой балки. В рамках решения поставленной задачи разработана математическая модель для исследования предельного напряженно-деформированного состояния балки, а также рассматривается возможность применения процедуры метода конечных элементов на основе программного комплекса ANSYS с использованием модели многогиперболической упругости, которая определяется опцией MELAS. Для достижения хребтовой балкой предельного напряженно-деформированного состояния, при котором можно наблюдать существенные отклонения от закона Гука (до 10–15 %), по I расчетному режиму в рамках разработанной математической модели предложена расчетная схема, позволяющая моделировать это предельное состояние. В качестве допустимого значения напряжения по I расчетному режиму принимается значение, равное условному пределу текучести. Для сплава АМг6 эта величина составляет 140 МПа. Результат расчета в линейном приближении дает величину максимального значения напряжения в опасном сечении 151 МПа, что превышает предельно допускаемое значение (140 МПа). Результаты расчета в нелинейном приближении: максимальное значение напряжения – 139 МПа, что не превышает предельно допустимого значения. Эта величина на 9 % меньше соответствующего значения, полученного при линейном расчете. Приведенный в работе алгоритм исследований позволяет выявлять скрытый резерв прочности конструктивных элементов грузового полувагона и создавать конструкции, оптимизированные по весовым и прочностным характеристикам.

Ключевые слова: полувагон из алюминиевого сплава, физическая нелинейность, многогиперболическая упругость.

Sergey A. Gelver, Ilga A. Drozdova

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

INVESTIGATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE SPINE BEAM OF ALUMINUM ALLOY CARGO GONDOLA USING THE NONLINEAR STATIC ANALYSIS METHOD

Abstract. The paper examines the stress-strain state under the impact of standard loads on the spine beam of a freight gondola made of AMg6 aluminum alloy produced by Uralvagonzavod (UVZ). Aluminum alloys exhibit a nonlinear relationship between stress and strain (physical nonlinearity). Existing regulatory documents for the strength calculation of freight cars do not consider this phenomenon. Therefore, the work addresses the task of assessing the influence of physical nonlinearity on the stress-strain state of the spine beam. Within the solution of this task, a mathematical model has been developed to study the ultimate stress-strain state of the beam. The possibility of applying the finite element method procedure based on the ANSYS software suite using the multilinear elasticity model, defined by the MELAS option, is also considered. To achieve the ultimate stress-strain state of the spine beam, where significant deviations from Hooke's law can be observed (up to 10–15 %), a calculation scheme was proposed within the developed mathematical model for the first calculation mode, allowing to simulate this ultimate state. As the allowable stress value for the first calculation mode, the value equal to the conventional yield limit is taken. For the AMg6 alloy this value is 140 MPa. The result of

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

the calculation in linear approximation gives a maximum stress value in the critical section of 151 MPa, which exceeds the maximum permissible value (140 MPa). The results of the calculation in nonlinear approximation: the maximum stress value is 139 MPa, which does not exceed the maximum permissible value. This value is 9 % less than the corresponding value obtained in the linear calculation. The research algorithm presented in the work allows identifying the hidden reserve of strength in structural elements of freight gondolas and creating designs optimized in terms of weight and strength characteristics.

Keywords: aluminum alloy gondola, physical nonlinearity, multi-linear elasticity.

Существующими Нормами [1] при расчете на прочность проектируемых конструкций грузовых вагонов рекомендуется использовать метод конечных элементов (МКЭ), который реализован в широко известных программных комплексах ANSYS, NASTRAN и др.

Как показано в работах [2 – 5], учет нелинейности деформирования конструкционного материала (физической нелинейности) при некоторых нормативных видах нагружения позволяет проводить исследования по созданию перспективных конструкций, оптимизированных по прочностным и весовым характеристикам. В данных работах предложена методика учета физической нелинейности конструкционного материала на основе обобщения основных соотношений линейной теории упругости (метод сил, МКЭ).

О возможности использования современных систем автоматизированного проектирования (САПР) говорится в работах [6 – 8].

В настоящей работе рассматривается возможность проведения нелинейного статического анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) хребтовой балки грузового полувагона из алюминиевого сплава АМг6 производства Уралвагонзавода на основе встроенных функций программного комплекса ANSYS.

Программа ANSYS является «линейным» кодом, однако имеется множество дополнительных возможностей, которые используются для задания нелинейных свойств материала. Для описания этих свойств используется широкий набор приближений.

Физическая нелинейность конструкционного материала – это отклонение от прямой пропорциональной зависимости между напряжениями и деформациями (в соответствии с законом Гука). Этот эффект усиливается по мере приближения напряжения к пределу текучести материала (условному пределу текучести).

Процесс деформирования может носить упругий или неупругий характер. При упругом поведении материала после снятия деформирующей нагрузки остаточная деформация не появляется. При неупругом процессе наблюдаются остаточные деформации после прекращения действия внешней нагрузки. В данной работе анализ прочности проводится без учета скорости деформации.

Расчеты на основе закона Гука регламентируются существующими нормами и являются самыми распространенными в конструировании подвижного состава. Однако следует отметить, что в последние годы в практике вагоностроения находят применение новые конструкционные материалы (алюминиевые сплавы, композиты), которые являются физически нелинейными материалами. Даже для традиционно используемых в вагоностроении сталей по мере приближения напряжений к пределу текучести наблюдается эффект физической нелинейности. Согласно требованиям Норм расчета допустимое напряжение по I расчетному режиму принимается равным пределу текучести (условному пределу текучести).

Многолинейная упругость в ANSYS определяется опцией MELAS. В данном случае строится следующая модель поведения материала. Вся диаграмма деформирования разбивается на такие небольшие участки, в пределах которых предполагается линейная зависимость между напряжениями и деформациями, находящихся в полном согласии с известным законом Гука. Тангенс угла наклона касательной к графику зависимости напряжений от деформаций определяет модуль упругости Юнга на этом участке. В пределах рассматриваемого участка поведение материала предполагается линейно упругим.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Для задания параметров опции многолинейной упругости в ANSYS используется специальный графический интерфейс, изображенный на рисунке 1.

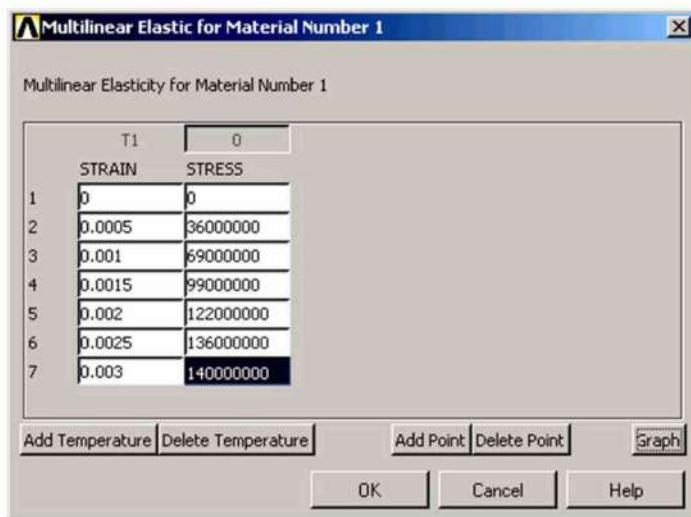


Рисунок 1 – Панель ввода диаграммы деформирования

При вводе значений относительной деформации и соответствующего напряжения реальной диаграммы растяжения-сжатия материала используется следующая последовательность команд: «**Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material > Models Structural, Nonlinear, Elastic, Multilinear Elastic**». Для контроля ввода реальной диаграммы деформирования в ANSYS предусмотрена опция, которая может быть вызвана в окне «**Multilinear Elastic for Material Number ...**» командой «**Graphics**».

Оценка влияния физической нелинейности на НДС хребтовой балки алюминиевого полувлагона по I расчетному режиму проводится в работе [3]. Автором этой работы на основе полученного обобщения метода сил на случай нелинейного закона деформирования в виде кубической параболы была предложена методика учета отклонения от закона Гука.

При оценке прочности балки по I режиму от действия вертикальной нагрузки результаты расчетов в линейном и нелинейном приближениях практически совпадают. Это происходит потому, что при данном виде нормативного нагружения НДС балки не достигает предельно допустимого состояния, при котором можно наблюдать существенные отклонения от закона Гука (до 10 – 15 %). Поэтому авторами настоящей работы была предложена расчетная схема, изображенная на рисунке 2 и позволяющая моделировать предельное НДС реально существующей конструкции (хребтовой балки):

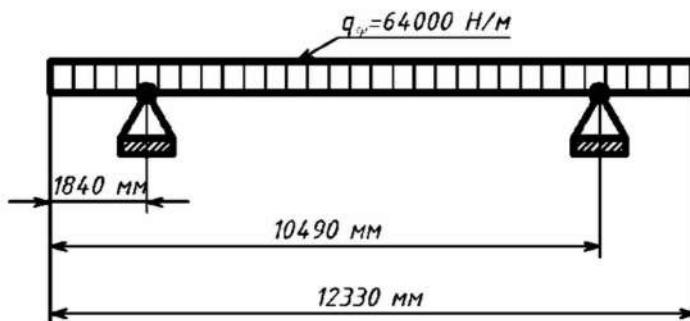


Рисунок 2 – Расчетная схема

В качестве допустимого значения напряжения по I расчетному режиму принимается значение, равное условному пределу текучести. В частности, для сплава АМгб эта величина составляет 140 МПа.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Вначале был проведен анализ НДС в соответствии с принятой расчетной схемой в линейном приближении. Заданные свойства рассматриваемого конструкционного материала (алюминиевый сплав АМг6) имеют следующие величины: модуль упругости Юнга – 7,1 ГПа, коэффициент Пуассона – 0,3, плотность – 2640 кг/м³.

Проведение физически нелинейного анализа балочных моделей с учетом мультилинейной упругости доступно в ANSYS только для элементов **BEAM23** и **BEAM24**. При этом **BEAM24** является элементом произвольного поперечного сечения, что и определяет его выбор для расчета хребтовой балки. Поперечное сечение хребтовой балки изображено на рисунке 3 и представляется набором прямолинейных элементов в плоскости YZ.

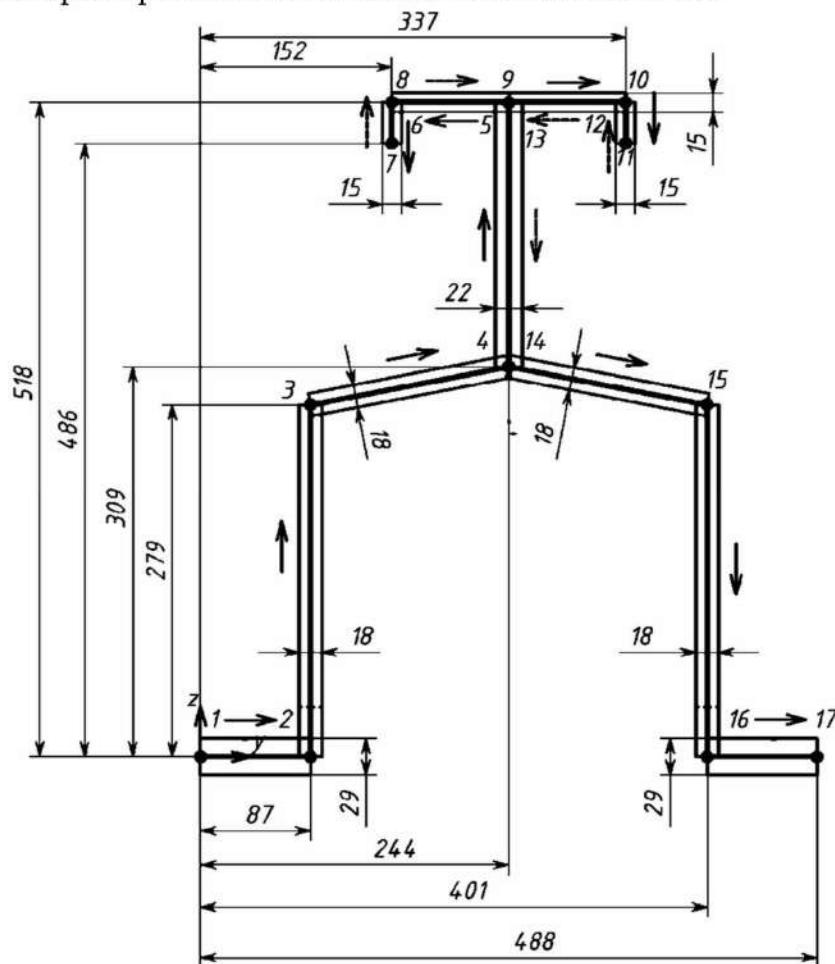


Рисунок 3 – Расчетная схема для элемента BEAM24

В качестве начальных параметров для расчетов выбираются координаты (x, z) 20 точек и толщина соответствующего участка. Участки должны представлять собой непрерывную последовательность элементов, причем конец каждого элемента является одновременно и началом следующего.

Для того чтобы избежать повторного обхода контура, элементам может быть назначена нулевая толщина. Поэтому в первой точке она не задана и предполагается равной нулю. Расположение узлов рекомендуется выбирать таким образом, чтобы к ним были приложены сосредоточенные нагрузки. Это делается с целью исключения внецентренного приложения осевой нагрузки для рассматриваемого элемента.

Опцией «Real Constants» для каждого рассматриваемого вида элементов задается последовательность сегментов, предопределяющая совместную работу этих элементов.

Первоначально удобно разработать общую схему обхода контура сечения с указанием толщины сегментов и сегментов нулевой толщины. Все размеры отсчитываются в системе СИ относительно левой нижней точки, принятой за начало системы координат.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Результаты расчета в линейном приближении представлены на рисунке 4.

Максимальная величина напряжения равна 151 МПа, что превышает предельно допускаемое напряжение в 140 МПа.

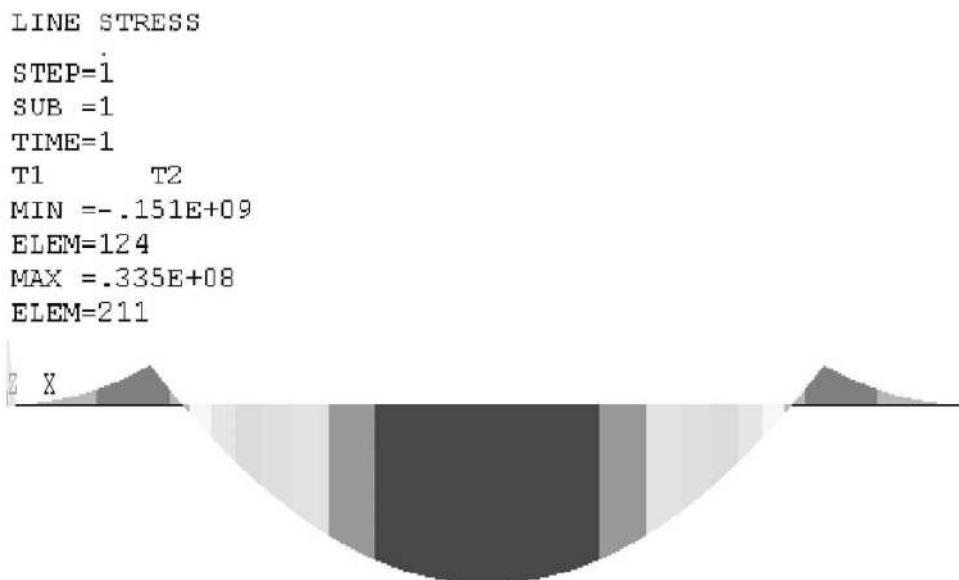


Рисунок 4 – Эпюра напряжений (линейный расчет)

Далее проводится нелинейный статический анализ рассматриваемой в настоящей работе хребтовой балки в соответствии с предложенной расчетной схемой.

В качестве материала хребтовой балки используется алюминиевый сплав марки АМг6.

Для ввода реальной диаграммы деформирования следует выбрать такую последовательность команд: **«Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models»**. В правой части появившейся панели **«Define Material Model Behavior»** следует проводить двойные щелчки кнопкой мыши при установлении курсора на объектах **«Structural, Noliner, Elastic, Multilinear Elastic»**, после чего на экране появится диалоговая панель, изображенная на рисунке 1. В данной диалоговой панели вводятся значения кривой деформирования (напряжения в паскалях).

Результаты расчета в нелинейном приближении представлены на рисунке 5.

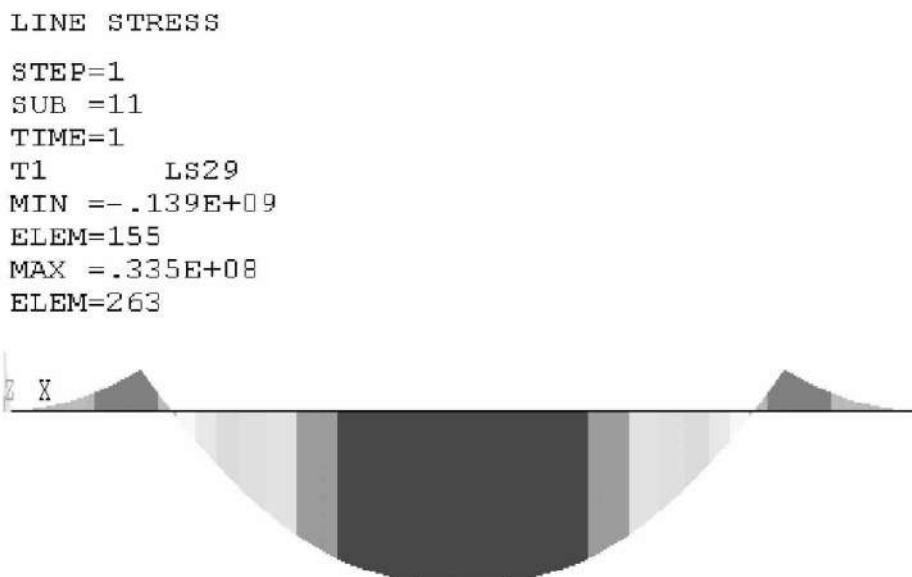


Рисунок 5 – Эпюра напряжений (нелинейный расчет)

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Максимальное значение напряжения в этом случае составит минус 139 МПа и не превысит предельно допустимого напряжения. Это значение на 9 % меньше соответствующей величины, полученной при линейном расчете.

Таким образом, определен скрытый резерв прочности хребтовой балки грузового полува-гона, который следует учитывать при проектировании в целях снижения металлоемкости. Аналогичные исследования могут быть проведены для других конструктивных элементов полува-гона.

Учет физической нелинейности конструкционного материала позволяет создавать новые модели грузовых полува-гонов, оптимизированные по весовым и прочностным характеристи-кам, с улучшенным коэффициентом тары.

Авторы работы выражают благодарность директору ООО «УКБВ» Баранову Александру Николаевичу, заместителю главного конструктора Власко Андрею Сергеевичу, коллективу отдела расчетной оценки прочности и динамики за оказанную помощь в проведении исследований по настоящей теме.

Список литературы

1. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – Москва : ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. – 317 с. – Текст : непосредственный.
2. Стержневой конечный элемент с учетом физической нелинейности / С. А. Гельвер, А. В. Колунин, И. И. Ширлин, А. Б. Марков. – Текст : непосредственный // Вестник СибАДИ. – 2013. – № 5 (33). – С. 88–91.
3. Гельвер, С. А. Исследование напряженно-деформированного состояния кузова грузового полува-гона из алюминиевых сплавов с учетом физической нелинейности материала / С. А. Гельвер. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2008. – № 4 (19). – С. 20–23.
4. Гельвер, И. С. Анализ текущего и предельного напряженно-деформированного состояний подвижного состава железных дорог при упруго-пластическом поведении материала / И. С. Гельвер, С. А. Гельвер, И. А. Дроздова. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2018. – № 2 (34). – С. 13–20.
5. Гельвер, С. А. Особенности проектирования конструкций алюминиевых корпусов легкобронированной техники / С. А. Гельвер, А. В. Колунин, С. С. Поярков. – Текст : непосредственный // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 10. – С. 534–539.
6. Лапшин, В. Ф. Компьютерные технологии расчета вагонов и систем : учебно-методическое пособие / В. Ф. Лапшин, В. М. Колясов. – Екатеринбург : Уральский государственный университет путей сообщения, 2008. – 68 с. – Текст : непосредственный.
7. Методика расчетно-экспериментальных исследований кузовов современного подвижного состава / С. Д. Коршунов, А. Н. Скачков, С. Л. Самошкин [и др.]. – Текст : непосредственный // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2015. – № 4 (45). – С. 38–47.
8. Котуранов, В. Н. Аналитический и конечноэлементный расчет напряженного состояния кузова пассажирского ЦМВ : учебное пособие / В. Н. Котуранов, Б. Н. Покровский, М. П. Козлов. – Москва : Российский государственный открытый технический университет путей сообщения, 2008. – 39 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Norms for the calculation and design of rail cars of the MPC gauge of 1520 mm (non-self-propelled). Moscow, GosNIIV-VNIIZhT, 1996, 317 p. (In Russian).
2. Gel'ver S.A., Kolunin A.V., Shirlin I.I., Markov A.B. A core finite element taking into account physical nonlinearity. *Vestnik SibADI – The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2013, no. 5 (33), pp. 88-91 (In Russian).

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

3. Gel'ver S.A. Investigation of the stress-strain state of the body of a cargo gondola made of aluminum alloys, taking into account the physical nonlinearity of the material. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2008, no. 4 (19), pp. 20-23 (In Russian).
4. Gel'ver I.S., Gel'ver S.A., Drozdova I.A. Analysis of the current and limited stressed-deformed states of the rolling stock of railways with elastic-plastic conduct of material. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2018, no. 2 (34), pp. 13-20 (In Russian).
5. Gel'ver S.A., Kolinin A.V., Poyarkov S.S. Design features of aluminum hulls of lightly armored vehicles. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki – News of the Tula state university. Technical sciences*, 2018, no. 10, pp. 534-539 (In Russian).
6. Lapshin V.F., Koljasov V.M. *Komp'juternye tehnologii rascheta vagonov i system: uchebno-metodicheskoe posobie* [Computer technologies for calculating rail cars and systems: educational and methodical manual]. Ekaterinburg, USURT, 2008, 68 p. (In Russian).
7. Korshunov S.D., Skachkov A.N., Samoshkin S.L., Goncharov D.I., Zhukov A.S. Method for calculation and experimental studies of modern rolling stock bodies. *Izvestija Peterburgskogo universiteta putej soobshchenija – Proceedings of Petersburg Transport University*, 2015, no. 4 (45), pp. 38-47 (In Russian).
8. Koturanov V.N., Pokrovskij B.N., Kozlov M.P. *Analiticheskij i konechnojelementnyj raschet naprijazhennogo sostojaniya kuzova passazhirskogo CMV: uchebnoe posobie* [Analytical and finite element calculation of the stress state of the passenger all-metal rail car body: study guide]. Moscow, RGOTUPS Publ., 2008, 39 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гельвер Сергей Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Физика и химия», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-53-68.

E-mail: gelversa@rambler.ru

Дроздова Илга Анатольевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат физ.-мат. наук, доцент кафедры «Физика и химия», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-53-68.

E-mail: drozodovailga@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Гельвер, С. А. Исследование напряженно-деформированного состояния хребтовой балки грузового полувагона из алюминиевых сплавов методом нелинейного статического анализа / С. А. Гельвер, И. А. Дроздова. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 4 (56). – С. 18 – 24.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gelver Sergei Aleksandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Physics and chemistry», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-53-68.

E-mail: gelversa@rambler.ru

Drozdova Ilga Anatolievna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Physics and Mathematics, associate professor of the department «Physics and chemistry», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-53-68.

E-mail: drozodovailga@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Gelver S.A., Drozdova I.A. Investigation of the stress-strain state of the spine beam of aluminum alloy cargo gondola using the nonlinear static analysis method. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 4 (56), pp. 18-24 (In Russian).

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

УДК 621.333: 621.313.2

А. М. Гардеенков¹, Е. Ю. Логинова², М. А. Буйкин³

¹Государственное унитарное предприятие города Москвы «Московский ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени метрополитен имени В. И. Ленина (ГУП «Московский метрополитен»), электродепо «Лихоборы», г. Москва, Российской Федерации;

²Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), г. Москва, Российской Федерации;

³Проектно-конструкторско-технологическое бюро по нормированию – филиал ОАО «РЖД» (ПКТБ Н), г. Москва, Российской Федерации

СНИЖЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБМОТКИ ЯКОРЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Аннотация. Задачей проведенного исследования являлось повышение надежности электрической машины постоянного тока, которая до настоящего времени является основным агрегатом точных регулируемых электроприводов различных систем и механизмов. Показано, что сложная конструкция и использование различных материалов приводит к неравномерному нагреву обмотки якоря и интенсивному тепловому старению, прежде всего изоляционных материалов. Наибольшую интенсивность старения имеет изоляция обмотки якоря электрической машины в лобовых частях, что объясняется диагональным методом укладки обмотки.

Проанализирована возможность снижения температуры обмотки якоря электродвигателя постоянного тока за счет модернизации конструкции бандажа. Предлагаемая конструкция бандажа представляет собой чередующиеся слои стеклоленты и бандажной проволоки. Модернизация бандажа выполняется таким образом, чтобы обеспечить его механическую прочность при вращении якоря. Разработана тепловая модель тягового электродвигателя постоянного тока. Модель использует метод конечных элементов и позволяет рассчитывать температуры элементарных узлов обмотки якоря при различной токовой нагрузке во всем диапазоне изменения температуры и расхода охлаждающего воздуха. Выполнены расчеты распределения температуры по длине обмотки якоря при использовании бандажа серийной конструкции и бандажа модернизированной конструкции. Численный эксперимент показал, что использование комбинированного бандажа обмотки якоря в машине постоянного тока позволяет снизить температуру лобовых частей обмотки якоря на 15 °C. По закону Монзингера для изоляции класса нагревостойкости Н снижение температуры обмотки якоря на 15 °C повышает ресурс электрической машины по показателю температурных износовых отказов более чем в три раза.

Ключевые слова: локомотив, тяговый электродвигатель постоянного тока, бандаж обмотки якоря, тепловая модель обмотки якоря, распределение температур по длине обмотки якоря, ресурс изоляции.

Alexander M. Gardeenkov¹, Elena Yu. Loginova², Maxim A. Buykin³

²State unitary enterprise of the city of Moscow «Moscow Order of Lenin and Order of the Red Banner of Labor Metro named after V.I. Lenin» (SUE «Moscow Metro»), electric depot «Likhobory», Moscow, the Russian Federation;

²Russian University of Transport (RUT (MIIT)), Moscow, the Russian Federation;

³Design, engineering and technological bureau for standardization – branch of JSC «Russian Railways» (PKTB N), Moscow, the Russian Federation

REDUCING THE TEMPERATURE OF ARMATURE WINDING OF A DC ELECTRICAL MACHINE

Abstract. The objective of the study was to increase the reliability of the DC electric machine, which until now is the main unit of precision adjustable electric drives of various systems and mechanisms. It is shown that the complex design and the use of various materials leads to uneven heating of the armature winding and intense thermal aging of insulating materials. The insulation of the armature winding of an electric machine has the greatest aging intensity in the frontal parts, which is explained by the diagonal method of laying the winding.

The possibility of reducing the temperature of the armature winding of a DC electric motor by modernizing the design is analyzed of armature winding bandage. The proposed design of the armature winding bandage is an alternating layers of glass tape and bandage wire. The modernization of the bandage is carried out in such a way as to ensure its mechanical strength during the rotation of the armature. A thermal model of a DC traction motor has been developed. The model uses the finite element method and makes it possible to calculate the temperatures of the elementary nodes of the armature winding at different current loads over the entire range of temperature and cooling air flow. Calculations of the temperature distribution along the length of the armature winding were performed for a bandage of a serial design

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

and a bandage of a modernized design. A numerical experiment showed that the use of a combined armature winding shroud in a DC machine makes it possible to reduce the temperature of the end parts of the armature winding by 15°C. According to the Monsingor law for insulation of heat resistance class H, a decrease in the temperature of the armature winding by 15°C increases the life of the electric machine in terms of thermal wear failures by more than three times.

Keywords: locomotive, DC traction motor, armature winding shroud, armature winding thermal model, temperature distribution along the length of the armature winding, insulation resource.

Электрическая машина постоянного тока широко используется в электроприводе. За счет своей мягкой механической характеристики чаще всего она является основным агрегатом регулируемого электропривода с коэффициентом регулирования координат до $k_p = 4 - 5$. Поэтому в эксплуатации ее нагрузки изменяются в широком диапазоне. Машина постоянного тока может использоваться также в приводе транспортных систем (локомотивы, трамваи и т. д.) и на различных кранах, т. е. может работать в широких диапазонах изменения влажности и температуры. При этом расход воздуха на ее охлаждение либо не меняется, либо меняется по алгоритму, который не учитывает токовые нагрузки, текущие температуру и влажность воздуха, например, на тепловозах.

Из-за действия температурных деформаций, центробежных сил и динамических усилий узлы якоря повреждаются чаще, чем другие узлы машины. [1]. Применительно к коллектору образуется повышенный износ его рабочей поверхности, появляются риски и забоины, наблюдаются подгар и оплавление коллекторных пластин, возможно также ослабление коллекторных болтов, образование трещин.

Для обмотки якоря характерными неисправностями являются снижение сопротивления и пробой изоляции, которые возникают вследствие износовых отказов из-за повышенных температур обмотки. Высокие температуры обмотки и ее колебания приводят к изменению характеристик изоляции, растрескиванию и разрушению.

Конструкция комбинированного бандажа обмотки якоря. Сложная конструкция электрической машины, применение в ней материалов с различными физическими характеристиками приводят к неравномерности нагрева ее узлов. Коллекторный мikanит, применяемый в качестве изоляции между ламелями электрических машин, имеет наименьшие допустимые температуры. Поскольку коллектор обладает высоким теплоотводом из-за открытой поверхности охлаждения, перегрев коллекторного мikanита происходит только на аварийных режимах работы машины (например, при неисправности системы охлаждения).

Температура обмотки якоря является расчетным параметром для электрической машины – по ее значению выбирают класс нагревостойкости изоляции. Расчеты и эксперименты показали, что максимальную температуру при работе машины имеют лобовые части обмотки якоря со стороны привода, которые определяют износ изоляции и снижение ресурса электрической машины [2].

Плотность укладки обмотки якоря неравномерная. Пазовая часть обмотки имеет осевое расположение с эффективной теплопередачей к охлаждающему воздуху через сталь ярма. Лобовая часть обмотки имеет диагональное расположение. За счет такого способа укладки лобовой части на единицу поверхности охлаждения приходится большее тепловыделение, чем на единицу площади пазовой части. Кроме того, проводники лобовой части обмотки плотно прилегают друг к другу и сверху покрыты бандажом, назначение которого – исключить возможность радиального перемещения обмотки и ее размотку при вращении якоря. Вследствие этого теплопередача к охлаждающему воздуху через бандаж осуществляется менее эффективно, чем в пазовой части обмотки. Это приводит к перегреву обмотки якоря в лобовых частях, закрепляемых бандажами, выше допустимого значения и двукратному снижению ресурса машины из-за снижения сопротивления изоляции относительно рекомендованного заводом-изготовителем. Следовательно, для повышения ресурса изоляции якоря необходимо выполнить модернизацию конструкции бандажа, повысив его теплопроводность.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Напряжение в бандаже, создаваемое при бандажировке, должно быть больше напряжения от центробежных сил, возникающих при вращении якоря, т. е. должно определяться диаметром якоря, допустимой частотой вращения и массой катушки. Это напряжение должно сохранять свое значение и при нагреве обмотки. Поэтому при расчете параметров бандажа основной величиной является допустимое значение напряжения растяжения $\sigma_{\text{доп}}$ [3].

Первоначально бандаж в электрических машинах изготавливается из стальной луженой магнитной или немагнитной бандажной проволоки, для которой $\sigma_{\text{доп}} = 450 \cdot 10^6$ Па [3]. Такой бандаж представляет собой двухслойную намотку проволоки с натяжением около 2,5 кН, витки которой соединяют скобами и пропаивают, создавая жесткую конструкцию [4]. Под проволочный бандаж укладывают подбандажную изоляцию, которая состоит из двух слоев гибкого миканита толщиной 0,5 мм и двух слоев электрокартона толщиной 0,5 мм.

Основным недостатком проволочных бандажей является наведение в них вихревых токов, нагрев от этих токов и термические деформации бандажа, которые приводят к ослаблению натяга и деформации лобовых частей обмотки якоря. Кроме того, при разрыве проволочного бандажа могут разрушаться полюсные катушки. Сопротивление разрыва стальной луженой бандажной проволоки, например, для проволоки марки 20Х12Н12Г6, в соответствии с ГОСТ 9124–85 «Проволока стальная луженая бандажная. Технические условия» составляет 1420 Н/мм².

К преимуществам проволочного бандажа следует отнести его высокую теплопроводность: для проволоки той же марки коэффициент теплопроводности составляет $\lambda_{\text{пр}} = 15$ Вт/(м · К) при температуре 20 °С [5].

В конструкции современных машин стальная бандажная проволока заменяется стекловолокном, пропитанным термореактивными лаками. Для намотки бандажей используют нетканую ленту из стекловолокна марки ЛСБ-Р шириной 15 – 20 мм и толщиной 0,1 и 0,2 мм. Бандажи из стеклоленты имеют $\sigma_{\text{доп}} = 150 \cdot 10^6$ Па, т. е. в три раза меньше, чем проволочные [5]. Поэтому стеклобандаж имеет большее сечение, чем два слоя бандажной проволоки.

Процесс укладки стеклобандажей сводится к намотке ленты на якорь, пропитке ленты термореактивным лаком и запеканию: якорь выдерживается в печи при 145 – 150 °С в течение 12 ч. За это время лак полимеризуется и бандаж превращается в монолитное кольцо, прочно удерживающее лобовые части обмотки во время работы машины [6].

Опыт эксплуатации показал, что стеклобандажи практически не разрушаются при работе тяговых электродвигателей.

Малая теплопроводность является главным недостатком бандажей из стеклоленты: $\lambda_{\text{ст}} = 0,21$ Вт/(м · К) [7]. Расчетные исследования тягового электродвигателя ЭД-118 показывают, что при использовании бандажа из стеклоленты температура лобовой части обмотки со стороны, противоположной коллектору (задняя лобовая часть обмотки), при нормальных условиях (н. у.) на продолжительном режиме работы (ток обмотки якоря $I_a = 720$ А, частота вращения якоря 585 об/мин) на 12 °С превышает температуру пазовой части обмотки и на 4 °С – среднюю температуру обмотки. Для изоляции нагревостойкости Н повышение температуры обмотки на 8 °С приводит к двукратному снижению ресурса относительно расчетного.

Для повышения ресурса изоляции обмотки якоря тягового двигателя была проанализирована эффективность использования комбинированного бандажа, состоящего из чередующихся слоев стеклоленты и бандажной проволоки.

Конструкция комбинированного бандажа представляет собой последовательное чередование бандажной проволоки и многослойной стеклоленты, пропитанной полиэфирной или акриловой смолой, по высоте равной высоте проволочного бандажа [8] (рисунок 1). Таким образом, теплопередача от лобовой части обмотки якоря осуществляется по параллельным ветвям с низкой (стеклобандаж) и высокой (бандажная проволока) теплопроводностью.

Механическая прочность стеклобандажных лент составляет 720 МПа, что примерно в два раза меньше, чем у стальной бандажной проволоки – 1500 МПа. Поэтому площадь сечения

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

стеклобандажа принимается в два раза больше проволочного. Однако по высоте стеклобандаж будет соответствовать проволочному бандажу, поскольку не требует подбандажной изоляции [9].

Такая конструкция позволяет при эффективном теплоотводе от лобовой части обмотки якоря обеспечить необходимую прочность бандажа.

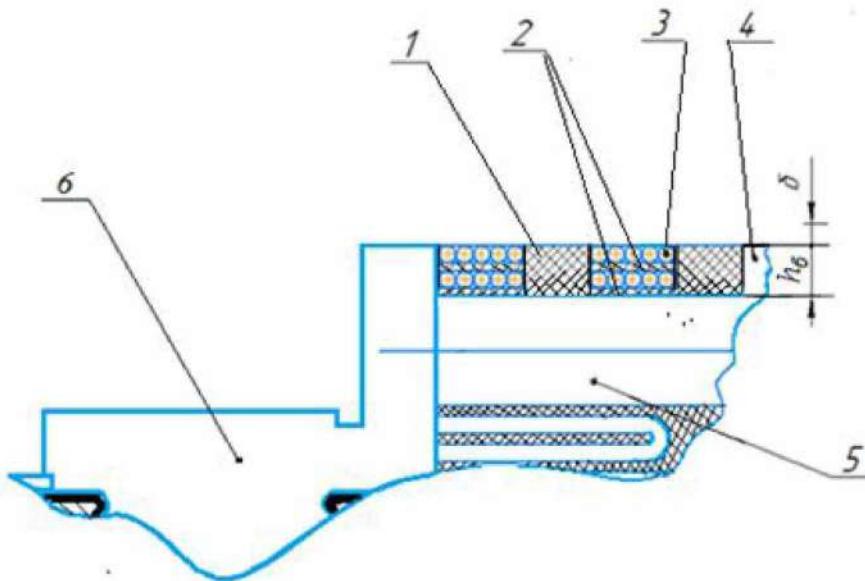


Рисунок 1 – Конструкция бандажа обмотки якоря электродвигателя со стороны коллектора:
1 – стеклолента; 2 – лента-прокладка из неэлектропроводного армированного материала; 3 – бандажная проволока; 4 – ярмо якоря; 5 – обмотка якоря; 6 – коллектор; δ – воздушный зазор; h_δ – высота бандажа

Чтобы не было значительного усложнения технологии укладки комбинированного бандажа, он по длине делится на четыре секции: двух секций проволочного бандажа, выполненного в два слоя бандажной проволокой (аналогично бандажу тягового электродвигателя ЭД-107), и двух секций бандажа, выполненного из стеклоленты (аналогично бандажу тягового электродвигателя ЭД-118). Ближайшая к коллектору секция должна изготавливаться из бандажной проволоки, поскольку примыкающие к ней узлы обмотки будут иметь наименьшую температуру и создавать наименьший тепловой поток от обмотки к коллекторным пластинам (см. рисунок 1). Такое конструктивное исполнение позволяет обеспечить наилучшие условия для охлаждения коллектора, так как в соответствии с требованиями ГОСТ 2582 допустимое превышение температуры коллектора на 20 – 40 °С ниже, чем обмотки якоря с изоляцией классов нагревостойкости F или H [2].

Со стороны, противоположной коллектору, близкий к ярму якоря участок бандажа выполняется из бандажной проволоки. Это способствует эффективной теплопередаче от обмотки якоря к охлаждающему воздуху (рисунок 2).

Таким образом, предлагаемая конструкция бандажа объединяет характеристики, свойственные проволочным бандажам и стеклобандажам:

- механическая прочность, как у проволочного бандажа;
- низкий нагрев от вихревых токов, как у стеклобандажа;
- отсутствие термической деформации при нагреве обмотки и ее ослабление, как у стеклобандажа;
- высокий уровень теплопроводности, как у проволочного бандажа.

В итоге предполагалось, что комбинированный бандаж машины постоянного тока позволит повысить фактический ресурс тягового электродвигателя постоянного тока за счет повышения эффективности охлаждения лобовых частей обмотки якоря и снижения температуры обмотки якоря в целом.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

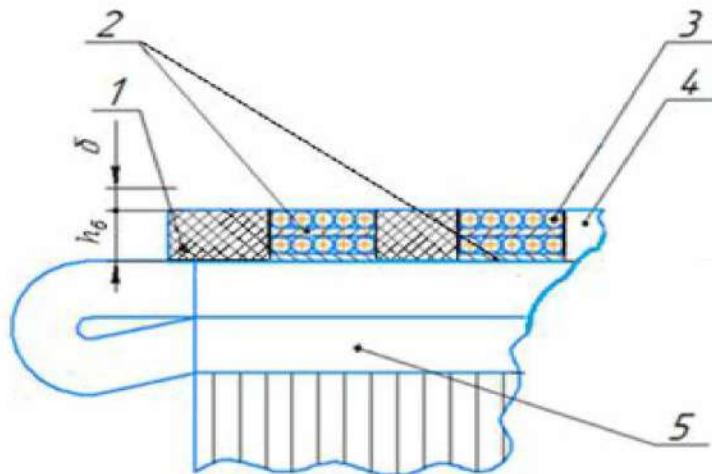


Рисунок 2 – Бандаж обмотки якоря электрической машины постоянного тока со стороны, противоположной коллектору: 1 – стеклоленты; 2 – лента-прокладка из неэлектропроводного армированного материала; 3 – бандажная проволока; 4 – ярмо якоря; 5 – обмотка якоря; δ – воздушный зазор; h_b – высота бандажа

Математическая модель электродвигателя с комбинированным бандажом. Для подтверждения целесообразности применения комбинированного бандажа в тяговых электродвигателях постоянного тока было проведено численное исследование нагревания обмотки в эксплуатации при штатном и модернизированном бандаже. С этой целью была разработана конечно-разностная математическая модель электродвигателя как теплового объекта.

В модели якорь электродвигателя был представлен как тепловая система, состоящая из n узлов якоря и m узлов потока охлаждающего воздуха (рисунок 3). Состояние каждого узла определяется условием его теплового равновесия:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \Lambda_{i,i-1} \cdot (T_i - T_{i-1}) + A_{i,k} \cdot F_{ik} \cdot (T_i - T_{\text{вз } k}) = P_i; \\ A_{i,k} \cdot (T_i - T_k) = C_{\text{вз }} \cdot (T_{\text{вз } k} - T_{\text{вз } k-1}), \end{cases} \quad (1)$$

где P_i – потери в i -м узле, Вт;

T_i – температура i -го узла обмотки, °С;

T_k – температура k -го узла охлаждающего воздуха, °С;

$A_{i,k}$ – теплопередача от i -го узла обмотки к k -му узлу потока охлаждающего воздуха, Вт/°С;

$\Lambda_{i,i-1}$ – теплопроводность между i -м и $i-1$ -м узлами обмотки, Вт/°С;

С учетом уравнений (1) расчетная схема якоря тягового электродвигателя постоянного тока представлена на рисунке 3.

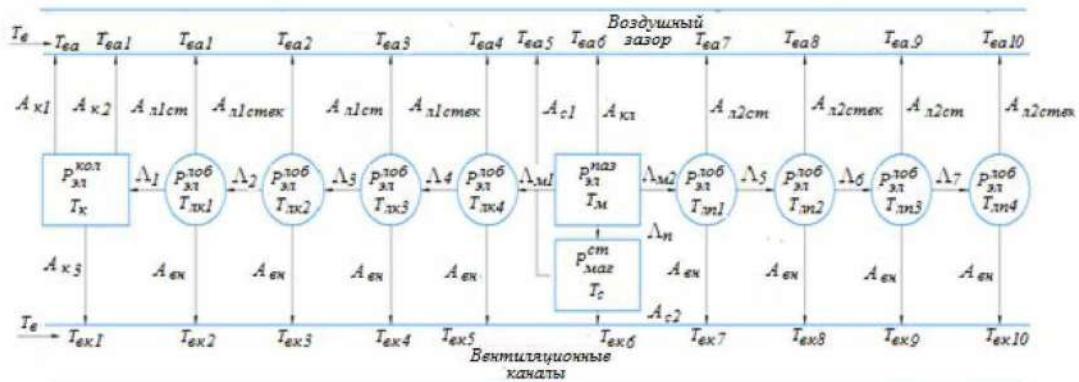


Рисунок 3 – Тепловая схема якоря тягового электродвигателя постоянного тока в конечных элементах

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Поскольку задачей исследования было определение температуры в лобовых частях обмотки, другие элементы якоря – коллектор, пазовая часть обмотки и ярмо ротора – в модели были представлены каждый одним узлом. Лобовая же часть обмотки представлена в модели по числу секций бандажа, т. е. четыре узла в передней лобовой части обмотки и четыре узла в лобовой части со стороны противоположной коллектору.

На рисунке 3 приняты следующие обозначения:

$P_{эл}^к$ – электрические потери на коллекторе;

$P_{эл}^{паз}$ – электрические потери в пазовой части обмотки якоря;

$P_{маг}^с$ – магнитные потери в стали сердечника якоря;

$P_{лоб}^эл$ – электрические потери на одном участке лобовых частей обмотки якоря;

T_v – значения температуры воздуха на входе в ТЭД;

$T_{v,a}, T_{v,a1} \div T_{v,a10}$ – значения температуры воздуха в воздушном зазоре над каждым узлом якоря;

$T_{v,k1} \div T_{v,k10}$ – значения температуры воздуха в вентиляционных каналах под каждым узлом якоря;

A_{k1} – теплоотдача с наружной поверхности коллектора к воздуху в воздушном зазоре;

A_{k2} – теплоотдача с внутренней поверхности коллектора к воздуху в вентиляционных каналах;

A_{k3} – теплоотдача от петушков коллектора к воздуху в вентиляционном канале;

$A_{л1,ст}$ – теплопередача от узла передней лобовой части обмотки якоря через стальной бандаж к воздуху;

$A_{л1,стек}$ – теплопередача от узла передней лобовой части обмотки якоря через бандаж из стекловолокна к воздуху;

$A_{л2,стек}$ – теплопередача от узла лобовой части обмотки якоря со стороны привода через стальной бандаж из стекловолокна к воздуху;

$A_{л,вн}$ – теплопередача от узлов лобовых частей обмотки якоря к воздуху в вентиляционных каналах двигателя; теплопередача от внутренних поверхностей лобовых частей одинаковая, поскольку они опираются на две одинаковые нажимные шайбы;

$A_{кл}$ – теплопередача от пазовой части обмотки якоря через клинья к воздуху;

A_{c1} – теплоотдача от поверхности зубцов сердечника якоря к воздуху в воздушном зазоре;

A_{c2} – теплоотдача от сердечника якоря к воздуху в вентиляционных каналах;

A_{m1} – тепловая проводимость от пазовой части обмотки якоря к лобовым частям со стороны коллектора;

A_{m2} – тепловая проводимость от пазовой части обмотки якоря к лобовым частям со стороны привода;

$\Lambda_{п}$ – тепловая проводимость от обмотки якоря к стали сердечника;

$\Lambda_1 \div \Lambda_7$ – тепловые проводимости между узлами лобовых частей.

В результате, конечно-разностная тепловая модель якоря электродвигателя при комбинированной конструкции бандажа имеет вид:

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

для узлов якоря –

$$\left. \begin{aligned}
 P_{\text{эл}}^{\text{кол}}(T_{\text{k}}, I_a) &= A_{\text{k}2}(n_a, G) \cdot \left(T_{\text{k}} - \frac{T_{\text{b}} + T_{\text{b.k1}}}{2} \right) + A_{\text{k}1}(n_a, G) \cdot \left(T_{\text{k}} - \frac{T_{\text{b}} + T_{\text{b.a}}}{2} \right) + \\
 &\quad + A_{\text{k}3}(n_a, G) \cdot \left(T_{\text{k}} - \frac{T_{\text{b.a}} + T_{\text{b.a1}}}{2} \right) - \Lambda_1 \cdot (T_{\text{l.k1}} - T_{\text{k}}) ; \\
 P_{\text{эл}}^{\text{лоб}}(T_{\text{l.k1}}, I_a) &= A_{\text{l.bh}}(n_a, G) \cdot \left(T_{\text{l.k1}} - \frac{T_{\text{b.k1}} + T_{\text{b.k2}}}{2} \right) + \\
 &\quad + A_{\text{l1.stek}}(n_a, G) \cdot \left(T_{\text{l.k1}} - \frac{T_{\text{b.a1}} + T_{\text{b.a2}}}{2} \right) - \Lambda_2 \cdot (T_{\text{l.k2}} - T_{\text{l.k1}}) + \Lambda_1 \cdot (T_{\text{l.k1}} - T_{\text{k}}) ; \\
 P_{\text{эл}}^{\text{лоб}}(T_{\text{l.k2}}, I_a) &= A_{\text{l.bh}}(n_a, G) \cdot \left(T_{\text{l.k2}} - \frac{T_{\text{b.k2}} + T_{\text{b.k3}}}{2} \right) + A_{\text{l1.stek}}(n_a, G) \cdot \left(T_{\text{l.k2}} - \frac{T_{\text{b.a2}} + T_{\text{b.a3}}}{2} \right) - \\
 &\quad - \Lambda_3 \cdot (T_{\text{l.k3}} - T_{\text{l.k2}}) + \Lambda_2 \cdot (T_{\text{l.k2}} - T_{\text{l.k1}}) ; \\
 P_{\text{эл}}^{\text{лоб}}(T_{\text{l.k3}}, I_a) &= A_{\text{l.bh}}(n_a, G) \cdot \left(T_{\text{l.k3}} - \frac{T_{\text{b.k3}} + T_{\text{b.k4}}}{2} \right) + A_{\text{l1.stek}}(n_a, G) \cdot \left(T_{\text{l.k3}} - \frac{T_{\text{b.a3}} + T_{\text{b.a4}}}{2} \right) - \\
 &\quad - \Lambda_4 \cdot (T_{\text{l.k4}} - T_{\text{l.k3}}) + \Lambda_3 \cdot (T_{\text{l.k3}} - T_{\text{l.k2}}) ; \\
 P_{\text{эл}}^{\text{лоб}}(T_{\text{l.k4}}, I_a) &= A_{\text{l.bh}}(n_a, G) \cdot \left(T_{\text{l.k4}} - \frac{T_{\text{b.k4}} + T_{\text{b.k5}}}{2} \right) + A_{\text{l1.stek}}(n_a, G) \cdot \left(T_{\text{l.k4}} - \frac{T_{\text{b.a4}} + T_{\text{b.a5}}}{2} \right) - \\
 &\quad - \Lambda_{\text{M}1} \cdot (T_{\text{m}} - T_{\text{l.k4}}) + \Lambda_4 \cdot (T_{\text{l.k4}} - T_{\text{l.k3}}) ; \\
 P_{\text{эл}}^{\text{паз}}(T_{\text{m}}, I_a) &= A_{\text{kl}}(n_a, G) \cdot \left(T_{\text{m}} - \frac{T_{\text{b.a5}} + T_{\text{b.a6}}}{2} \right) + \Lambda_{\text{Pi}} \cdot (T_{\text{m}} - T_{\text{c}}) + \Lambda_{\text{M}1} \cdot (T_{\text{m}} - T_{\text{l.k4}}) + \\
 &\quad + \Lambda_{\text{M}2} \cdot (T_{\text{m}} - T_{\text{l.pi1}}) ; \\
 P_{\text{эл}}^{\text{ct}}(n_a, B_a, B_z) &= A(n_a, G) \cdot \left(T_{\text{c}} - \frac{T_{\text{b.a5}} + T_{\text{b.a6}}}{2} \right) + A_{\text{c2}}(n_a, G) \cdot \left(T_{\text{c}} - \frac{T_{\text{b.k5}} + T_{\text{b.k6}}}{2} \right) - \\
 &\quad - \Lambda_{\text{Pi}} \cdot (T_{\text{m}} - T_{\text{c}}); \\
 P_{\text{эл}}^{\text{лоб}}(T_{\text{l.pi1}}, I_a) &= -\Lambda_{\text{M}2} \cdot (T_{\text{m}} - T_{\text{l.pi1}}) + A(n_a, G) \cdot \left(T_{\text{l.pi1}} - \frac{T_{\text{b.a6}} + T_{\text{b.a7}}}{2} \right) + \\
 &\quad + A_{\text{l.bh}}(n_a, G) \cdot \left(T_{\text{l.pi1}} - \frac{T_{\text{b.k6}} + T_{\text{b.k7}}}{2} \right) + \Lambda_5 \cdot (T_{\text{l.pi1}} - T_{\text{l.pi2}}) ; \\
 P_{\text{эл}}^{\text{лоб}}(T_{\text{l.pi2}}, I_a) &= -\Lambda_5 \cdot (T_{\text{l.pi1}} - T_{\text{l.pi2}}) + A_{\text{l2.stek}}(n_a, G) \cdot \left(T_{\text{l.pi2}} - \frac{T_{\text{b.a7}} + T_{\text{b.a8}}}{2} \right) + \\
 &\quad + A_{\text{l.bh}}(n_a, G) \cdot \left(T_{\text{l.pi2}} - \frac{T_{\text{b.k7}} + T_{\text{b.k8}}}{2} \right) + \Lambda_6 \cdot (T_{\text{l.pi2}} - T_{\text{l.pi3}}) ; \\
 P_{\text{эл}}^{\text{лоб}}(T_{\text{l.pi3}}, I_a) &= -\Lambda_6 \cdot (T_{\text{l.pi2}} - T_{\text{l.pi3}}) + A_{\text{l2.stek}}(n_a, G) \cdot \left(T_{\text{l.pi3}} - \frac{T_{\text{b.a8}} + T_{\text{b.a9}}}{2} \right) + \\
 &\quad + A_{\text{l.bh}}(n_a, G) \cdot \left(T_{\text{l.pi3}} - \frac{T_{\text{b.k8}} + T_{\text{b.k9}}}{2} \right) + \Lambda_7 \cdot (T_{\text{l.pi3}} - T_{\text{l.pi4}}) ; \\
 P_{\text{эл}}^{\text{лоб}}(T_{\text{l.pi4}}, I_a) &= -\Lambda_7 \cdot (T_{\text{l.pi3}} - T_{\text{l.pi4}}) + A_{\text{l2.stek}}(n_a, G) \cdot \left(T_{\text{l.pi4}} - \frac{T_{\text{b.a9}} + T_{\text{b.a10}}}{2} \right) + \\
 &\quad + A_{\text{l.bh}}(n_a, G) \cdot \left(T_{\text{l.pi4}} - \frac{T_{\text{b.a9}} + T_{\text{b.a10}}}{2} \right) ;
 \end{aligned} \right. \tag{2}$$

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

для потока воздуха в вентиляционном канале –

$$\left\{ \begin{array}{l} \Lambda_{k2} \cdot \left(T_k - \frac{T_b + T_{b,k1}}{2} \right) = c_{p_{v3}}(T_{b,k1}) \cdot Q_{kan} \cdot (T_{b,k1} - T_b) ; \\ \Lambda_{l,vn} \cdot \left(T_{l,k1} - \frac{T_{b,k1} + T_{b,k2}}{2} \right) = c_{p_{v3}}(T_{b,k2}) \cdot Q_{kan} \cdot (T_{b,k2} - T_{b,k1}) ; \\ \Lambda_{l,vn} \cdot \left(T_{l,k2} - \frac{T_{b,k2} + T_{b,k3}}{2} \right) = c_{p_{v3}}(T_{b,k3}) \cdot Q_{kan} \cdot (T_{b,k3} - T_{b,k2}) ; \\ \Lambda_{l,vn} \cdot \left(T_{l,k3} - \frac{T_{b,k3} + T_{b,k4}}{2} \right) = c_{p_{v3}}(T_{b,k4}) \cdot Q_{kan} \cdot (T_{b,k4} - T_{b,k3}) ; \\ \Lambda_{l,vn} \cdot \left(T_{l,k4} - \frac{T_{b,k4} + T_{b,k5}}{2} \right) = c_{p_{v3}}(T_{b,k5}) \cdot Q_{kan} \cdot (T_{b,k5} - T_{b,k4}) ; \\ \Lambda_{c2} \cdot \left(T_c - \frac{T_{b,k5} + T_{b,k6}}{2} \right) = c_{p_{v3}}(T_{b,k6}) \cdot Q_{kan} \cdot (T_{b,k6} - T_{b,k5}) ; \\ \Lambda_{l,vn} \cdot \left(T_{l,p1} - \frac{T_{b,k6} + T_{b,k7}}{2} \right) = c_{p_{v3}}(T_{b,k7}) \cdot Q_{kan} \cdot (T_{b,k7} - T_{b,k6}) ; \\ \Lambda_{l,vn} \cdot \left(T_{l,p2} - \frac{T_{b,k7} + T_{b,k8}}{2} \right) = c_{p_{v3}}(T_{b,k8}) \cdot Q_{kan} \cdot (T_{b,k8} - T_{b,k7}) ; \\ \Lambda_{l,vn} \cdot \left(T_{l,p3} - \frac{T_{b,k8} + T_{b,k9}}{2} \right) = c_{p_{v3}}(T_{b,k9}) \cdot Q_{kan} \cdot (T_{b,k9} - T_{b,k8}) ; \\ \Lambda_{l,vn} \cdot \left(T_{l,p4} - \frac{T_{b,k9} + T_{b,k10}}{2} \right) = c_{p_{v3}}(T_{b,k10}) \cdot Q_{kan} \cdot (T_{b,k10} - T_{b,k9}) ; \end{array} \right. \quad (3)$$

для потока воздуха в воздушном зазоре –

$$\left\{ \begin{array}{l} \Lambda_{k1} \cdot \left(T_k - \frac{T_b + T_{b,a1}}{2} \right) + \Lambda_{k3} \cdot \left(T_k - \frac{T_b + T_{b,a1}}{2} \right) = c_{p_{v3}}(T_{b,a1}) \cdot Q_a \cdot (T_{b,a1} - T_b) ; \\ \Lambda_{l1,стек} \cdot \left(T_{l,k1} - \frac{T_{b,a1} + T_{b,a2}}{2} \right) = c_{p_{v3}}(T_{b,a2}) \cdot Q_a \cdot (T_{b,a2} - T_{b,a1}) ; \\ \Lambda_{l1,стек} \cdot \left(T_{l,k2} - \frac{T_{b,a2} + T_{b,a3}}{2} \right) = c_{p_{v3}}(T_{b,a3}) \cdot Q_a \cdot (T_{b,a3} - T_{b,a2}) ; \\ \Lambda_{l1,стек} \cdot \left(T_{l,k3} - \frac{T_{b,a3} + T_{b,a4}}{2} \right) = c_{p_{v3}}(T_{b,a4}) \cdot Q_a \cdot (T_{b,a4} - T_{b,a3}) ; \\ \Lambda_{l1,стек} \cdot \left(T_{l,k4} - \frac{T_{b,a4} + T_{b,a5}}{2} \right) = c_{p_{v3}}(T_{b,a5}) \cdot Q_a \cdot (T_{b,a5} - T_{b,a4}) ; \\ \Lambda_{c1} \cdot \left(T_c - \frac{T_{b,a5} + T_{b,a6}}{2} \right) = c_{p_{v3}}(T_{b,a6}) \cdot Q_a \cdot (T_{b,a6} - T_{b,a5}) ; \\ \Lambda_{kl} \cdot \left(T_m - \frac{T_{b,a5} + T_{b,a6}}{2} \right) = c_{p_{v3}}(T_{b,a6}) \cdot Q_a \cdot (T_{b,a6} - T_{b,a5}) ; \\ \Lambda_{l,vn} \cdot \left(T_{l,p1} - \frac{T_{b,k6} + T_{b,k7}}{2} \right) = c_{p_{v3}}(T_{b,k7}) \cdot Q_{kan} \cdot (T_{b,k7} - T_{b,k6}) ; \\ \Lambda_{l2,стек} \cdot \left(T_{l,p2} - \frac{T_{b,a7} + T_{b,a8}}{2} \right) = c_{p_{v3}}(T_{b,a8}) \cdot Q_a \cdot (T_{b,a8} - T_{b,a7}) ; \\ \Lambda_{l2,стек} \cdot \left(T_{l,p3} - \frac{T_{b,a8} + T_{b,a9}}{2} \right) = c_{p_{v3}}(T_{b,a9}) \cdot Q_a \cdot (T_{b,a9} - T_{b,a8}) ; \\ \Lambda_{l2,стек} \cdot \left(T_{l,p4} - \frac{T_{b,a9} + T_{b,a10}}{2} \right) = c_{p_{v3}}(T_{b,a10}) \cdot Q_a \cdot (T_{b,a10} - T_{b,a9}) . \end{array} \right. \quad (4)$$

В модели учитывалось, что электрические потери в узлах машины зависят от тока нагрузки I_a , текущей температуры этих узлов, а магнитные потери в ярме якоря – от значений индукции в зубцовом слое B_z , спинке B_a ярма и от частоты вращения якоря n_a , т. е. частоты

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

перемагничивания стали ярма. Теплофизические параметры охлаждающего воздуха задавались нелинейной функцией от его температуры в каждом расчетном сечении.

Расчет теплоотдачи с каждого узла выполнялся в соответствии с рекомендациями [10], т. е. коэффициенты теплоотдачи с поверхности каждого узла были представлены в модели как нелинейные функции от расхода охлаждающего воздуха G и частоты вращения якоря n_a . При этом учитывались условия вынужденной конвекции, свободной конвекции и теплового излучения для каждого узла обмотки.

Совместное решение уравнений систем (2) – (4) позволило рассчитать распределение температуры вдоль витка обмотки якоря при серийном стеклобандаже тягового электродвигателя ЭД-118 и при модернизированной конструкции бандажа. Результаты расчетов показали, что при н. у. на номинальном режиме работы машины с номинальным охлаждением машины $G_{\text{ном}} = 1,33 \text{ м}^3/\text{с}$ в случае использования модернизированного бандажа обмотка якоря по всей длине будет иметь температуры на 3 – 15 °C ниже, чем при серийном бандаже (рисунок 4). При этом важно отметить, что модернизированный бандаж позволяет обеспечить более равномерное распределение температуры по длине обмотки якоря, снижая этим неравномерность ее тепловой деформации. Самым значительным эффектом от применения комбинированного бандажа является снижение температуры лобовой части обмотки якоря со стороны, противоположной коллектору. Если в машине используется серийная конструкция бандажа из стекловолокна, то максимальная температура этой части обмотки будет на 11 °C превышать среднюю температуру пазовой части обмотки. Фактически тепловой износ изоляции якоря определится лобовой частью обмотки со стороны привода и согласно закону Монзингера для изоляции класса нагревостойкости Н будет в 2,5 раза ниже, чем ресурс изоляции в пазовой части [10].

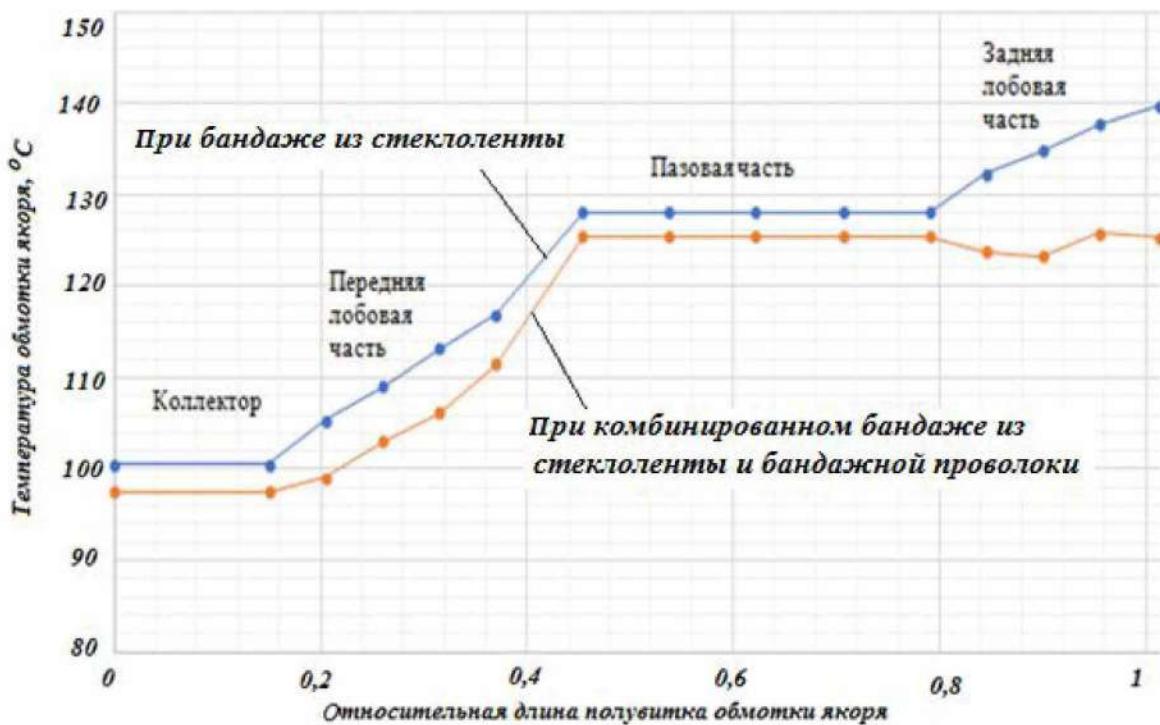


Рисунок 4 – Изменение температуры обмотки якоря тягового электродвигателя ЭД-118 при работе на номинальном режиме и н. у.

Использование модернизированного бандажа значительно меняет характер распределения температуры по длине обмотки якоря. Прежде всего комбинированный бандаж позволяет на 2 – 5 °C снизить температуру коллектора, передней лобовой части и пазовой части обмотки. При этом наибольший эффект от применения комбинированного бандажа

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

наблюдается в лобовой части обмотки со стороны, противоположной коллектору, которая и определяет износ изоляции в целом. Здесь за счет применения проволочного бандажа температура несколько снижается по длине обмотки (на 2 °C), а затем несколько повышается из-за наличия слоев стеклобандажа, но не превышает температуры пазовой части обмотки. В результате износ изоляции якоря будет более равномерным и значительно меньшим, чем при стеклобандаже. С учетом же снижения средней температуры обмотки лимитирующая часть при комбинированном бандаже будет нагреваться на 15 °C меньше, чем при стеклобандаже. В соответствии с законом Монзингера снижение температуры изоляции класса нагревостойкости Н на 15 °C приводит к более чем трехкратному повышению ее ресурса.

Таким образом, расчеты показали, что при сохранении своего функционального назначения – механической прочности – бандаж, состоящий из комбинации слоев бандажной проволоки и стеклоленты, позволяет уменьшить неравномерность распределения температуры обмотки якоря со значительным снижением ее в лобовой части со стороны привода. Использование бандажа такой конструкции целесообразно на электрических машинах ответственного электропривода, работающего с большими значениями токовых нагрузок. Несомненно, комбинированный бандаж несколько усложняет технологию его изготовления, однако снижение температуры обмоток машины при эксплуатации позволит повысить ее ресурс, что положительным образом скажется на эффективности и надежности работы всей системы электропривода и проведении планово-предупредительного ремонта.

Список литературы

1. Киселев, В. И. Совершенствование конструкции и технологии ремонта тяговых электродвигателей тепловозов / В. И. Киселев, А. И. Федянин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 4 (52). – С. 75–82.
2. Логинова, Е. Ю. Моделирование нестационарных тепловых полей в тяговой электрической машине / Е. Ю. Логинова. – Текст : непосредственный // Электротехника. – 1999. – № 11. – С. 21–24.
3. Проектирование электрических машин : учебное пособие / И. П. Копылов, Ф. А. Горяинов, Б. К. Клоков [и др.]. – Москва : Энергия, 1980. – 496 с., ил. – Текст : непосредственный.
4. Электровозы ВЛ. Якоря тяговых двигателей // ru.poezdvl.com : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://poezdvl.com/ehlektrovozy-i-ehlektropoezda-kalinin/yakorya-tyagovykh-dvigatelei.html> (дата обращения: 28.08.2023).
5. Металлическая проволока сплав X20H80 (NiCr) // ru.mavat.ltd : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://mavat.ltd/metallicheskaya-provoloka/provoloka-splav-x20h80-ni80-cr20/> (дата обращения: 28.08.2023).
6. Бандажи из стеклоленты // ru.stroy-technics.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://stroy-technics.ru/article/bandazhi-iz-steklolenty/> (дата обращения: 28.08.2023).
7. Борисенко, А. И. Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах / А. И. Борисенко, В. Г. Данько, А. И. Яковлев. – Москва : Энергия, 1974. – 560 с. – Текст : непосредственный.
8. Патент № 2747567 Российской Федерации, МПК H02K 3/46 (2006.01). Бандаж обмотки якоря электрической машины постоянного тока : № 2020136545 : заявлено 06.11.2020 : опубликовано 07.05.2021 / Логинова Е. Ю., Нефедов Р. А., Гордеенков А. М. – 11 с.: ил. – Текст : непосредственный.
9. Тепловоз ТЭ3. Тяговый электродвигатель // scbist.com : сайт. – Текст : электронный. – URL: http://scbist.com/scb/uploaded/teplovozy/te3_17.html (дата обращения: 28.08.2023).
10. Устройство и ремонт электрических машин – бандажирование и балансировка роторов и якорей // leg.co.ua : сайт. – Текст : электронный. – URL : <https://leg.co.ua/info/elektricheskie-mashiny/ustroystvo-i-remont-elektricheskikh-mashin-13.html> (дата обращения: 28.08.2023).

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

References

1. Kiselev V.I., Fedyanin A.I. Improvement the design and technology of repair the diesel locomotives traction electric motors. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2022, no. 4 (52), pp. 75-82 (In Russian).
2. Loginova E.Ju. Modeling of unsteady thermal fields in traction electric machine. *Elektrotehnika – Russian Electrical Engineering*, 1999, no. 11, pp. 21-24 (In Russian).
3. Kopylov I.P., Goriainov F.A., Klokov B.K. et al. *Proektirovanie elektricheskikh mashin: uchebnoe posobie* [Design of electric machines: textbook]. Moscow, Energiia Publ., 1980, 496 p. (In Russian).
4. *Elektrovozy VL. Iakoria tiagovykh dvigatelei* [VL electric locomotives. Anchors of traction motors]. Available at: <https://poezdvl.com/ehleketrovozy-i-ehlektropoezda-kalinin/yakoryatiagovykh-dvigatelei.html/> (accessed 28.08.2023).
5. *Metallicheskaya provoloka splav Kh20N80 (NiCr)* [Metal wire alloy Ni80Cr20 (NiCr)]. Available at: <https://mavat.ltd/metallicheskaya-provoloka/provoloka-splav-x20h80-ni80-cr20/> (accessed 28.08.2023).
6. *Bandazhi iz steklolenty* [Fiberglass bandages]. Available at: <https://stroy-technics.ru/article/bandazhi-iz-steklolenty/> (accessed 28.08.2023).
7. Borisenko A.I., Dan'ko V.G., Yakovlev A.I. *Aerodinamika i teploperedacha v elektricheskikh mashinakh* [Aerodynamics and heat transfer in electrical machines]. Moscow, Energiia Publ., 1974, 560 p. (In Russian).
8. Loginova E.Iu., Nefedov R.A., Gordeenko A.M. Patent RU 2747567 C1, 07.05.2021.
9. *Teplovoz TE3.Tiagovyи elektrodvigatel'* [Diesel locomotive TE3.Traction electric motor]. Available at: [http://scbist.com/scb/uploaded/teplovozy/te3_17.html/](http://scbist.com/scb/uploaded/teplovozy/te3_17.html) (accessed 28.08.2023).
10. *Ustroistvo i remont elektricheskikh mashin – bandazhirovaniye i balansirovka rotorov i iakorei* [Design and repair of electrical machines – banding and balancing of rotors and armatures]. Available at: [https://leg.co.ua/info/elektricheskie-mashiny/ustroystvo-i-remont-elektricheskikh-mashin-13.html/](https://leg.co.ua/info/elektricheskie-mashiny/ustroystvo-i-remont-elektricheskikh-mashin-13.html) (accessed 28.08.2023).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гардеенков Александр Михайлович

Государственное унитарное предприятие города Москвы «Московский ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени метрополитен имени В. И. Ленина (ГУП «Московский метрополитен»), электродепо «Лихоборы».

Верхнелихобурская ул., д. 5, стр. 1, г. Москва, 127238, Российская Федерация.

Машинист-инструктор локомотивных бригад.

Тел.: +7 (499) 325-02-14.

E-mail: alexgar@live.ru

Логинова Елена Юрьевна

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва, 127055, Российская Федерация.

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

Тел.: +7 (495) 681-13-40.

E-mail: ejy-loginova@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gardeenkov Alexander Mikhailovich

State unitary enterprise of the city of Moscow «Moscow Order of Lenin and Order of the Red Banner of Labor Metro named after V.I. Lenin» (SUE «Moscow Metro»), electric depot «Likhobory».

5 building 1, Verkhnelikhobrskaya st., Moscow, 127238, the Russian Federation.

Driver-instructor for locomotive crews.

Phone: +7 (499) 325-02-14.

E-mail: alexgar@live.ru

Loginova Elena Yurievna

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

9, building 9, Obraztsova st., Moscow, 127055, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor, professor of the department «Electric Trains and Locomotives», RUT (MIIT).

Phone: +7 (495) 681-13-40.

E-mail: ejy-loginova@mail.ru

Управление процессами перевозок

Буйкин Максим Андреевич

Проектно-конструкторско-технологическое
бюро по нормированию – филиал ОАО «РЖД».
Бригадирский пер., д. 6, г. Москва, 105005,
Российская Федерация.

Ведущий технолог отдела нормирования
материально-технических ресурсов на ремонт и
техническое обслуживание локомотивов (ОНлок).

Тел.: +7 (985) 114-92-95.

E-mail: Lao-Shan-Lang@yandex.ru

Buykin Maxim Andreevich

Design, engineering and technology bureau for
standardization – a branch of JSC «Russian Railways».
6, Brigadirsky lane, Moscow, 105005, the Russian
Federation.

Leading technologist of the department of
standardization of material and technical resources for
repair and maintenance of locomotives (ONlok).

Phone: +7 (985) 114-92-95.

E-mail: Lao-Shan-Lang@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Гардеенков, А. М. Снижение температуры обмотки якоря электрической машины постоянного тока / А. М. Гардеенков, Е. Ю. Логинова, М. А. Буйкин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 4 (56). – С. 25 – 36.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Gardeenkov A.M., Loginova E.Yu., Buykin M.A. Reducing the temperature of armature winding of a DC electrical machine. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 4 (56), pp. 25-36 (In Russian).

УДК 656.225

А. С. Кучуков, О. В. Шугаев

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Российская Федерация

АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ ОТКЛОНЕНИЯ ВРЕМЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ГРУЗОВЫХ ФРОНТОВ УГЛЕПОГРУЗОЧНОЙ СТАНЦИИ ОТ ТЕКУЩИХ РАСЧЕТНЫХ ДАННЫХ

Аннотация. В связи с постоянно растущими объемами перевозок на железнодорожном транспорте время погрузки угля в полуваагоны играет важную роль при составлении технологических планов работы углепогрузочных станций и предприятий, что сказывается на времени простоя подвижных единиц и погрузочных установок. В данной статье рассматривается вопрос оптимизации времени погрузки угля бункерным способом на углепогрузочных станциях. Для выявления возможных флуктуаций при технологической эксплуатации погрузочного комплекса необходимо разработать математический аппарат, способный по имеющимся показателям работы спрогнозировать дальнейшие параметры времени погрузочных работ. В публикации рассматривается действующая методика расчета технологических норм погрузки и анализируются временные параметры, влияющие на процесс погрузки. Для прогнозирования и оценки времени технологических операций используются методы математической статистики, отирающиеся на эмпирически полученные данные. Обоснована практическая применимость метода расчета математического ожидания и действующей методики. Имеющиеся данные, полученные из графиков исполненной работы технологического объекта «Т» в течение одного месяца, были обработаны с помощью метода определения математического ожидания неслучайной функции от времени и метода скользящей средней и показали значительные флуктуации в режиме работы по некоторым углепогрузочным путям. В ходе анализа выявлено значительное расхождение коэффициентов корреляции по каждому пути на исследуемой станции, что объясняется частыми флуктуациями в работе углепогрузочного комплекса. Для проведения дальнейшего анализа работы углепогрузочных комплексов необходимо получить дополнительные эмпирические данные при их длительной работе в разных эксплуатационных условиях.

Ключевые слова: углепогрузочная станция, полуваагон, время погрузки, математическое ожидание, коэффициент корреляции, математическая модель.

Artem S. Kuchukov, Oleg V. Shugaev

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

ANALYSIS OF THE LOADING TIME DEVIATION FROM THE EXPECTED VALUES AT COAL LOADING STATIONS

Abstract. The increase in the railroad transportation volume imposes pressure on the loading time and scheduling of coal loading stations, which directly affect the downtime of wagons and loaders. This article considers the optimization

Управление процессами перевозок

of the coal loading time by bunker method at loading stations. To identify fluctuations in the technological operation of the cargo complex, it is necessary to develop a calculation methodology that can determine the parameters of the time of cargo operations in the future based on the available performance indicators. The conventional method of technological standards evaluation is considered, and the parameters affecting the loading process are analyzed. Statistical analysis is used for forecasting the loading time based on the empirical data, and the use of the conventional method based on the expected value is verified. The practical applicability of the mathematical expectation calculation method and the current methodology is substantiated. The data collected at the object «T» during one month is analyzed using an exponential moving average, and high fluctuations and correlation coefficient inconsistency are revealed in particular coal loading lines. The analysis revealed a significant discrepancy in the correlation coefficients for each track at the station under study, which is explained by frequent deviations in the operation of the coal loading complex. Further analysis of loading line efficiency requires collecting additional data for a longer time at various conditions.

Keywords: coal loading station, gondola car, loading time, mathematical expectation, correlation coefficient, mathematical model.

При составлении суточного плана-графика угледогрузочной станции необходимо учесть множество факторов, влияющих на выполнение в установленном масштабе времени движения поездов. Время погрузки угля в полувагоны для дальнейшей транспортировки играет важную роль при составлении технологических планов работы угледогрузочных станций и предприятий, поскольку влияет на время простоя локомотивов и вагонов.

Уголь является востребованным источником энергии и одним из наиболее часто перевозимых товаров железнодорожным транспортом. Согласно статистике Росстата [1] был построен график (рисунок 1), из которого следует, что объем погрузки угля на железнодорожном транспорте практически непрерывно увеличивается.

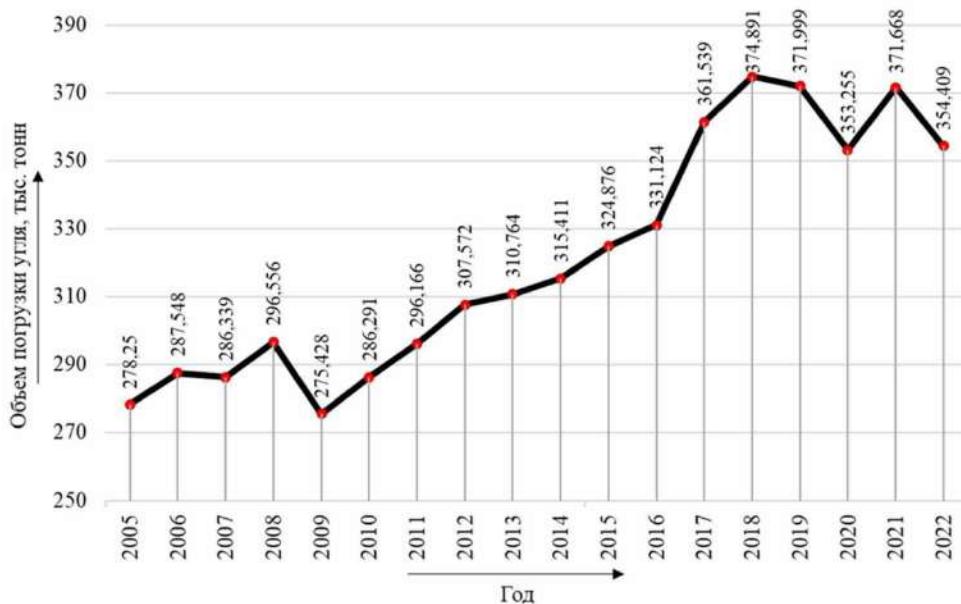


Рисунок 1 – Объем погрузки каменного угля на железнодорожном транспорте 2005 – 2022 гг.

В связи с этим возникает проблема оптимизации времени погрузки для минимизации потерь времени при нарастающем объеме погрузки. В будущем при достижении полной механизации и применении оптимальных методов прогнозирования временных флуктуаций работы станций, циклов погрузо-разгрузочных работ и погрузо-разгрузочных машин (ПРМ) можно достигнуть высоких показателей эффективности работы угледогрузочных станций.

Разработка новых методов прогнозирования временных показателей технологических операций в будущем позволит добиться следующих результатов.

1. Повышенная эффективность. Используя математические расчеты для определения оптимального времени загрузки, процесс можно сделать более эффективным. Это означает, что большее количество вагонов может быть загружено за более короткий промежуток времени, что в конечном итоге может привести к сокращению времени выполнения всей операции.

Управление процессами перевозок

2. Повышенная точность. Расчет оптимального времени загрузки может помочь обеспечить загрузку нужного количества угля в каждый вагон. Это позволит сократить случаи перегрузки или недогрузки, которые могут повлиять на эффективность и безопасность всей операции.

3. Снижение затрат. За счет оптимизации времени загрузки можно сократить время и трудозатраты, необходимые для загрузки каждого вагона, что положительно скажется на операционных расходах и прибыльности компании.

4. Повышенная безопасность. Благодаря правильной загрузке вагонов можно снизить риск несчастных случаев или инцидентов во время перевозки. Это может помочь повысить безопасность рабочих и предотвратить повреждение оборудования или имущества.

В связи с изложенным выше необходимо проанализировать действующий метод определения технологических норм погрузки угля в вагоны с применением бункерной установки и на ряде имеющихся опытных данных разработать модель экстраполирования последующих значений вне этого ряда.

Процедура погрузки угля в вагоны варьируется в зависимости от конкретной станции и ее оборудования. В настоящее время существует два вида погрузки угля в вагоны – бункерный (с предварительным накоплением и последующим перемещением груза из бункера в вагон) и безбункерный (поточная, при помощи конвейеров, погрузчиков и кранов).

Расчет времени на погрузку углем из бункера рассчитывается по формуле [3]:

$$T = t_{\text{подг}} + \frac{n}{m} \cdot t_{\text{груз}} + t_{\text{закл, мин}}, \quad (1)$$

где $t_{\text{подг}}$ – время выполнения подготовительных операций;

n – количество вагонов в подаче;

m – число одновременно погружаемых вагонов при использовании нескольких механизмов;

$t_{\text{груз}}$ – время непосредственной загрузки угля;

$t_{\text{закл}}$ – время выполнения заключительных операций.

Для выяснения технологических особенностей работы углопогрузочных систем данную формулу можно представить в другом виде:

$$T = \sum_{i=1}^N t_i + \frac{n}{m} \cdot t_{\text{груз}} + \sum_{j=1}^M t_j, \text{ мин.} \quad (2)$$

Это позволяет отслеживать временные отклонения на каждом этапе, поскольку данная формула будет включать в себя несколько постоянно изменяющихся параметров, что позволит точно корректировать и прогнозировать теоретическое время погрузки.

Время подготовительных операций включает в себя несколько показателей, таких как получение распоряжения на маневровую работу, размещение вагона в зоне погрузки, проверка на чистоту и пригодность к погрузке, время на размещение погрузочного оборудования над полувагоном, снятие пломб, закруток, закрывание дверей, люков, отбор пробы.

Время непосредственной загрузки угля в большей степени зависит от мощности бункера и скорости его загрузки. Грузоподъемность самих полувагонов может немного варьироваться, однако в среднем составляет 70 т, что не может существенно сказываться на времени погрузки. При автоматической погрузке (когда оператор контролирует количество погружаемого угля из бункера) возможны отклонения от нормальных показателей в связи с человеческим фактором. На это влияют усталость сотрудников, их умение и опыт, а также качество коммуникации между работниками.

Временной параметр заключительных операций включает в себя уборку вагонов из зоны погрузки, взвешивание вагонов и проверку весовых норм погрузки, постановку закруток и пломб, увязку груза, формирование трапецеидальной формы для сыпучих грузов, дозировку недогруженных подвижных единиц.

Управление процессами перевозок

Согласно нормам [3, 4] суммарное теоретическое время на подготовительно-заключительные технологические операции работы составляет

$$\Sigma t_i + \Sigma t_j = 8,41 + 0,14 \cdot n, \text{ мин.} \quad (3)$$

где 8,41 – суммарное усредненное теоретическое время подготовительно-заключительных операций, мин.

Тогда формула (2) преобразуется в следующий вид:

$$T = \frac{n}{m} \cdot t_{\text{груз}} + 0,14 \cdot n + 8,41, \text{ мин.} \quad (4)$$

Полученная формула (4) будет отражать понятие теоретического математического ожидания времени погрузки. Полученные временные значения погрузки имеют рекомендательный характер, поэтому при осуществлении технологических операций возможны различные флюктуации относительно среднего значения времени углопогрузки.

Для эмпирических данных найдем математическое ожидание неслучайной функции $m_x(T)$, которая при любом значении аргумента времени T равна математическому ожиданию соответствующего сечения [5]:

$$m_x(T) = M[X(T)], \quad (5)$$

где $M[X(T)]$ – математическое ожидание сечения неслучайной функции $m_x(T)$.

Полученные значения математических ожиданий, рассчитанные по формулам (4), (5), позволяют комплексно оценить как номинальное, так и действительное время погрузки. При постоянно пополняющемся и обновляющемся массиве эмпирических данных можно своевременно прогнозировать и корректировать время технологических операций. Практическая применимость этого метода весьма ограничена, поскольку его точность полностью зависит от объема полученных эмпирических данных.

На основании данных, полученных из графиков исполненного движения поездов и маневровой работы по углопогрузочной станции «Т», были составлены таблицы в программе Microsoft Excel со значениями времени погрузки и указанием количества перерабатываемых вагонов. Полученные данные были обработаны при помощи методов математической статистики и изображены на рисунке 2.

Все данные для построения графика, изображенного на рисунке 2, приведены в таблицах 1 – 3. Жирной линией показан расчет теоретического времени погрузки в минутах; пунктирной линией – эмпирическое математическое ожидание ($m_x(T)$), рассчитанное по формуле (5). Тонкой линией показан расчет по методу скользящей средней.

Обе кривые, построенные на основании эмпирических данных, находятся возле теоретической кривой, тем не менее функция $m_x(T)$ отклоняется значительно меньше от теоретического времени погрузки, чем график, построенный для серии опытов по методу скользящей средней.

Для исследования взаимосвязи между показателями погрузки был рассчитан коэффициент корреляции, определяемый по формуле [2]:

$$r = \frac{K_{Tn}}{\sigma_T \sigma_n} \sim \frac{\sum (T - \bar{T}) \cdot (n - \bar{n})}{\sqrt{\sum (T - \bar{T})^2 \cdot \sum (n - \bar{n})^2}}, \quad (6)$$

где K_{Tn} – ковариация случайных величин времени погрузки T и количества вагонов в подаче n ;

σ_T, σ_n – среднеквадратичные отклонения величин времени погрузки T и количества вагонов в подаче n .

Управление процессами перевозок

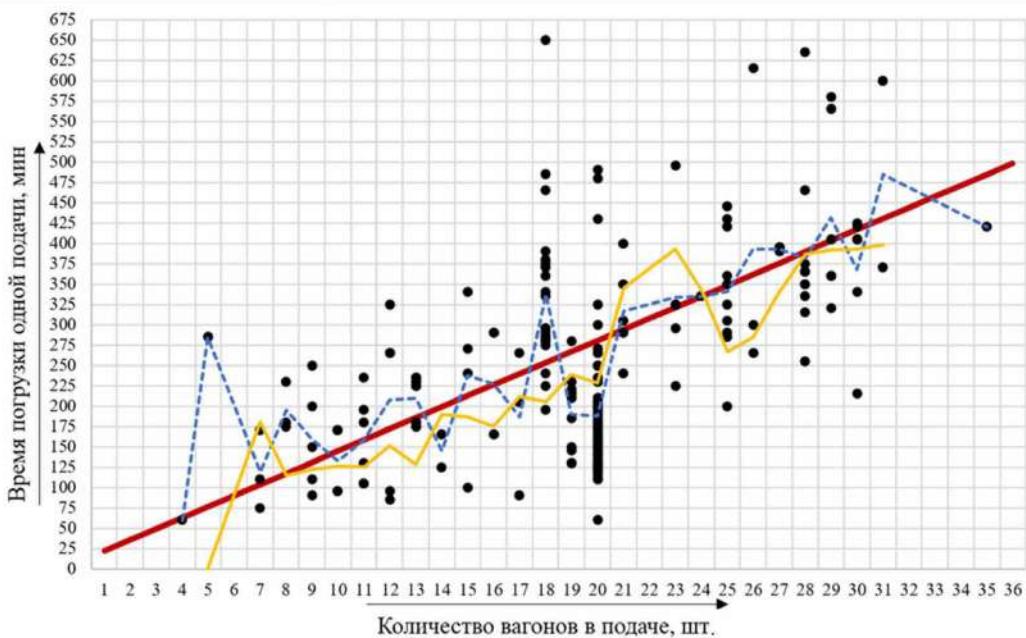


Рисунок 2 – Эмпирические данные по углопогрузочной станции «Т»

Значение коэффициента корреляции для серии опытов, результаты которых изображены на рисунке 3, оказалось в некоторых случаях достаточно высоким, что говорит о наличии «существенной» положительной линейной связи между исследуемыми величинами [2].

Таблица 1 – Результаты теоретического расчета времени погрузки

Временные параметры	Количество вагонов в подаче								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Подготовительные и заключительные операции, мин	8,55	8,69	8,83	8,97	9,11	9,25	9,39	9,53	9,67
Непосредственная загрузка, мин	13,46	26,92	40,38	53,84	67,3	80,76	94,22	107,68	121,14
Итого на погрузку, мин	22,01	35,61	49,21	62,81	76,41	90,01	103,61	117,21	130,81
Временные параметры	Количество вагонов в подаче								
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Подготовительные и заключительные операции, мин	9,81	9,95	10,09	10,23	10,37	10,51	10,65	10,79	10,93
Непосредственная загрузка, мин	134,6	148,06	161,52	174,98	188,44	201,9	215,36	228,82	242,28
Итого на погрузку, мин	144,41	158,01	171,61	185,21	198,81	212,41	226,01	239,61	253,21
Временные параметры	Количество вагонов в подаче								
	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Подготовительные и заключительные операции, мин	11,07	11,21	11,35	11,49	11,63	11,77	11,91	12,05	12,19
Непосредственная загрузка, мин	255,74	269,2	282,66	296,12	309,58	323,04	336,5	349,96	363,42
Итого на погрузку, мин	266,81	280,41	294,01	307,61	321,21	334,81	348,41	362,01	375,61
Временные параметры	Количество вагонов в подаче								
	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Подготовительные и заключительные операции, мин	12,33	12,47	12,61	12,75	12,89	13,03	13,17	13,31	13,45
Непосредственная загрузка, мин	376,88	390,34	403,8	417,26	430,72	444,18	457,64	471,1	484,56
Итого на погрузку, мин	389,21	402,81	416,41	430,01	443,61	457,21	470,81	484,41	498,01

Управление процессами перевозок

Таблица 2 – Результаты эмпирического расчета математического ожидания

Показатель	Количество вагонов в подаче								
	4	5	7	8	9	10	11	12	13
Эмпирическое мат. ожидание, мин	60,00	285,00	118,33	195,00	160,00	132,50	158,33	207,00	209,00
Показатель	Количество вагонов в подаче								
	14	15	16	17	18	19	20	21	23
Эмпирическое мат. ожидание, мин	145,00	237,50	227,50	186,67	337,86	189,50	187,79	317,00	333,00
Показатель	Количество вагонов в подаче								
	24	25	26	27	28	29	30	31	35
Эмпирическое мат. ожидание, мин	335,00	341,00	393,33	392,50	381,00	431,67	368,33	485,00	420,00

Таблица 3 – Расчет значений скользящего среднего (интервал 3) для серии опытов

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Количество вагонов в подаче	4	5	7	8	9	10	11	12	13
Время погрузки, мин	60,00	285,00	75,00	180,00	90,00	95,00	195,00	85,00	175,00
Скользящее среднее времени погрузки, мин	–	–	180,00	115,00	121,67	126,67	125,00	151,67	128,33
Номер опыта	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Количество вагонов в подаче	14	15	16	17	18	19	20	21	23
Время погрузки, мин	125,00	270,00	165,00	90,00	380,00	145,00	190,00	350,00	495,00
Скользящее среднее времени погрузки, мин	190,00	186,67	175,00	211,67	205,00	238,33	228,33	345,00	393,33
Номер опыта	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Количество вагонов в подаче	24	25	26	27	28	29	30	31	35
Время погрузки, мин	335,00	200,00	265,00	390,00	365,00	405,00	405,00	370,00	420,00
Скользящее среднее времени погрузки, мин	343,33	266,67	285,00	340,00	386,67	391,67	393,33	398,33	–

Столь существенная разница между коэффициентами корреляции для каждого погрузочного пути может быть вызвана большими отклонениями и частыми неполадками в работе погрузочного комплекса.

Управление процессами перевозок

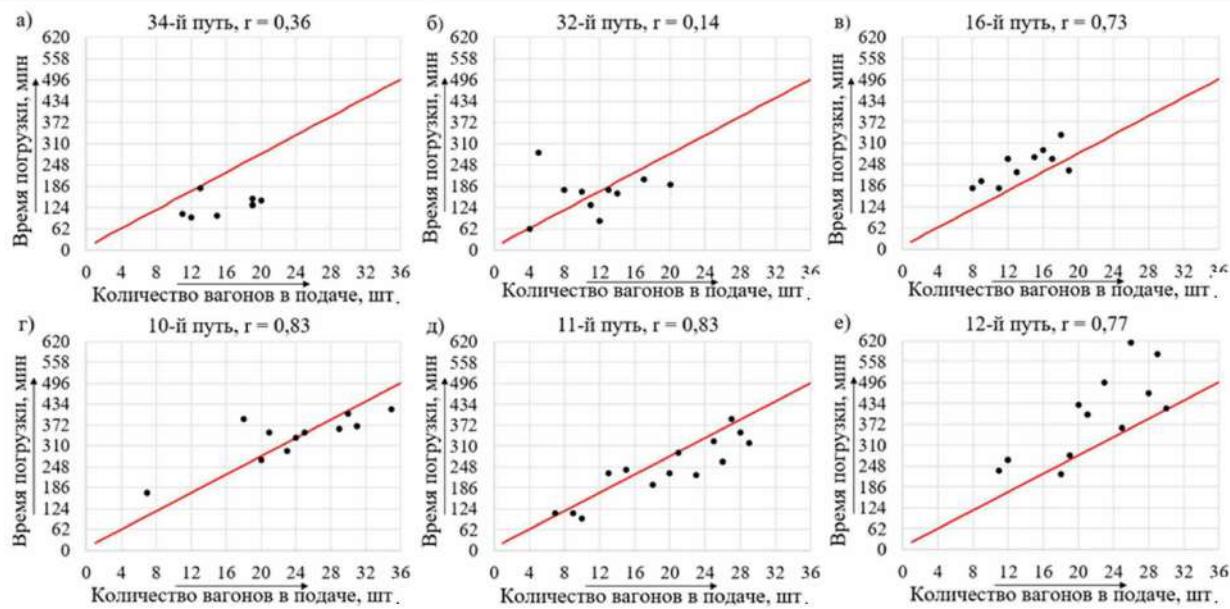


Рисунок 3 – Эмпирические данные, полученные по каждому погрузочному пути станции «Т». Для каждого пути рассчитан коэффициент линейной корреляции. По горизонтальной оси указано количество вагонов, одновременно подаваемых под погрузку; по вертикальной оси – время погрузки в минутах

Опытные данные показали практическую применимость действующего метода [3, 4] расчета теоретического метода погрузки по формуле (4) с суммарным усредненным теоретическим временем подготовительно-заключительных операций. Определение и построение графика математического ожидания позволили наглядно сравнить его точность с методом скользящей средней. Показатели коэффициента корреляции позволили выявить значительные флуктуации в режиме работы по каждому углепогрузочному пути. Для дальнейшего выявления этой зависимости необходимо получить данные о мощности и характере работы погрузочных устройств в разных условиях. В целом, анализируя материал по представленной работе, можно сделать вывод о фактическом выполнении поставленной цели работы. Исследование временных флуктуаций работы грузового фронта углепогрузочной станции позволило выделить оптимальную методику по экстраполированию параметров работы грузового фронта от других случайных показателей работы указанного объекта железнодорожного транспорта. Представленная методика прошла физические испытания и показала успешность ее использования. В дальнейшем при реализации указанного в публикации подхода по экстраполированию в производственной сфере позволит изменить отношение к планированию и проектированию эксплуатационной работы на расчетный период, что приведет к повышению перерабатывающей способности станции и снижению межоперационных простоев грузового фронта.

Список литературы

1. Объем погрузки основных видов грузов на железнодорожном транспорте (с 2005 г.) // Федеральная служба государственной статистики : сайт. – Текст : электронный. – URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Pogruzka_01-2023.xlsx (дата обращения: 20.03.2023).
2. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей : учебник / Е. С. Вентцель. – Москва : Высшая школа, 2006. – 575 с. : – Текст : непосредственный.
3. Приказ МПС РФ от 29.09.2003 № 67 «Об утверждении Порядка разработки и определения технологических сроков оборота вагонов и технологических норм погрузки грузов в вагоны и выгрузки грузов из вагонов». – Москва : МПС РФ, 2003. – Текст : непосредственный.

Управление процессами перевозок

4. Приказ МПС РФ № от 10.11.2003 № 70 «О методике по разработке и определению технологических норм погрузки грузов в вагоны и выгрузки грузов из вагонов». – Москва : МПС РФ, 2003. – Текст : непосредственный.

5. Вентцель, Е. С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – Москва : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. (Физико-математическая библиотека инженера.). – 384 с. – Текст : непосредственный.

References

1. *Ob `em pogruzki osnovnyx vidov gruzov na zheleznodorozhnom transporte (s 2005 g.)* [The volume of loading of the main types of cargo in railway transport (since 2005)]. Available at: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Pogruzka_01-2023.xlsx (accessed 20.03.2023).
2. Ventcel' E.S. *Teoriya veroyatnostej: uchebnik* [Probability theory: textbook]. Moscow, Higher school Publ., 2006, 575 p. (In Russian).
3. Order of the Ministry of Railways of the Russian Federation dated September 29, 2003 № 67 «On approval of the Procedure for the development and determination of technological terms for the turnover of wagons and technological standards for loading goods into wagons and unloading goods from wagons». Moscow, MPS OF THE Russian Federation Publ., 2003 (In Russian).
4. Order of the Ministry of Railways of the Russian Federation No. dated November 10, 2003 № 70 «On the methodology for developing and determining technological standards for loading goods into wagons and unloading goods from wagons». Moscow, MPS OF THE Russian Federation Publ., 2003 (In Russian).
5. Ventcel' E.S., Ovcharov L.A. *Teoriya sluchajnyx processov i ee inzhenernye prilozheniya* [Theory of random processes and its engineering applications]. Moscow, Science Publ., 1991, 384 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кучуков Артем Сергеевич

Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ).

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

Студент кафедры «Транспорт и логистика», СибГИУ.

Тел.: +7 (983) 228-01-31.

E-mail: kuchukov.art522@gmail.com

Шугаев Олег Владимирович

Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ).

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

Старший преподаватель кафедры «Транспорт и логистика», СибГИУ.

Тел.: +7 (950) 276-66-27.

E-mail: o_shugaev@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Кучуков, А. С. Анализ зависимости отклонения временных показателей работы грузовых фронтов углепогрузочной станции от текущих расчетных данных / А. С. Кучуков, О. В. Шугаев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 4 (56). – С. 36 – 43.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuchukov Artem Sergeevich

Siberian State Industrial University (SibSIU).

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

Student of the department «Transport and Logistics», SibSIU.

Phone: +7 (983) 228-01-31.

E-mail: kuchukov.art522@gmail.com

Shugaev Oleg Vladimirovich

Siberian State Industrial University (SibSIU).

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

Senior lecturer of the department of «Transport and Logistics», SibSIU.

Phone: +7 (950) 276-66-27.

E-mail: o_shugaev@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kuchukov A.S., Shugaev O.V. Analysis of the dependence of the deviation of the time indicators of the work of the cargo fronts of the coal loading station on the current calculated data. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 4 (56), pp. 36-43 (In Russian).

Управление процессами перевозок

УДК 656.2.022.846:629.4.024.1

А. Г. Котенко¹, С. Б. Сатторов²

¹АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»),
г. Москва, Российская Федерация;

²Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ), г. Ташкент, Республика Узбекистан

К ВОПРОСУ УСИЛЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЛИНИИ ПРИ ВВЕДЕНИИ УСКОРЕННЫХ ГРУЗОВЫХ ПЕРЕВОЗОК

Аннотация. Сеть железных дорог - динамическая система, в которой из-за роста грузооборота и в связи с совершенствованием перевозочных средств непрерывно изменяется степень соответствия потребной и наличной пропускных способностей. Для повышения конкурентоспособности железнодорожных перевозок исследуется введение ускоренных грузовых поездов. Задача данной статьи – определить экономически рациональные мероприятия по внедрению ускоренных грузовых поездов в условиях растущих грузопотоков.

В статье рассматриваются варианты поэтапного усиления пропускной и провозной способностей узбекских железных дорог. При этом проблема состоит в выборе конкретных мер и определении сроков их реализации с учетом прогнозного изменения соотношения затрат и доходов. Прежде всего это касается методов оценки схем этапного развития линий и мест расположения опорных точек – транспортных узлов системы перевозок местных грузов. В качестве основы для оценивания этапности развития участков линий железных дорог предлагается двухуровневая модель транспортно-логистической сети. Разработан итерационный алгоритм назначения опорных станций при заданном расположении центров производства/потребления и известных коэффициентах производственных весов. Рациональные варианты развития линии при назначенных опорных станциях осуществлен на замкнутом направленном графе. Плановая схема этапного развития линии строится на базе расчетной схемы с учетом влияния модели организации перевозок. Результатом данного исследования является алгоритм составления вариантов суточного графика движения поездов с местным грузом, реализуемый на основе заранее разработанных вариантов движения по параллельным ходам на рассматриваемом направлении в условиях предоставления «окон». Совмещение условий расчетной схемы этапного развития линии и рамок суточных моделей организации местных перевозок позволяет оценить плановую и потребную пропускные способности линии и дать окончательную оценку рациональности предлагаемого этапного развития при введении ускоренных грузовых перевозок.

Ключевые слова: пропускная способность, ускоренный грузовой поезд, грузопоток, скорость, опорная станция.

Alexey G. Kotenko¹, Samandar B. Sattorov²

¹Railway Research Institute of JSC Russian Railways, Moscow, Russia

²Tashkent State Transport University (TSTU), Tashkent, the Republic of Uzbekistan

ISSUES OF INCREASING THE CAPACITY WITH THE INTRODUCTION OF ACCELERATED FREIGHT TRAINS

Abstract. The railway network is a dynamic system in which, due to the growth of freight turnover and in connection with the improvement of transportation means, the degree of correspondence between the required and available carrying capacity is constantly changing. To improve the competitiveness of rail transport, the introduction of accelerated freight trains is being explored. The purpose of this article is to determine economically rational measures for the introduction of accelerated freight trains in the context of growing freight flows.

The article discusses options for gradually strengthening the throughput and carrying capacity of the Uzbek railways. In this case, the problem is to select specific measures and determine the timing of their implementation, taking into account the forecast change in the ratio of costs and income. First of all, this concerns methods for assessing schemes for the staged development of lines and locations of support points – transport hubs of the local cargo transportation system. As a basis for assessing the stages of development of sections of railway lines, a two-level model of the transport and logistics network is proposed. An iterative algorithm for assigning reference stations has been developed for a given location of production/consumption centers and known coefficients of production weights. Rational options for line development with designated reference stations are carried out on a closed directed graph. The planned scheme for the staged development of the line is built on the basis of a design scheme, taking into account the influence of the transportation organization model. The result of this study is an algorithm for compiling options for the daily schedule of trains with local cargo, implemented on the basis of pre-developed options for movement along parallel tracks in the direction under consideration under the conditions of providing «windows». Combining the conditions of the calculation scheme for the staged development of the line and the framework of daily models for organizing local transportation

Управление процессами перевозок

makes it possible to estimate the planned and required capacity of the line and give a final assessment of the rationality of the proposed staged development with the introduction of accelerated freight transportation.

Keywords: throughput, accelerated freight train, cargo traffic, speed, supporting station.

Рост рынка грузовых перевозок на территории Республики Узбекистан вызывает в отдельных его сегментах острую конкуренцию между железнодорожным и автомобильным транспортом. И хотя подавляющая часть (в среднем более 85 %) ранее традиционных для железных дорог местных грузов на национальном уровне за последние 30 лет ушла на автотранспорт (рисунок 1), с подъемом экономики, ростом объемов и товарооборота ситуация на перевозочном рынке становится менее устойчивой. Особую роль в этом играет развитие центральноазиатских транспортных коридоров, проходящих через территорию республики. Здесь железнодорожный транспорт способен без труда сохранять доминирующее значение, с одной стороны, гарантируя устойчивость грузопотока, с другой – определяя долгосрочную транспортную политику Узбекистана. И это касается не только повышения уровня транзитного грузопотока, но и наращивания объемов перевозок местных грузов в зонах транспортного тяготения коридоров. А поскольку последнее определяет состояние железнодорожной инфраструктуры в части оснащения станций, информационных систем и ряда других составляющих, то оно существенно меняет отношение железных дорог к местным грузовладельцам, включая железные дороги в борьбу за местные перевозки [1]. В итоге рынок автомобильных грузоперевозок республики даже на узко региональном уровне как в сегментах комплектных (full truck load, FTL), так и сборных (less than load, LTL) перевозок грузов вынужден реагировать на вызовы со стороны железных дорог.

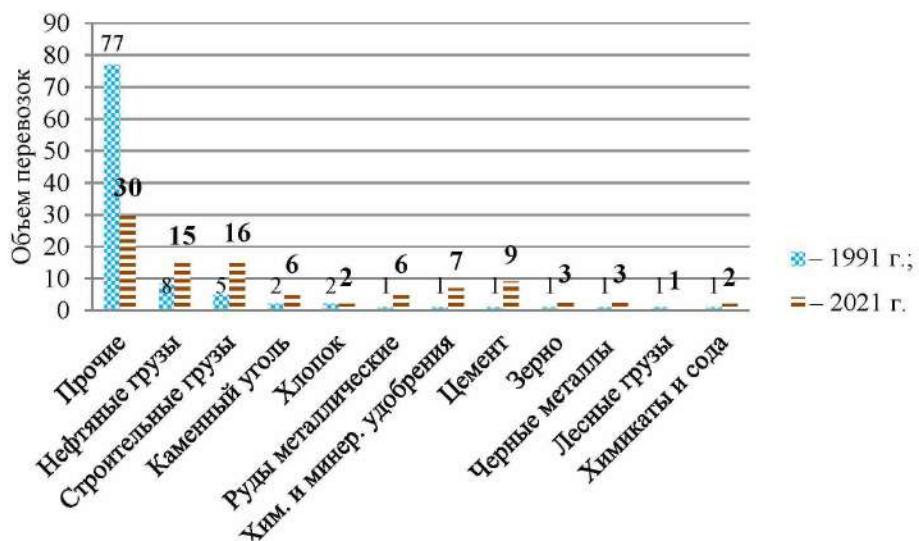


Рисунок 1 – Изменение объемов перевозок местных грузов по АО «Узбекистон темир йуллари» с 1990-х до 2020-х гг.

Это обусловлено прежде всего появляющимися возможностями реализации современных решений в части технической составляющей железнодорожных перевозок (устройства пути, средств сигнализации, конструкций подвижного состава и др.), а также активным разворотом железнодорожной отрасли в сторону наращивания контейнерных перевозок, что позволяет вслед за расширением номенклатуры контейнеропригодных грузов организовать движение ускоренных поездов с местным грузом в контейнерах [1 – 4].

Вместе с тем появление ускоренных грузовых поездов в смешанном потоке на инфраструктуре АО «Узбекистон темир йуллари» чревато появлением задержек поездов других категорий из-за увеличения количества скрещений и обгонов [5], что, в свою очередь, способно провоцировать рост коэффициента съема пропускной способности, причем чем

Управление процессами перевозок

выше окажется скорость движения поездов с местным грузом, тем меньше возможностей останется для пропуска более медленных поездов и тем больше возрастут эксплуатационные затраты на перевозки [6]. В связи с этим требуется поэтапное усиление пропускной и провозной способностей узбекских железных дорог [7-10], которое может быть осуществлено при помощи ряда известных мер:

строительства новых главных путей на линиях и использование их для пропуска выделенной части поездов;

увеличения объемов движения соединенных грузовых поездов или движения их на виртуальной сцепке;

перевода части поездопотока на параллельные направления;

совмещения пропуска ускоренных поездов с местным грузом со скоростными пассажирскими поездами на специализированной высокоскоростной магистрали.

Проблема состоит в выборе конкретных мер и определении сроков их реализации с учетом прогнозного изменения соотношения затрат и доходов [11], что представляет собой сложную междисциплинарную задачу, основанную на применении согласованных решений. Однако только в случае решения указанной задачи возможно установление баланса на перевозочном рынке между разными видами транспорта, который удовлетворит местных потребителей транспортных услуг и будет способствовать развитию транспортной системы республики.

Теоретически для оценки эффективности мер, реализуемых на заданном железнодорожном направлении в течение расчетного периода T_p , требуется решить оптимизационную задачу, исходными данными для решения которой являются:

- количество грузовых поездов, которое необходимо освоить на данном направлении, $n_{\text{гр}}(t)$;
- количество тихоходных пассажирских поездов, обращающихся на направлении, $n_{\text{пс}}(t)$;
- количество скоростных пассажирских поездов, обращающихся на направлении, $n_{\text{пс}}^{\text{ск}}(t)$;
- количество высокоскоростных пассажирских поездов, обращающихся на направлении, $n_{\text{пс}}^{\text{вс}}(t)$;
- количество ускоренных грузовых поездов, вводимых в обращение, $n_{\text{гр}}^{\text{уск}}$;
- скорости движения ускоренных грузовых поездов $V_{\text{гр}}^{\text{уск}}$;
- коэффициент соединения тяжелых грузовых поездов, $\gamma_{\text{с}}^{\text{гр}}$;
- коэффициент соединения ускоренных грузовых поездов, $\gamma_{\text{с}}^{\text{уск}}$;
- количество грузовых поездов, передаваемых на новый главный путь, $n^{\text{н.г.}}$;
- количество грузовых поездов, направляемых на параллельный ход, $n_{\text{гр}}^{\text{пр}}$.

Геометрически решение рассматриваемой задачи выглядит так, как показано на рисунке 2, где каждая из $n+1$ линий представляет величину провозной способности железнодорожного направления, соответствующую определенным условиям эксплуатации в зависимости от перечисленных параметров движения и технико-технологического состояния линии.

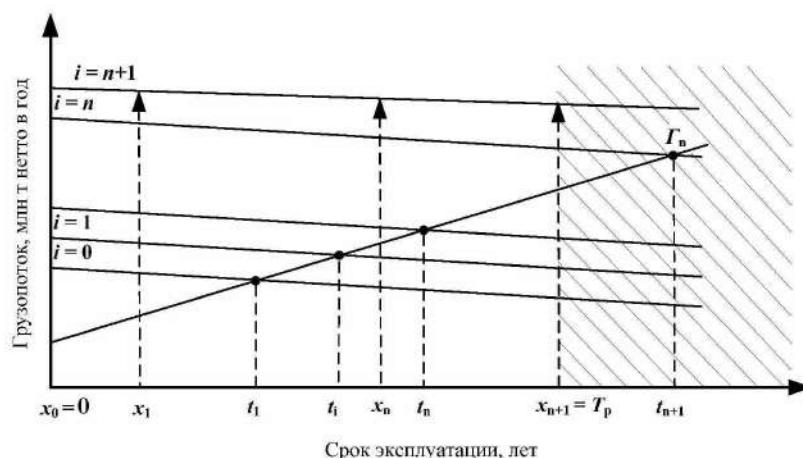


Рисунок 2 – Вариант увеличения провозной способности в зависимости от грузопотока

Управление процессами перевозок

Исходная провозная способность показана линией $i = 0$. Незаштрихованная область соответствует расчетному периоду времени T_p . Линия $\Gamma_n(t)$ – величина требуемой провозной способности на момент времени t . Точки t_i (где $i = 1, \dots, n$) обозначают срок исчерпания провозной способности, определяемый из условия, что существующая провозная способность равна требуемой $\Gamma_n(t_i) = \Gamma_n(t_i)$.

В соответствии с условием задачи до наступления срока t_i необходимо произвести переход с i -го состояния провозной способности линии на $i+1$ -е (где $i = 1, \dots, n$). Такой переход характеризуется капитальными вложениями и зависит от параметров движения:

$$K_i(n_{\text{тр}i}(x_i), n_{\text{пс}}(x_i), n_{\text{пс}^{\text{ск}}}(x_i), n_{\text{пс}^{\text{вс}}}(x_i), n_{\text{тр}}^{\text{уск}}, V_{\text{тр}}^{\text{уск}}, \gamma_{\text{ср}}^{\text{пр}}, \gamma_{\text{ср}}^{\text{уск}}, n^{\text{н. г.}}, x_i) \rightarrow \text{var.}$$

При изменении условий эксплуатации расходы на организацию движения также становятся переменными:

$$E_i(n_{\text{тр}i}(x_i), n_{\text{пс}}(x_i), n_{\text{пс}^{\text{ск}}}(x_i), n_{\text{пс}^{\text{вс}}}(x_i), n_{\text{тр}}^{\text{уск}}, V_{\text{тр}}^{\text{уск}}, \gamma_{\text{ср}}^{\text{пр}}, \gamma_{\text{ср}}^{\text{уск}}, n^{\text{н. г.}}, x_i) \rightarrow \text{var.}$$

В некоторых случаях может оказаться, что $E_{i+1} < E_i$. Тогда срок перехода с одного состояния провозной способности линии на другое укорачивается, и схема, приведенная на рисунке 2, требует перестройки.

Вместе с тем, принимая в качестве критерия общие расходы $E_{\text{об}}$ (как сумму капитальных вложений и расходов на организацию движения), в соответствии с рисунком 2 необходимо последовательно определять:

а) сроки перехода к $i+1$ -м этапам эксплуатации линии, которые должны наступать до истечения установленного срока эксплуатации на i -х этапах (t_i):

$$x_{i-1} \leq x_i \leq t_i(n_{\text{тр}i}, n_{\text{пс}i}, n_{\text{пс}^{\text{ск}}i}, n_{\text{пс}^{\text{вс}}i}, n_{\text{тр}}^{\text{уск}}, V_{\text{тр}}^{\text{уск}}, \gamma_{\text{ср}}^{\text{пр}}, \gamma_{\text{ср}}^{\text{уск}}, n^{\text{н. г.}i}), i = 1, \dots, n+1;$$

б) значения скоростей движения ускоренных грузовых поездов, которые должны либо оставаться на прежнем уровне, либо увеличиваться:

$$V_{\text{тр}i+1}^{\text{уск}} \geq V_{\text{тр}i}^{\text{уск}}, i = 1, \dots, n+1;$$

в) размеры грузового движения, отклоняемого на параллельный ход и осваиваемого на основной линии, выраженные в одиночных поездах, которые должны составить общий поток грузовых поездов, пропускаемых в данном направлении:

$$n_{\text{тр}}(t) + n_{\text{тр}}^{\text{пп}}(t) = n_{\text{тр}}^{\text{об}}(t), i = 1, \dots, n+1;$$

г) значения коэффициента соединения грузовых поездов, который не должен превышать 1:

$$0 \leq \gamma_{\text{ср}}^{\text{пр}} \leq 1 \text{ и } 0 \leq \gamma_{\text{ср}}^{\text{уск}} \leq 1, i = 1, \dots, n+1;$$

Совокупность условий а – г представляет собой множество ограничений задачи D .

Каждый ряд значений скоростей движения и коэффициентов соединения, количества грузовых поездов, передаваемых на новый главный путь и передаваемых на параллельный ход, сроков перехода с одного этапа на другой формирует множества:

- значений скорости $V_{\text{тр}}^{\text{уск}} = (V_{\text{тр}}^{\text{уск}1}, \dots, V_{\text{тр}}^{\text{уск}n+1})$;
- значений коэффициента соединения $\gamma_{\text{ср}}^{\text{пр}} = (\gamma_{\text{ср}}^{\text{пр}1}, \dots, \gamma_{\text{ср}}^{\text{пр}n+1})$ и $\gamma_{\text{ср}}^{\text{уск}} = (\gamma_{\text{ср}}^{\text{уск}1}, \dots, \gamma_{\text{ср}}^{\text{уск}n+1})$;
- число значений грузовых поездов, передаваемых на новый главный путь $n^{\text{н. г.}} = (n^{\text{н. г.}1}, \dots, n^{\text{н. г.}n+1})$;
- число значений грузовых поездов передаваемых на параллельные ходы $n_{\text{тр}}^{\text{пп}} = (n_{\text{тр}}^{\text{пп}1}, \dots, n_{\text{тр}}^{\text{пп}n+1})$;
- сроков ввода этапов $x = (x_1, \dots, x_n)$.

Указанные множества определяют множество переменных X :

Управление процессами перевозок

$$X = (n_{\text{тр}}^{\text{уск}}, V_{\text{тр}}^{\text{уск}}, x, \gamma_c^{\text{тр}}, \gamma_c^{\text{уск}}, n_{\text{тр}}^{\text{пр}}, n^{\text{н.г}}),$$

на котором и минимизируется критериальная функция

$$E_{\text{об}}(n_{\text{тр}}^{\text{уск}}, V_{\text{тр}}^{\text{уск}}, x, \gamma_c^{\text{тр}}, \gamma_c^{\text{уск}}, n_{\text{тр}}^{\text{пр}}, n^{\text{н.г}}) = \min_{X \in D} E_{\text{об}}(n_{\text{тр}}^{\text{уск}}, V_{\text{тр}}^{\text{уск}}, x, \gamma_c^{\text{тр}}, \gamma_c^{\text{уск}}, n_{\text{тр}}^{\text{пр}}, n^{\text{н.г}}).$$

Следует отметить, что расчеты, которые необходимо выполнить в рамках представленной парадигмы, сами по себе не являются простыми. Однако они существенно усложняются тем, что требуют использования ряда вспомогательных результатов, а именно:

оценок необходимых изменений технического оснащения участков АО «Узбекистон темир йуллари» и погрузо-разгрузочных терминалов в местных районах;

результатов исследования влияния ускоренных грузовых поездов на режимы движения поездов других категорий;

оценок резервов пропускной и провозной способностей линий АО «Узбекистон темир йуллари» при изменении объемов грузопотоков и ввода в обращение ускоренных грузовых поездов;

результатов исследования условий отклонения грузовых потоков на параллельные ходы и расчетов эффективности строительства новых путей общего пользования;

оценок рациональности предлагаемых схем этапного развития линий (участков) и мест размещения транспортных узлов в системе перевозок местных грузов АО «Узбекистон темир йуллари».

От перечисленных результатов зависит формулировка условий оптимальности мер по усилению пропускной и провозной способностей. С одной стороны, такие способы не должны быть громоздкими, с другой – достаточно точными и ясно изложенными. Прежде всего это касается методов оценки схем этапного развития линий и мест расположения опорных точек – транспортных узлов системы перевозок местных грузов.

Методы формирования расчетной схемы этапного развития линии. Оценка этапного развития линий основана на прогнозах грузопотока. Для формирования прогнозной оценки грузопотока могут быть проведены относительно несложные расчеты по одной из двух полиномиальных моделей: линейной или параболической. Однако, как показывает практика, в конечном итоге предпочтительнее использование параболической модели (рисунок 3), поскольку обычно она дает наилучшую сходимость при предположительно равномерно-ускоренном развитии объемов перевозок:

$$\begin{cases} \sum Q_t = a_0 \cdot n + a_1 \cdot \sum t + a_2 \cdot \sum t^2 + \dots + a_p \cdot \sum t^p; \\ \sum Q_t \cdot t = a_0 \cdot \sum t + a_1 \cdot \sum t^2 + a_2 \cdot \sum t^3 + \dots + a_p \cdot \sum t^{p+1}; \\ \dots; \\ \sum Q_t \cdot t^{p-1} = a_0 \cdot \sum t^{p-1} + a_1 \cdot \sum t^p + a_2 \cdot \sum t^{p+1} + \dots + a_p \cdot \sum t^{2p-1}; \\ \sum Q_t \cdot t^p = a_0 \cdot \sum t^p + a_1 \cdot \sum t^{p+1} + a_2 \cdot \sum t^{p+2} + \dots + a_p \cdot \sum t^{2p}. \end{cases} \quad (1)$$

В выражении (1) a_i – параметр многочлена, $i = 0, 1, \dots, p$; t – время, $t = 1, 2, \dots, n$, Q – фактический грузопоток, млн т; \bar{Q} – расчетные значения грузопотока, млн т; n – число уровней динамического ряда.

На основе полученной модели (применительно к данным рисунка 3 это $\bar{Q}_t = 21,36 + 1,12 \cdot t + 0,09 \cdot t^2$) может быть сформирован прогноз изменения грузопотока, например, для наиболее грузонапряженных участков узбекских железных дорог линии Ахангаран – Тукимачи – Сырдарьинская (Ахангаран – Тукимачи: однопутный электрифицированный участок; Тукимачи – Сырдарьинская: двухпутный электрифицированный участок).

Управление процессами перевозок

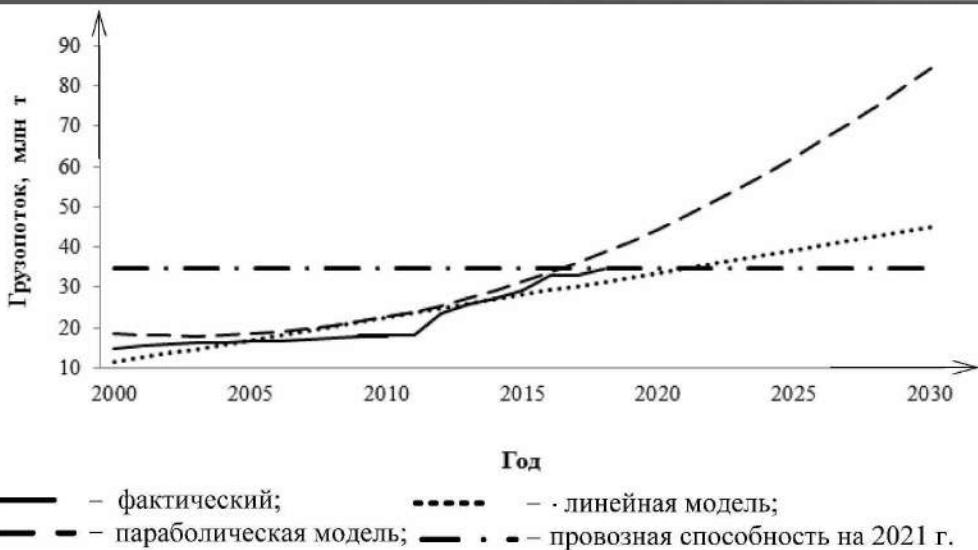


Рисунок 3 – Сравнение прогнозного роста грузопотока, полученного по линейной и параболической полиномиальным моделям, на линии Ахангаран – Тукимачи – Сырдарьинская

В соответствии с прогнозными данными может быть обоснован вариант усиления пропускной и провозной способностей рассматриваемых участков, характеризующийся минимальными строительно-эксплуатационными расходами Э_{пр} при максимальном чистом дисконтированном доходе (ЧДД):

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathcal{E}_{np} = \sum_{t=0}^T \frac{K_t}{(1+E_n)^t} + (1-\gamma) \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+E_n)^t} \rightarrow \min; \\ \text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T \frac{R_t - Z_t}{(1+E_n)^t} - \sum_{t=0}^T \frac{K_t}{(1+E_n)^t} \rightarrow \max, \end{array} \right. \quad (2)$$

где T – продолжительность расчетного периода; E_n – норма дисконта (в долях единицы); K_t – капитальные вложения на t -м шаге расчета; C_t – годовые эксплуатационные расходы в t -м году; γ – доля налоговых отчислений от прибыли, R_t – результаты (доходы), достигаемые на t -м шаге расчета; Z_t – затраты (текущие издержки), осуществляемые на t -м шаге.

При этом в качестве основы для оценивания этапности развития участков линий АО «Узбекистон темир йуллари» нужно предварительно предложить модель транспортно-логистической сети (ТЛС), например, двухуровневую, где первый уровень образуется совокупностью логистических накопительно-распределительных центров (НРЛЦ) с привязанными к ним центрами производства/потребления (ЦП); а второй уровень – транспортными логистическими центрами (ТЛЦ) на опорных станциях (ОС), связанными с грузополучателями и грузоотправителями автотранспортом (рисунок 4).

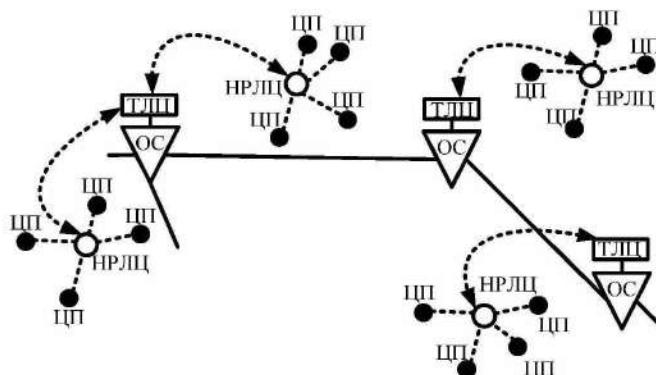


Рисунок 4 – Модель ТЛС для доставки местных грузов

Управление процессами перевозок

Согласно предложенной модели ТЛС опорные станции по своему расположению должны выполнять функции основных элементов системы перевозок местных грузов, определяя эффективность, качество и надежность доставки местного груза. Таким образом, на следующем шаге необходимо сосредоточиться на разработке алгоритма назначения ОС. Практика показывает, что удобно предложить итерационный алгоритм назначения ОС при заданном расположении ЦП и известных коэффициентах производственных весов (объемах, отправляемых-получаемых ЦП местных грузов) на заданной топологии ТЛС, который состоит из трех этапов.

Исходными данными для работы алгоритма служат множество объектов ЦП $C = \{c_1, \dots, c_n\}$, их производственные веса $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ и допустимое множество НРЛЦ $B = \{b_1, \dots, b_p\}$, где каждый j -й ЦП и каждый НРЛЦ заданы в G -мерном пространстве R^G , т. е. $c_j = (c_{j1}, \dots, c_{jG})$ и $b_r = (b_{r1}, \dots, b_{rG})$.

На первом этапе итераций методом k -средних кластерного анализа по известным точкам расположения ЦП находится разбиение $S^* = \{S_1^*, \dots, S_k^*\}$ множества C на k -е районы тяготения ЦП с несмещеными центрами – НРЛЦ, где $D^* \subseteq B$, $B = \{D^*, C\}$, и определяются возможные места расположения НРЛЦ.

На втором этапе методом экспертного оценивания формируются первичные оценки назначения ОС по шести группам критериев: 1) расположение станции на сети железнодорожных линий; 2) наличие рациональных связей станции с автодорожной сетью; 3) характер и объем работы станции; 4) путевое развитие станции; 5) наличие на станции существующих и создаваемых грузовых дворов и/или терминалов; 6) близость станции к существующим и (или) создаваемым ТЛЦ.

На третьем этапе итераций методом одиночной связи определяются ближайшие расстояния между ТЛЦ, взаимодействующими с предварительно назначенными ОС, и НРЛЦ на заданной топологии ТЛС.

Критерием завершения итераций выступает величина совокупных затрат на перевозку местных грузов и развитие объектов инфраструктуры в районах тяготения ОС. Учет степени близости ОС к ЦП гарантирует минимизацию расстояний перевозок, а учет производственных весов ЦП оптимизирует затраты на развитие НРЛЦ и ТЛЦ.

Полученные результаты назначения ОС по предлагаемым группам критериев, их сравнение с результатами использования единственного критерия «погрузка-выгрузка» показаны на рисунке 5.

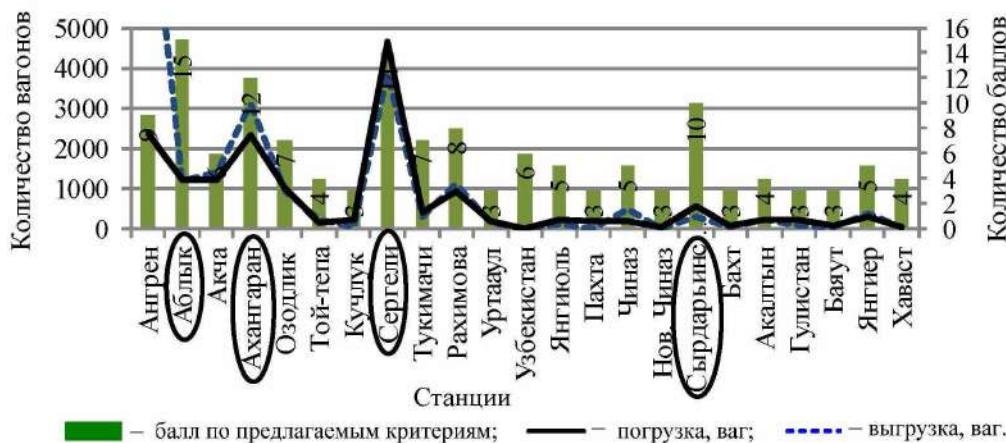


Рисунок 5 – Результаты назначения ОС по предлагаемым критериям (совпадение с ОС, определенной по критерию погрузки-выгрузки, только по ст. Сергели)

Дальнейший поиск рациональных вариантов развития линии при назначенных ОС может быть осуществлен на замкнутом направленном графе (рисунок 6).

Управление процессами перевозок

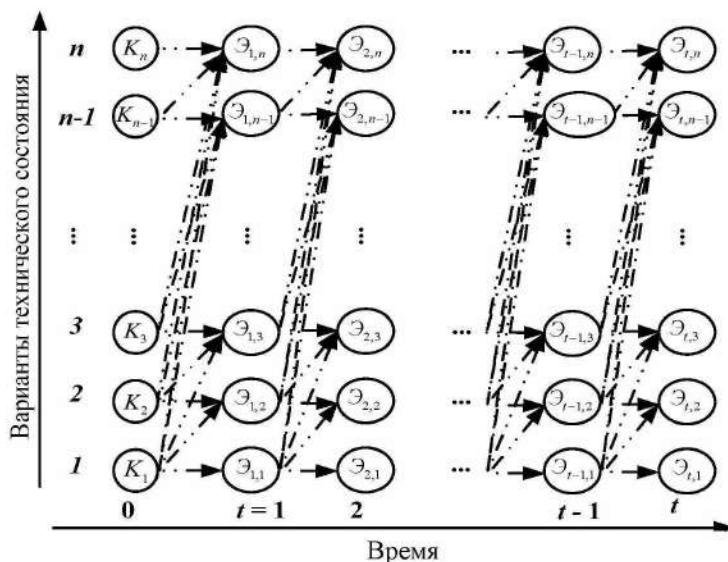


Рисунок 6 – Граф поиска рационального значения расчетной пропускной способности

В рамках графа определяются условно-рациональные значения расчетной пропускной способности S_j участка на шаге t по уравнениям системы (2) согласно целевой функции

$$\mathcal{E}_{t,j} = \min(\mathcal{E}_{t-1,j} + \Delta\mathcal{E}_{t,j}(S_i^j)), \quad (3)$$

где $\mathcal{E}_{t,j}$ – минимальные годовые строительно-эксплуатационные затраты для достижения в году t значения S_j ; $\mathcal{E}_{t-1,j}$ – то же для предыдущего года $t-1$ (значение S_i); $\Delta\mathcal{E}_{t,j}(S_i^j)$ – приращение затрат при переходе от значения S_i к S_j :

$$\Delta\mathcal{E}_{t,j}(S_i^j) = K_{i \rightarrow j}\alpha_t - C_{t,i}\alpha_t, \quad (4)$$

где $K_{i \rightarrow j}$ – капитальные затраты для перехода от i -го к j -му значению пропускной способности; $C_{t,i}$ – эксплуатационные расходы для i -го значения пропускной способности; α_t – коэффициент дисконтирования затрат.

В соответствии с уравнением (3) для каждого значения расчетной пропускной способности (варианта технического состояния) линии на каждом шаге t в рамках приведенного на рисунке 6 графа существует единственный переход, который дает минимизацию (3). Эти значения и предлагаются использовать в качестве базовых для построения расчетной схемы этапного развития линии.

Для оценки плановой схемы требуется определение уровня плановой пропускной способности участков, для чего необходимо сформировать модель организации перевозок на линии, включающей в себя эти участки.

Методы формирования плановой схемы этапного развития линии. Плановая схема этапного развития линии строится на базе расчетной схемы с учетом влияния модели организации перевозок. В основе такой модели лежит планируемая перевозочная мощность линии, которая зависит от числа пропускаемых поездов и их характеристик.

Важнейшей характеристикой грузового поезда является его масса. Для расчета средневзвешенной массы брутто ускоренных поездов с местным грузом, проследовавших по участку в грузовом направлении за расчетный период, целесообразно использовать формулу

Управление процессами перевозок

$$Q_{\text{бр}}^{\text{опт}} = \sqrt{\frac{\Gamma_{\text{уек}} L e_{\text{бр}} \left(\frac{1}{v_{\text{уек}}} + \frac{T_{\text{ст}}}{L_{\text{тех}}} \right)}{\alpha \left(\frac{e_{\text{нр}}^{v_{\text{уек}}} c}{q_{\text{бр}}} + \frac{c_{\text{тр}} e_{\text{тр}} \alpha}{q_{\text{и}}} \right)}}, \quad (5)$$

где $\Gamma_{\text{уек}}$ – грузопоток местных грузов в сутки (в одном направлении), т; L – общее расстояние пробега грузового поезда, км; $e_{\text{бр}}$ – стоимость одного часа работы локомотивных бригад; $v_{\text{уек}}$ – ходовая скорость движения грузового поезда с местным грузом, км/ч; $T_{\text{ст}}$ – время работы бригады в пунктах оборота, ч; $L_{\text{тех}}$ – длина тягового плеча, км; α – отношение веса состава нетто к весу брутто; $e_{\text{нр}}^{v_{\text{уек}}}$ – расходы, приходящиеся на один вагоночас простоя вагонов с местными грузами; c – параметр накопления; $q_{\text{бр}}$ – вес одного вагона брутто, т; $c_{\text{тр}}$ – параметр, характеризующий процесс накопления груза в грузовом терминале; $e_{\text{тр}}$ – расходы, приходящиеся на один час нахождения в грузовом терминале грузов в количестве, равном грузоподъемности вагона; $q_{\text{и}}$ – средний вес одного вагона, т.

Ходовую скорость движения поездов с местным грузом для параллельности графика движения в транзитном коридоре удобно задавать соответственно ходовым скоростям грузовых поездов, осуществляющих транзитные перевозки. Маршрутную скорость поездов с местным грузом из-за относительно коротких расстояний перевозок удобно определять в соответствии с расчетным сроком доставки $T_{\text{дос}}^{\text{жд}}$:

$$T_{\text{дос}}^{\text{жд}} = \frac{L}{v_{\text{уч}}} + \sum t_{\text{опор}} + \sum t_{\text{тех}}, \quad (6)$$

где L – расстояние между ОС отправления и назначения; $v_{\text{уч}}$ – участковая скорость местного поезда; $t_{\text{опор}}$ – время, затрачиваемое на ОС на отцепку и прицепку в пути следования; $t_{\text{тех}}$ – время, затрачиваемое на технические операции на технических станциях в пути следования.

Для нахождения $t_{\text{опор}}$ можно предложить использовать зависимости, полученные на основе исследования технологии работы участков (рисунок 7).

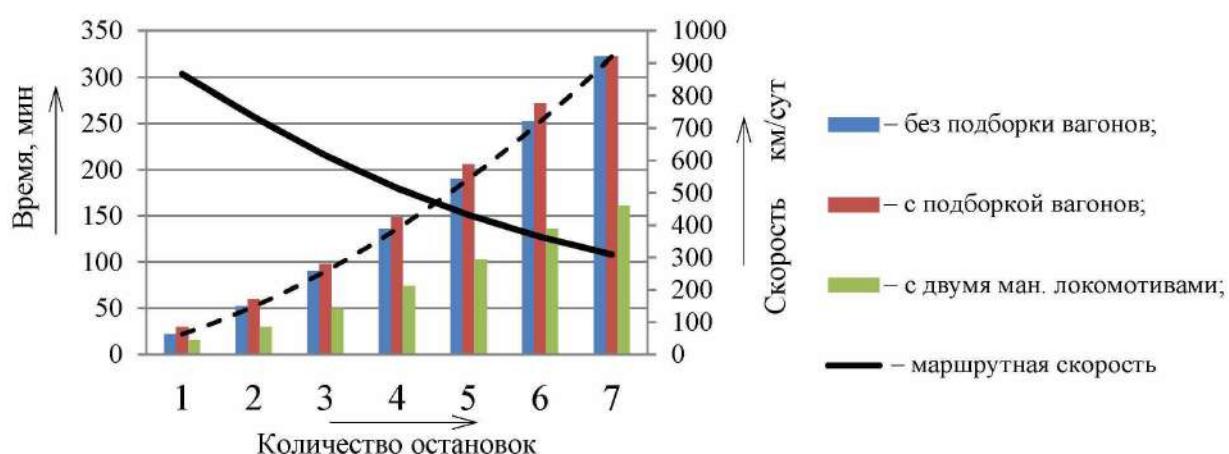


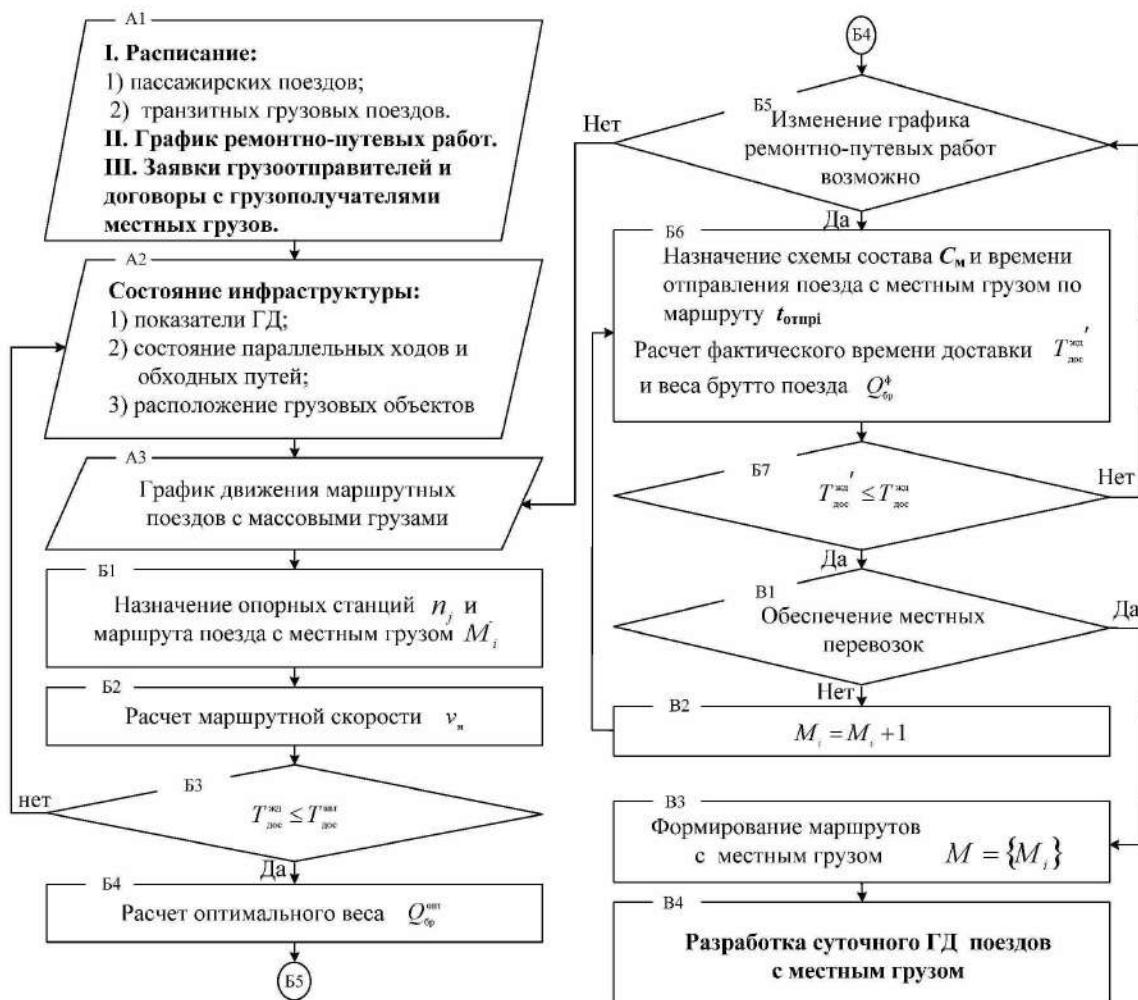
Рисунок 7 – Время, затрачиваемое на ОС

Опыт показывает, что если имеются данные о движении пассажирских, транзитных грузовых поездов и местных маршрутов с массовыми грузами, графики ремонтно-путевых работ, заявки и договоры на перевозку местных грузов и данные о состоянии инфраструктуры, а также расчетная схема этапного развития линии, приведенных положений достаточно для

Управление процессами перевозок

формирования модели организации местных перевозок. В качестве такой модели обычно выступает график движения (ГД) поездов. Исходя из особенностей перевозок местных грузов и в условиях растущей автоматизации и цифровизации управления движением на железных дорогах составлять ГД поездов с местным грузом целесообразно на сутки.

Можно предложить алгоритм (рисунок 8) составления вариантов суточного ГД поездов с местным грузом, реализуемый на основе заранее разработанных вариантов движения по параллельным ходам (или при их отсутствии) на рассматриваемом направлении в условиях предоставления «окон».



Предложенный алгоритм предназначен для формирования суточной модели организации местных перевозок с учетом взаимной увязки регулярных транзитных маршрутов и нерегулярных маршрутов с местным грузом на основе относительно гибких графиков ремонтно-путевых работ, гибких весовых норм, гибких схем опорных станций и жестких сроков доставки.

Совмещение условий расчетной схемы этапного развития линии и рамок суточных моделей организации местных перевозок позволяет оценить плановую и потребную пропускные способности линии и дать окончательную оценку рациональности предлагаемого этапного развития при введении ускоренных грузовых перевозок.

Управление процессами перевозок

Повышение эффективности железнодорожных перевозок местных грузов в условиях возрастающего транзитного потока грузовых поездов на узбекских железных дорогах, основанное на гибких алгоритмах назначения и использования опорных станций в рамках схем поэтапного развития железнодорожных линий, ведет к диверсификации рынка грузовых перевозок с привлечением объемов работы с автодорог. Установление нового баланса на перевозочном рынке республики призвано более полно удовлетворить местных потребителей транспортных услуг и будет способствовать развитию транспортной системы Узбекистана. Прежде всего это касается повагонных отправок. Следует отметить, что расчеты, которые необходимо выполнить в рамках представленной парадигмы, сами по себе не являются простыми. Результаты зависят от формулировки условий оптимальности мер по усилению пропускной и провозной способностей. С этим связана задача поиска адекватных способов их получения. Прежде всего это касается методов оценки схем этапного развития линий и мест расположения опорных точек – транспортных узлов системы перевозок местных грузов. Одним из эффектов станет сокращение ущерба автодорожной сети Узбекистана, не компенсируемого автоперевозчиками при перевозке грузов с превышением установленных норм по массе и осевым нагрузкам автотранспортных средств на основе платных разрешений. Совмещение условий расчетной схемы этапного развития линии позволяет оценить пропускные способности линии и дать оценку рациональности предлагаемого этапного развития при реализации ускоренных грузовых перевозок.

Список литературы

1. Жаков, В. В. Перспективы развития ускоренных грузовых поездов в условиях современной конкурентной среды / В. В. Жаков, З. В. Филимонова. – Текст : непосредственный // Экономика, менеджмент и сервис: проблемы и перспективы : материалы II всероссийской научно-практической конференции / Российский ун-т транспорта. – Москва, 2020. – С. 59–61.
2. Сатторов, С. Б. Проблемы организации ускоренных грузовых перевозок в условиях увеличения транзитных грузопотоков на железных дорогах Республики Узбекистан / С. Б. Сатторов, А. Г. Котенко. – Текст : непосредственный // Бюллетень результатов научных исследований. – 2019. – № 2. – С. 7–18.
3. Сатторов, С. Б. Исследование влияния скорости ускоренных поездов на пропускную способность / С. Б. Сатторов. – Текст : непосредственный // Логистический аудит транспорта и цепей поставок : материалы международной научно-практической конференции / Тюменский индустриальный ун-т. – Тюмень, 2020. – С. 186–192.
4. Вакуленко, С. П. Новая технология ускоренных грузовых перевозок железнодорожным транспортом / С. П. Вакуленко, А. В. Колин, М. Н. Прокофьев. – Текст : непосредственный // Транспорт Российской Федерации. – 2014. – № 2. – С. 47–49.
5. Гришкова, Д. Ю. Мероприятия по увеличению пропускной способности железнодорожного участка / Д. Ю. Гришкова. – Текст : непосредственный // Фундаментальная и прикладная наука: состояние и тенденция развития : сборник статей международной научно-практической конференции / Международный центр научного партнерства «Новая Наука». – Петрозаводск, 2020. – С. 82–86.
6. Оценка баланса провозной способности полигонов сети железных дорог / А. Ф. Бородин, В. В. Панин, М. А. Агеева [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТ. – 2022. – Т. 81. – № 2. – С. 158–169.
7. Мехедов, М. И. Зависимость участковой скорости от обеспеченности транзитных поездов локомотивами на железнодорожном участке Кошта – Бабаево / М. И. Мехедов, Н. В. Корниенко, А. С. Агадуров. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТ. – 2023. – Т. 82. – № 1. – С. 80–88.
8. Власенский, А. А. Логистика эксплуатационной работы железных дорог на основе полигонной технологии управления тяговыми ресурсами / А. А. Власенский. – Текст :

Управление процессами перевозок

непосредственный // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2022. – № 9. – С. 11–14.

9. Определение пропускной способности полигона железной дороги при различной конфигурации сети / С. П. Вакуленко, Д. Ю. Роменский, К. А. Калинин, М. В. Роменская. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2023. – № 2 (77). – С. 27–33.

10. Калинин, К. А. Подходы к определению пропускной способности полигона при формировании интеллектуальной системы управления движением поездов / К. А. Калинин, М. В. Роменская. – Текст : непосредственный // Интеллектуальные транспортные системы : материалы международной научно-практической конференции / Российский ун-т транспорта. – Москва, 2023. – С. 184–190.

11. Батталова, А. Р. Принципы организации эксплуатационной работы в современных условиях / А. Р. Батталова, Л. В. Емельяненко. – Текст : непосредственный // Молодежная наука в XXI веке: традиции, инновации, векторы развития : материалы международной научно-исследовательской конференции / Оренбургский институт путей сообщения. – Оренбург, 2022. – С. 32–34.

References

1. Zhakov V.V., Filimonova Z.V. [Prospects for the development of accelerated freight trains in a modern competitive environment]. *Ekonomika, menedzhment i servis: problemy i perspektivy : materialy II vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Economics, management and service: problems and prospects: materials of the II All-Russian Scientific and Practical Conference]. Moscow, 2020, pp. 59-61 (In Russian).

2. Sattorov S.B., Kotenko A.G. Problems of organizing accelerated freight traffic in the conditions of increasing transit traffic on the railways of the Republic of Uzbekistan. *Biulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovanii – Bulletin of the results of scientific research*, 2019, no. 2, pp. 7-18 (In Russian).

3. Sattorov S.B. [Study of the influence of the speed of accelerated trains on the capacity]. *Logisticheskii audit transporta i tsepej postavok : materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Logistic audit of transport and supply chains. Materials of the international scientific-practical conference]. Tyumen, 2020, pp. 186-192 (In Russian).

4. Vakulenko S.P., Kolin A.V., Prokofiev M.N. New technology of accelerated freight transportation by rail. *Transport Rossiiskoi Federatsii – Transport of the Russian Federation*, 2014, no. 2, pp. 47-49 (In Russian).

5. Grishkova D.Yu. [Measures to increase the capacity of the railway section]. *Fundamental'naya i prikladnaya nauka: sostoianie i tendentsii razvitiia : sbornik stat'ej mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Fundamental and applied science: state and development trend. Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference]. Petrozavodsk, 2020, pp. 82-86 (In Russian).

6. Borodin A.F., Panin V.V., Ageeva M.A., Sokolov A.Yu., Kirillova S.Yu., Dmitriev E.O., Kravchenko A.A. Assessment of the balance of the carrying capacity of the landfills of the railway network. *Vestnik VNIIZhT – Russian railway science journal*, 2022, vol. 81, no. 2, pp. 158-169 (In Russian).

7. Mekhedov M.I., Kornienko N.V., Adadurov A.S. Dependence of the sectional speed on the provision of transit trains with locomotives on the railway section Koshta – Babaev. *Vestnik VNIIZhT – Russian railway science journal*, 2023, vol. 82, no. 1, pp. 80-88 (In Russian).

8. Vlasensky A.A. Logistics of operational work of railways based on polygon technology for managing traction resources. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyi informatsionnyi sbornik – Transport: science, technology, management. Scientific information collection*, 2022, no. 9, pp 11-14 (In Russian).

9. Vakulenko S.P., Romensky D.Yu., Kalinin K.A., Romenskaya M.V. Determination of the capacity of the railway polygon with different network configurations. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2023, no. 2 (77), pp. 27-33 (In Russian).

10. Kalinin K.A., Romenskaya M.V. [Approaches to determining the throughput capacity of the landfill in the formation of an intelligent train traffic control system] [Intelligent transport systems].

Управление процессами перевозок

Materials of the II International Scientific and Practical Conference]. Moscow, 2023, pp. 184-190 (In Russian).

11. Battalova A.R., Emelianenko L.V. [Principles of organization of operational work in modern conditions]. *Molodezhnaya nauka v XXI veke: traditsii, innovatsii, vektorы razvitiia : materialy mezhdunarodnoi nauchno-issledovatel'skoi konferentsii* [Youth science in the xxI century: traditions, innovations, vectors of development : materials of the international research conference]. Orenburg, 2022, pp. 32-34 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Котенко Алексей Геннадьевич

АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта».

3-я Мытищинская улица, д. 10, г. Москва, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник НЦ «Цифровые модели перевозок и технологии энергосбережения».

Тел.: +7 (911) 964-71-07.

E-mail: kotenko.aleksei@vniiizht.ru

Сатторов Самандар Бахтиёрович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

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

Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Грузо-транспортные системы», ТГТрУ.

Тел.: +998 (99) 073-51-57.

E-mail: sattorovsamandar100@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Котенко, А. Г. К вопросу усиления пропускной способности линии при введении ускоренных грузовых перевозок / А. Г. Котенко, С. Б. Сатторов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 4 (56). – С. 44 – 56.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kotenko Alexey Gennad'evich

Railway Research Institute of JSC Russian Railways.

10, 3rd Mytishchinskaya st., Moscow, the Russian Federation.

Doctor Of Sciences in Engineering, professor, Chief Researcher RC Digital transportation models and energy saving technologies.

Phone: +7 (911) 964-71-07.

E-mail: kotenko.aleksei@vniiizht.ru

Sattorov Samandar Bakhtierovich

Tashkent State Transport University (TSTU).

Temiryo'lchiler st., 1, Tashkent City, the Republic of Uzbekistan.

Ph. D. in Engineering, senior lecturer of the department «Transport cargo system», TSTU.

Phone: +998 (99) 073-51-57.

E-mail: sattorovsamandar100@gmail.com

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kotenko A.G., Sattorov S.B. On the issue of increasing the throughput capacity of the line with the introduction of accelerated freight transportation. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 4 (56), pp. 44-56 (In Russian).

УДК 656.073

М. Х. Расулов, Ш. Ш. Каюмов

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

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ЗАКРЫТИЯ РАЗГРУЗОЧНЫХ ЛЮКОВ ПОЛУВАГОНОВ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ГРУЗОВЫХ ОПЕРАЦИЙ НА ТРАНСПОРТЕ

Аннотация. При выгрузке насыпных грузов из полувагонов на объектах железнодорожного транспорта существуют различные способы их разгрузки через нижние люки с установкой рабочих площадок на разгрузочной эстакаде, что позволяет повысить безопасность разгрузочных работ. Однако специфика работ железнодорожных объектов не всегда позволяет использовать погрузочно-разгрузочные механизмы, что приводит к дополнительным затратам времени под погрузочно-выгрузочными операциями, влекущими к простою вагонов на фронтах грузовых объектов. При рассмотрении в совокупности ряда факторов, оказывающих влияние на простой полувагонов, в статье выделен тот самый человеческий фактор, который не поддается нормированию. И в этой связи единственным выходом устранения негативного влияния на указанную

Управление процессами перевозок

выше причину является облегчение труда работников, закрывающих люки полуваагонов при выполнении погрузочно-разгрузочных работ из железнодорожного подвижного состава. В данном исследовании предлагается устройство для закрытия люков полуваагонов, с помощью которого уменьшается количество работников, участвующих в процессе выгрузки полуваагонов с насыпными грузами. Необходимостью предлагаемого изобретения является разработка эффективного способа разгрузки железнодорожных полуваагонов через нижние люки. Описан механизм действия предлагаемого устройства с указанием каждого элемента ручной барабанной лебедки ЛПО-23, предназначенной для подъема, опускания и удержания грузов при ремонтных и погрузочно-разгрузочных работах. Вычислена минимальная сила, необходимая для поднятия и закрытия люков полуваагонов при выполнении погрузочно-выгрузочных операций, которая отвечает нормам и требованиям Правил безопасности работ для грузчиков при погрузочно-разгрузочных работах.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, грузовые и коммерческие операции, погрузочно-выгрузочные операции, полуваагон, нижние люки, барабанная лебедка, подъем, сила, устройство, механизм.

Marufdjan X. Rasulov, Shoxruh Sh. Kayumov

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

DEVELOPMENT OF A DEVICE FOR EFFECTIVE CLOSING OF UNLOADING HATCHES OF GONDOLA CARS WHEN PERFORMING CARGO OPERATIONS IN TRANSPORT

Abstract. When unloading bulk cargo from gondola cars at railway transport facilities, there are various ways to unload them through the lower hatches with the installation of working platforms on the unloading overpass, which can improve the safety of unloading operations. However, the specific nature of the work of railway facilities does not always allow the use of loading and unloading mechanisms, which leads to additional time spent on loading and unloading operations, leading to downtime of cars at the fronts of cargo facilities. When considering a number of factors that influence the downtime of gondola cars, the article highlights the very human factor that cannot be standardized. And in this regard, the only way to eliminate the negative impact on the above reason is to facilitate the work of workers closing the hatches of gondola cars when performing loading and unloading operations from railway rolling stock. This study proposes a device for closing the hatches of gondola cars, which reduces the number of workers involved in the process of unloading gondola cars with bulk cargo. The need for the proposed invention is the development of an effective method for unloading railway gondola cars through the lower hatches. The mechanism of operation of the proposed device is described, indicating each element of the LPO-23 manual drum winch, designed for lifting, lowering and holding loads during repair and loading and unloading operations. The minimum force required to lift and close the hatches of gondola cars during loading and unloading operations has been calculated, which meets the standards and requirements of the Work Safety Rules for loaders during loading and unloading operations.

Keywords: Railway transport, cargo and commercial operations, loading and unloading operations, gondola car, lower hatches, drum winch, lift, force, device, mechanism.

В нашей стране со стороны правительства уделяется большое внимание человеческой безопасности и его жизни. В своем послании к народу Узбекистана «Стратегия дальнейшего развития Нового Узбекистана» Президент Республики Узбекистан Ш. М. Мирзиёев провозгласил «...высшей ценностью человека». В этой стратегии к 2027 г. предусматривается повышение продолжительности жизни [1].

На простой полуваагонов влияет много причин, одной из которых является немеханизированный способ закрытия люков полуваагонов. Если в совокупности рассмотреть ряд факторов, оказывающих влияние на эту причину, то выделяется тот самый человеческий фактор, который не поддается нормированию. И в этой связи единственным выходом устранения негативного влияния на указанную выше причину является облегчение труда работников, обслуживающих люки полуваагонов при выполнении погрузочно-разгрузочных работ [2].

В связи с этим предлагается устройство, облегчающее обслуживание разгрузочных люков при выгрузке грузов, так как данный вид ручной работы не только очень трудоемкий и травмоопасный, но и неэффективный с точки зрения производительности труда.

Совместная работа грузовых станций и путей необщего пользования ранее рассматривалась с позиций максимальной погрузочно-выгрузочной способности на грузовых фронтах. В современных условиях необходимо учитывать возможности инфраструктуры

Управление процессами перевозок

обрабатывать возрастающие объемы грузо- и вагонопотоков, причем со случайным характером поступления вагонов на станции и обработки их на грузовых пунктах [3].

С учетом начального этапа организации грузовых работ железных дорог актуальным становится вопрос совершенствования технологии транспортных процессов при взаимодействии промышленных предприятий со станциями примыканий. Для решения этой задачи необходимо наличие эффективной научно-методической базы оптимизационной организации обслуживания путей необщего пользования.

Проблемы взаимодействия станций примыкания и путей необщего пользования в концепции корректировки критерия выбора для оптимальной очередности обслуживания грузовых объектов и разработка алгоритма выбора оптимальной очередности обслуживания путей необщего пользования описаны в исследовании Гарлицкого Е. И.

Решению проблем повышения уровня организации взаимодействия производства и транспортно-технологических систем железнодорожного транспорта, являющихся элементами транспортно-логистической системы, посвящены исследования Рахмангулова А. Н., Багиновой Н. Н.

Исследованию оптимизации технологических процессов при маневровой работе на промышленных подъездных путях предприятий посвящены труды Адиловой Н.Д., Апатцева В. И., Ермаковой А. В., Суслова О. А., Турсунбаевой Н. К.

Моделированию грузовой работы станции с путями необщего пользования посвящены исследования [4]. Методам имитационного моделирования с целью повышения устойчивости взаимодействия транспортной и производственной подсистем промышленного предприятия после выявления «узких мест» посвящено исследование [5]. Кроме того, разработанная имитационная модель направлена на совершенствование транспортной инфраструктуры металлургического комбината. Еще одним исследованием в области инфраструктурного развития промышленного предприятия можно признать фундаментальные труды Числова О. Н., который определил эффективность размещения транспортно-технологических устройств в узле с учетом влияющих значимых факторов на основе критерия оценки («вес» объекта). Рациональному размещению промышленных предприятий посвящена работа [6].

Большое внимание в области погрузочно-разгрузочных работ при оптимизации процессов грузопереработки на промышленных предприятиях уделяется в работах зарубежных авторов Uwe Clausen, Maike Rotmann [7], Xuefei Li, Maoxiang Lang [8].

Анализ отечественных и зарубежных исследований технологий транспортных процессов при взаимодействии промышленных предприятий и железнодорожного транспорта показал, что теоретические и практические аспекты совершенствования технологии транспортных процессов организации станционных и грузовых работ железных дорог изучены недостаточно полно. В связи с этим вопросы взаимодействия магистрального и промышленного транспорта при оптимизации маневровой работы подъездных путей промышленных предприятий обуславливает практическую и теоретическую актуальность темы исследования.

Известен способ разгрузки железнодорожных полуwagonов через нижние люки, при котором открывают и закрывают запорные устройства крышек люков специальными инструментами – баграми, кувалдой или легким ломиком массой до 5 кг [9]. Недостатком такого способа являются низкий уровень безопасности при выполнении разгрузочных работ, а также изломы или изгибы пальцев секторов, возникающие от сильных ударов специальных инструментов [10].

Наиболее близким к предлагаемому техническому решению по исследуемой задаче и достигаемому техническому результату является способ выгрузки смерзшихся и слежавшихся насыпных грузов из железнодорожных полуwagonов, при котором в слое угля, прилегающем к одной из торцевых частей полуwagonа, перпендикулярно длинной его оси образуют разрезную щель на полную высоту слоя угля и используют ударные импульсы для его разрушения при отбойке и разгрузку его под действием собственного веса через открытые люки в днище полуwagonа. Разгрузка осуществляется традиционным способом на

Управление процессами перевозок

разгрузочной эстакаде под действием собственного веса через открытые нижние люки в днище полувагона. Недостатком такого способа является то, что рабочему, осуществляющему разгрузку полувагонов, необходимо, стоя под полувагоном, выбивать баграми, кувалдой или легким ломом сектора и закидки запорных механизмов люков. При таком способе разгрузки соблюдается требуемый уровень безопасности, так как груз может упасть на самого рабочего.

Таким образом, указанное несовершенство известных способов приводит к снижению безопасности разгрузочных работ.

В 2016 г. на кафедре «Промышленный транспорт» Карагандинского государственного технического университета (г. Караганда) выполнена работа по разработке способа разгрузки железнодорожных полувагонов через нижние люки. Технический результат предлагаемого изобретения заключался в повышении эффективности способа разгрузки железнодорожных полувагонов через нижние люки путем установки рабочих площадок для обеспечения безопасности разгрузочных работ. Этот технический результат достигнут тем, что в рассмотренный способ разгрузки железнодорожных полувагонов через нижние люки внесены следующие изменения: на разгрузочную эстакаду установлены рабочие площадки, с которых осуществляется открытие секторов и закидок запорных механизмов нижних люков железнодорожных полувагонов. Это послужило причиной начала исследования для промышленных объектов в местных условиях Узбекистана. И в ходе проведенного исследования нами предложено приспособление (устройство), изображенное на рисунке 1, которое относится к разгрузке транспортных средств, в частности, железнодорожных полувагонов, имеющих в полу кузова люки для разгрузки сыпучих грузов.

Составные элементы предложенного устройства приведены на рисунке 2. Устройство представляет собой ручную барабанную лебедку ЛПО-23, предназначенную для подъема, опускания и удержания грузов при ремонтных и погрузочно-разгрузочных работах при режиме работы не выше группы режима 1М по ГОСТ 25835-83.



Рисунок 1 – Внешний вид устройства
для поднятия люков полувагонов

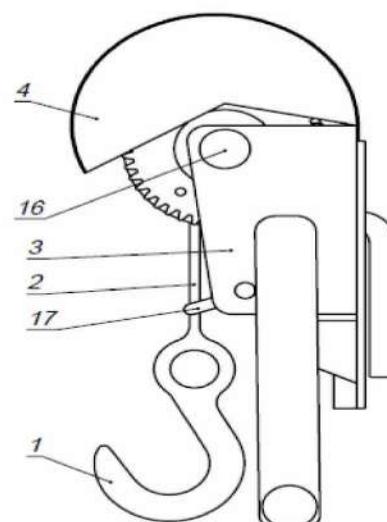


Рисунок 2 – Составные элементы
лебедки ЛПО-23

Действие барабанной лебедки, представленной на рисунках 2 и 3, таково, что при помощи рукоятки (8) приводится в движение вал-шестерня (12). Шестерня находится в сцеплении с большим зубчатым колесом (15), а оно в свое время приводит в движение барабан (14) с тросом (2) и с грузовым крюком (1). При вращении рукоятки (8) барабана (14) с тросом по часовой стрелке приходит в движение прикрепленный к тросу грузовой крюк (1),

Управление процессами перевозок

соединенный с грузом, поднимая его до установленной высоты. Самопроизвольное вращение барабана (14) и рукоятки (8) против часовой стрелки предотвращается фиксатором (17).

Удобство таких лебедок состоит в том, что ручные барабанные лебедки ЛПО-23 могут эксплуатироваться как в закрытом помещении, так и на открытом воздухе. При этом лебедка должна крепиться на соответствующее приспособление, способное выдержать поднимаемый груз и вес лебедки.

Далее, чтобы найти усилие P_0 , которое необходимо приложить для осуществления равномерного подъема люка, рассмотрим систему, состоящую из четырех блоков предлагаемого устройства (рисунок 4).

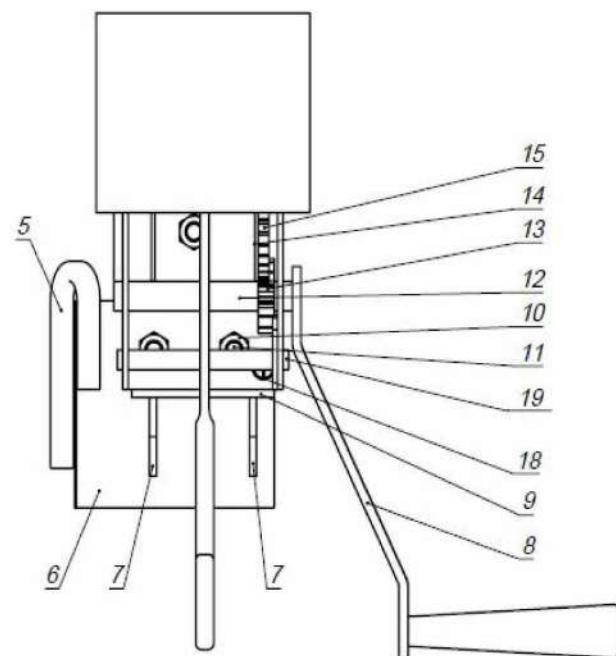


Рисунок 3 – Составные элементы лебедки ЛПО-23

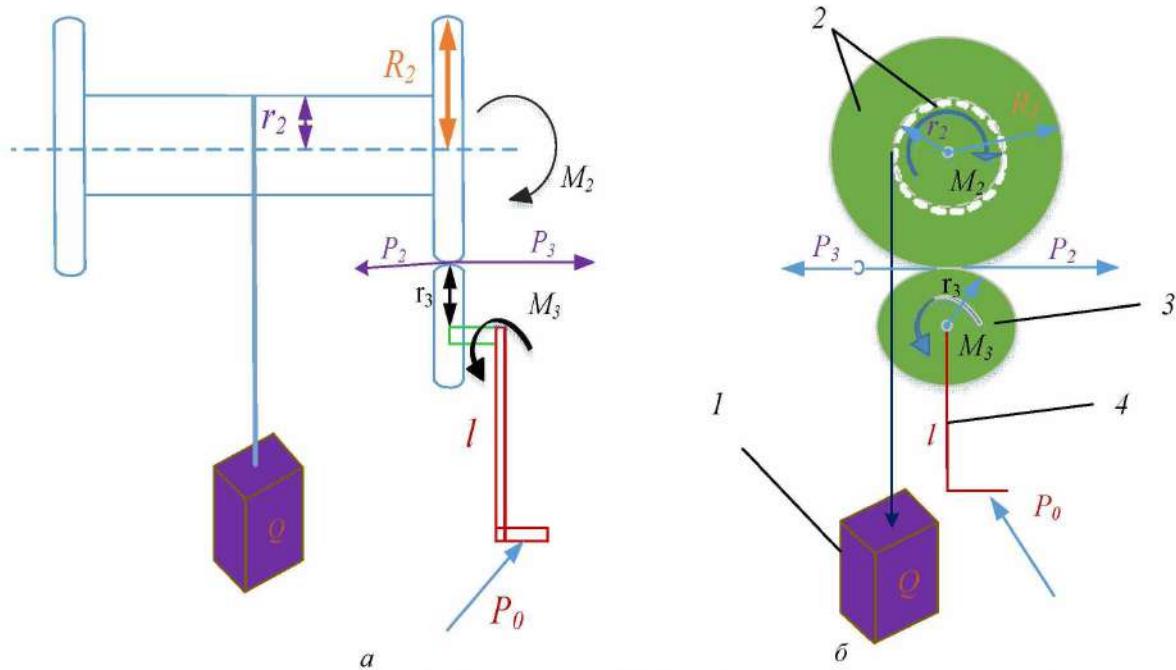
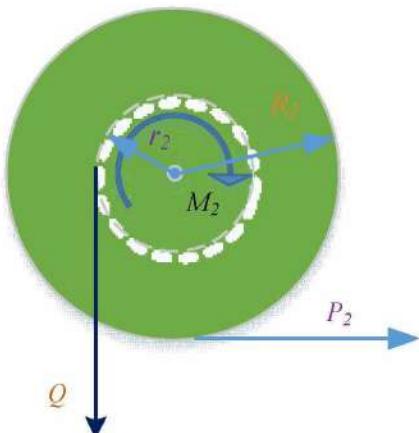


Рисунок 4 – Фронтальный (а) и профильный (б) вид блоков предлагаемого устройства

В этой системе груз приводит в движение блок 2, который в свою очередь с помощью механизма из прямозубых колес с передаточным отношением 3:1 приводит в движение блок 3.

С целью дальнейшего расчета силы, необходимой для поднятия люков полувагонов, рассмотрим рисунок 5.

Управление процессами перевозок



Если известна масса груза (200 кг), то математическим выражением является момент передачи в кручении M_2 (см. рисунок 5), который можно найти по уравнению

$$M_2 = r_2 \cdot Q, \quad (1)$$

где r_2 – радиус большого вала шестерни;
 Q – масса груза.

Так как силы между двумя блоками одинаковы, то можно выразить M_2 как:

$$M_2 = R_2 \cdot P_2, \quad (2)$$

Рисунок 5 – Вид второго блока

где R_2 – радиус большого зубчатого колеса.

Приравняв формулы (1) и (2) друг к другу, можно найти силу P_2 :

$$P_2 = \frac{r_2 \cdot Q}{R_2}. \quad (3)$$

Силы между двумя валами равны: $P_2 = P_3$, отсюда находим крутящий момент M_3 :

$$M_3 = P_3 \cdot r_3. \quad (4)$$

С помощью рычага l и силы P_0 производится крутящий момент M_3 :

$$M_3 = l \cdot P_0, \quad (5)$$

где l – длина рычага.

Тогда сила P_0 будет такова:

$$P_0 = \frac{r_2 \cdot r_3 \cdot Q}{R_2 \cdot l}. \quad (6)$$

Исходя из формул (1) – (6), зная каждый параметр, можем определить силу:

$$P_0 = \frac{0,01 \cdot 0,015 \cdot 2000}{0,03 \cdot 0,2} = 50 \text{ Н.}$$

Таким образом, предлагаемое устройство для закрытия люков полувлагонов облегчает труд работников, занятых на погрузочно-выгрузочных операциях на грузовых объектах железнодорожного транспорта, благодаря легкости и мобильности его использования при различных режимах работы, где невозможно использование погрузочно-выгрузочных механизмов, применяемых при стационарном режиме работы. Рассчитанная сила, необходимая для закрытия люков полувлагонов при погрузочно-разгрузочных работах с помощью предлагаемого устройства, составляет 50 Н, что свидетельствует об уменьшении нагрузки при подъеме тяжелых люков полувлагонов работниками в пять раз.

Список литературы

1. Указ Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 г. «О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022 – 2026 годы» № УП-60 // lex.uz : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://lex.uz/docs/5841077> (дата обращения: 01.12.2023).
2. Каюмов, Ш. Ш. Эффективная схема работы закрытия люков железнодорожных полувлагонов при погрузочно-разгрузочных работах / Ш. Ш. Каюмов – Текст : непосредственный // Формирование интеллектуального капитала в условиях цифровой трансформации: опыт, вызовы, перспективы : труды международной научно-практической онлайн-конференции / Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова. – Караганда, 2022. – Ч. I. – С. 315–317.

Управление процессами перевозок

3. Abdazimov Sh.Kh., Bashirova A.M., Ibragimova G.R. Kayumov Sh.Sh. To the question of improving the operating work of the load station in interaction with the access way of JSC «Uzbek steel works», *Scientific and Technical Journal of Namangan Institute of Engineering and Technology*, Issue 2, 2021, pp. 170-177.

4. Псеровская, Е. Д. Моделирование грузовой работы станции во взаимодействии с путями необщего пользования / Е. Д. Псеровская, И. Н. Кагадий. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2016. – № 1 (25). – С. 91–96.

5. Окулов, Н. Е. Методы и способы совершенствования взаимодействия производства и транспорта : специальность 05.22.08 «Управление процессами перевозок» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Окулов Николай Евгеньевич ; Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург, 2014. – 117 с. – Текст : непосредственный.

6. Правдин, Н. В. О рациональном размещении промышленных предприятий и транспортно-складских систем в узлах / Н. В. Правдин, О. Н. Числов. – Текст : непосредственный // Вестник РГУПС. – 2009. – № 1 (33). – С. 91–101.

7. Clausen, Uwe & Rotmann, Maike. (2014). Measurement and Optimization of Delivery Performance in Industrial Railway Systems. 10.1007/978-3-319-01378-7_8.

8. Li, Xuefei & Lang, Maoxiang. (2010). A Fuzzy Comprehensive Evaluation Model for the Optimization and Integration of the Industrial Railway Sidings. 10.1109/ICIII.2010.378.

9. Патент № 2728155 Российской Федерации, B61D 7/30. Способ закрытия люков железнодорожных полувагонов и устройство для его осуществления: № 2728155: опубликовано 28.07.2020 / Куницкий М. М. – 3 с. – Текст : непосредственный.

10. Патент № 8227 Республика Казахстан, 2022/1100.2. Способ закрытия нижних люков железнодорожных полувагонов : № 8227 : опубликовано 13.12.2022 / Балабаев О. Т., Расулов М. Х., Суюнбаев Ш. М., Каюмов Ш. Ш., Ибрагимова Г. Р., Хусенов У. У., Мухтаров А. Р. – 3 с. – Текст : непосредственный.

References

1. *Ukaz Prezidenta Respubliki Uzbekistan ot 28 ianvaria 2022 g. «O Strategii razvitiia Novogo Uzbekistana na 2022 – 2026 gody» № UP-60* [Decree of the President of the Republic of Uzbekistan dated January 28, 2022 «On the Development Strategy of New Uzbekistan for 2022-2026» no. UP-60]. Available at: <https://lex.uz/docs/5841077> (accessed 01.12.2023).

2. Kayumov Sh.Sh. [Efficient operation scheme for closing hatches of railway gondola cars during loading and unloading operations]. *Formirovanie intellektual'nogo kapitala v usloviakh tsifrovoi transformatsii: opyt, vyzovy, perspektivy : trudy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi onlain-konferentsii* [Formation of intellectual capital in the context of digital transformation: experience, challenges, prospects : proceedings of the international scientific and practical online conference]. Karaganda, 2022, pp. 315-317 (In Russian).

3. Abdazimov Sh.Kh., Bashirova A.M., Ibragimova G.R. Kayumov Sh.Sh. To the question of improving the operating work of the load station in interaction with the access way of JSC «Uzbek steel works», *Scientific and Technical Journal of Namangan Institute of Engineering and Technology*, Issue 2, 2021, pp. 170-177.

4. Pserovskaya E.D., Kagadiy I.N. Modeling of cargo operation of the station in interaction with non-public routes. *Izvestiya Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2016, no. 1 (25), pp. 91-96 (In Russian).

5. Okulov N.E. *Metody i sposoby sovershenstvovaniya vzaimodeystviya proizvodstva i transporta* (Methods and means of improving the interaction between production and transport). Doctor's thesis, Yekaterinburg, USURT, 2014, 117 p. (In Russian).

6. Pravdin N.V., Chislov O.N. On the rational placement of industrial enterprises and transport and storage systems in nodes. *Vestnik RGUPS – Bulletin of the Rostov State University of Railway Engineering*, 2009, no. 1 (33), pp. 91-101 (In Russian).

7. Clausen, Uwe & Rotmann, Maike. (2014). Measurement and Optimization of Delivery Performance in Industrial Railway Systems. 10.1007/978-3-319-01378-7_8.

8. Li, Xuefei & Lang, Maoxiang. (2010). A Fuzzy Comprehensive Evaluation Model for the Optimization and Integration of the Industrial Railway Sidings. 10.1109/ICIII.2010.378.

9. Kunitsky M.M. Patent RU № 2728155, 28.07.2020.

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

10. Balabaev O.T., Rasulov M.Kh., Suiunbaev Sh.M., Kaiumov Sh.Sh., Ibragimova G.R., Khusenov U.U., Mukhtarov A.R. Patent KZ № 8227, 13.12.2022.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Расулов Маруфджан Халикович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

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

Кандидат технических наук, профессор, декан факультета «Управление транспортными системами», ТГТрУ.

Тел.: +99871-299-00-10.

E-mail: marufdzhhan.rasulov@bk.ru

Каюмов Шохрух Шароф угли

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

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

Докторант (Ph. D.) кафедры «Управление эксплуатационной работой железной дороги», ТГТрУ.

Тел.: +99890-979-86-70.

E-mail: k.shohrukh@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Расулов, М. Х. Разработка устройства для эффективного закрытия разгрузочных люков полувагонов при выполнении грузовых операций на транспорте / М. Х. Расулов, Ш. Ш. Каюмов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 4 (56). – С. 56 – 63.

УДК 625.144.5, 62-971

А. С. Ильиных, В. И. Кочергин, М. С. Галай

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА РЕЛЬСОВОЙ ПЛЕТИ ПРИ ВВОДЕ В ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ

Аннотация. При закреплении рельсовых плетей бесстыкового пути на постоянный режим работы необходимо соблюдение требуемых температурных интервалов, при этом в настоящее время отсутствуют универсальные технологии и мобильное оборудование по вводу рельсовых плетей в требуемый температурный режим. Целью данной работы является математическое моделирование методом конечных элементов процесса нагрева рельса для определения необходимой максимальной мощности нагревательного устройства при заданной скорости движения путеукладочного оборудования. В данной статье представлены результаты численного решения дифференциального уравнения теплопроводности на основе конечно-элементных методов с использованием ряда необходимых ограничений. Выполнена оценка совместного влияния мощности и размера участка приложения источника тепла для обеспечения параметров нагрева рельсовой плети в заданном диапазоне температур и выполнено моделирование распределения температур по длине рельса. Установлено, что значения продольного размера ячейки и шага дискретизации по времени слабо влияют на распределение температуры поверхности рельса. Исследованы три варианта длины приложения равномерного теплового потока. При выбранных значениях длины приложения теплового потока 0,5 и 1 м и скорости перемещения нагревателя 0,3 м/с во всех случаях наблюдается недостаточный нагрев поверхности рельса до заданного диапазона температур. Для обеспечения требуемых параметров нагрева рельсовой плети оптимальной является длина нагревательного устройства, равная 3 м. Определена ориентировочная величина потребной

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Rasulov Marufdjan Xalikovich

Tashkent State Transport University (TSTU).

1, Temiryulchilar st., Tashkent, 100060, Republic of Uzbekistan.

Ph. D. in Engineering, professor, dean of the faculty «Management of Transport Systems», TSTU.

Phone: +99871-299-00-10.

E-mail: marufdzhhan.rasulov@bk.ru

Kayumov Shokhrukh Sharof oglı

Tashkent State Transport University (TSTU).

1, Temiryulchilar st., Tashkent, 100060, Republic of Uzbekistan.

Doctoral student (Ph. D.) of the department «Railway Operations Management», TSTU.

Phone: +99890-979-86-70.

E-mail: k.shohrukh@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Rasulov M.X., Kayumov Sh.Sh. Development of a device for effective closing of unloading hatches of gondola cars when performing cargo operations in transport. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 4 (56), pp. 56-63 (In Russian).

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

общей мощности источников тепла. Результатом выполненных исследований является перспектива разработки модуля для нагрева рельсовых плетей, входящего в комплекс путевых машин для замены рельсовых плетей с вводом их в оптимальный температурный интервал и последующим закреплением.

Ключевые слова: бесстыковой путь, рельсовая плеть, ввод в температурный режим, нагрев, конечно-элементные методы моделирования.

Andrey S. Ilinykh, Viktor I. Kochergin, Marina S. Galaj

Siberian Transport University (STU), Novosibirsk, the Russian Federation

SIMULATION OF RAIL STRING HEATING PROCESS AT INPUT TO TEMPERATURE CONDITIONS

Abstract. When fixing the rails of the jointless track to a constant mode of operation, it is necessary to comply with the required temperature intervals, while at present there are no universal technologies and mobile equipment for putting the rails into the required temperature mode. The purpose of this work is mathematical modeling by the finite elements method of the rail heating process to determine the required maximum power of the heating device at a given speed of movement of track laying equipment. This article presents the results of the numerical solution of the differential equation of thermal conductivity based on finite element methods using a number of necessary restrictions. Estimation of combined effect of power and size of heat source application section is performed to provide parameters of rail string heating in specified temperature range and modeling of temperature distribution along rail length is performed. It has been found that the values of the longitudinal size of the cell and the time sampling step have little effect on the temperature distribution of the rail surface. Three variations of the application length of uniform heat flux have been investigated. At selected values of length of application of heat flow of 0.5 and 1 m and speed of heater movement of 0.3 m/s in all cases insufficient heating of rail surface to specified temperature range is observed. To ensure the required heating parameters of the rail string, the length of the heating device equal to 3 m is optimal. The approximate value of the required total power of the heat sources is determined. The result of the performed studies is the prospect of developing a module for heating rail strings, which is included in a complex of track machines for replacing rail strings with their entry into the optimal temperature range and subsequent fixation.

Keywords: jointless track, rail line, entry into temperature mode, heating, finite element modeling methods.

При устройстве и содержании рельсового пути, в особенности бесстыкового, необходим учет наличия вызванных изменениями температуры значительных сжимающих и растягивающих продольных усилий. Для обеспечения безопасности движения поездов при укладке железнодорожного пути требуется соблюдение установленных соответствующими нормативными документами оптимальных температурных интервалов закрепления рельсовых плетей на постоянный режим работы [1, 2]. Научной и технической проблемой, требующей решения, является отсутствие универсальных технологий по вводу рельсовых плетей в требуемый температурный режим при пониженных и повышенных температурах окружающего воздуха, а также отсутствие соответствующего универсального мобильного оборудования.

Известны примеры технических решений, основанных на индукционном [3] либо на пламенном [4] нагреве рельса, но, как правило, они не соответствуют современным требованиям к комплексной механизации процессов укладки и нагрева рельсовых плетей при монтаже бесстыкового пути. Кроме того, необходимы автоматизация контроля необходимой температуры нагрева при непрерывном движении комплекса путеукладочных и нагревательных путевых машин и оборудования в различных климатических условиях и минимизация воздействия открытого огня на неметаллические элементы промежуточных скреплений. Для решения указанной проблемы в первую очередь требуется определение методами математического моделирования необходимой максимальной мощности нагревательного устройства при заданной скорости движения путеукладочного оборудования $V = 1,1 \text{ км/ч}$.

Распределение температуры при нестационарном режиме нагрева и охлаждения рельса описывается дифференциальным уравнением теплопроводности:

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right),$$

где ρ – плотность; c – теплоемкость; λ – теплопроводность материала; T – температура; τ – текущее время.

Для моделирования и оптимизации различных производственных процессов широко используются конечно-элементные методы моделирования [5]. Применительно к процессам нагрева рельсовой стали решение оптимизационных задач данными методами является достаточно сложным и длительным процессом, но удовлетворительные альтернативные методы поиска оптимальных решений применительно к поставленным задачам настоящего исследования в настоящее время не найдены [6]. В нашем случае численное решение дифференциального уравнения теплопроводности выполнялось на основе конечно-элементных методов с использованием следующих ограничений:

- в начальный момент времени ($\tau = 0$) температура рельса по всему объему равна температуре окружающей среды $T = T_0$;
- на поверхности нагрева задавалось равномерное распределение теплового потока q_0 ;
- на поверхностях, не подверженных нагреву, задавалось условие свободно-конвективного охлаждения $q = \alpha(T - T_0)$, где коэффициент теплоотдачи от поверхности нагрева и окружающей среды $\alpha = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Графическое изображение заданных начальных и граничных условий представлено на рисунке 1. Принятые теплофизические свойства рельсовой стали (Э76) составляют при этом: плотность – $7800 \text{ кг}/\text{м}^3$, теплоемкость – $450 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, теплопроводность – $21 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

При численной реализации решения дифференциальных уравнений важным вопросом является оценка влияния количества элементов разбиения или так называемой сеточной сходимости геометрического тела (продольного размера ячейки Δh) на результат решения задачи. В качестве примера на рисунке 2 показано распределение температуры поверхности рельса (при $y = 101,5 \text{ мм}$) для момента времени $\tau = 30 \text{ с}$ при различных размерах расчетных ячеек в продольном направлении.

Помимо линейного размера расчетной ячейки при решении нестационарных задач важным является также и временной параметр – шаг дискретизации дифференциального уравнения по времени (Δt), за корректный выбор которого отвечает число Куранта. Рекомендуемые значения числа Куранта при заданной скорости движения $V = 0,306 \text{ м}/\text{с}$ требуют уменьшения шага дискретизации, но из приведенных на рисунке 2 данных следует, что значения продольного размера ячейки и шага дискретизации по времени слабо влияют на распределение температуры поверхности рельса. При малых значениях Δh и Δt программное решение задачи занимает достаточно продолжительное время, поэтому в последующих расчетах выбраны значения шага дискретизации по продольному направлению и времени на уровне $\Delta h = 7 \text{ мм}$ и $\Delta t = 0,014 \text{ с}$.

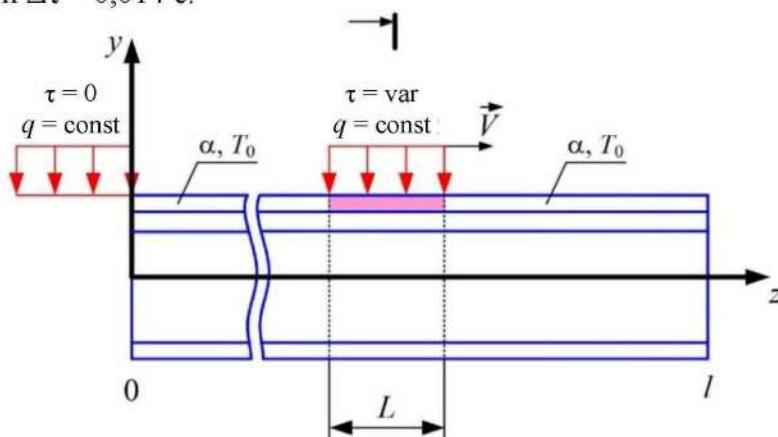


Рисунок 1 – Расчетная схема приложения теплового потока

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Для последующей унификации описания и указания участков (зон) подведения тепловых потоков соответствующим участкам присвоены названия (имена), указанные на рисунке 3. В таблице приведены характеристики соответствующих именованных участков. Начало координат (точка 0) соответствует положению крепления рельсовой пластины, ось z направлена по длине рельса.

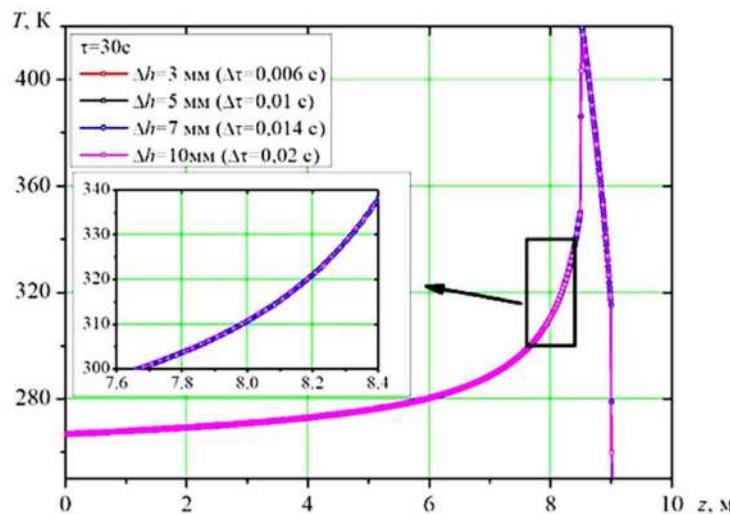


Рисунок 2 – Сеточная сходимость при $V = 0,306 \text{ м/с}$, $T_0 = 253,15 \text{ К}$, $L = 0,3 \text{ м}$, $q_0 = 106 \text{ Вт/м}^2$

Параметры участков поперечного сечения рельса

Точка	Координаты точек		Название участка (зоны)	Участок	Длина участка, мм
	$x, \text{мм}$	$y, \text{мм}$			
A	0,00	101,50	Zone 1	AB	44,43
B	36,50	85,80	Zone 2	BC	21,65
C	35,11	65,30	Zone 3	CD	29,84
D	12,00	50,70	Zone 4	DE	85,25
E	11,74	-34,33	Zone 5	EF	78,73
F	75,00	-70,42	Zone 6	GH	76,14
G	75,00	-76,50	Плоскость симметрии	AH	180,0
H	0,00	-78,50	Zone 1_6	ABCDEFGH	336,04

Таким образом, при описании математической модели нестационарного нагрева рельса варьируемыми параметрами будут являться такие:

- скорость перемещения теплового источника V ;
- значение подводимого теплового потока q ;
- длина зоны приложения теплового потока L .

При численном моделировании теплового воздействия на рельс в процессе движения теплового источника в качестве исходных данных для моделирования нестационарного теплового воздействия на рельс при температуре окружающей среды t_0 минус 30 °C ($T_0 = 243,15 \text{ К}$) выступали следующие параметры:

- материал рельса – сталь Э76 (рельсовая сталь);
- геометрические размеры поперечного сечения рельса Р65 соответствуют ГОСТ Р 51685–2022 «Рельсы железнодорожные. Общие технические условия».

Целью теплового расчета является оценка совместного влияния мощности и размера участка приложения источника тепла для обеспечения параметров нагрева

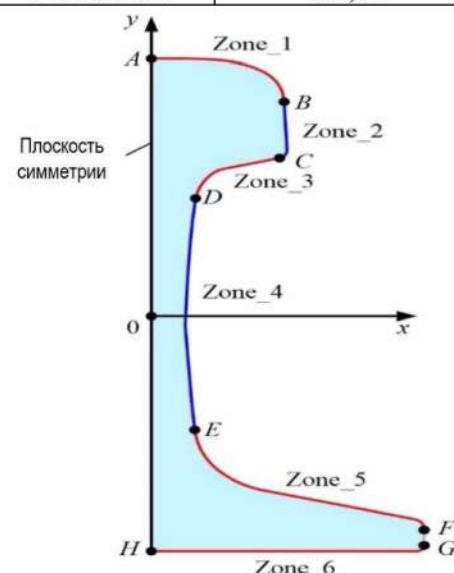


Рисунок 3 – Схема разделения поперечного сечения рельса на участки

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

рельсовой плети в диапазоне температур 30 ± 5 °C ($303,15 \pm 5$ K) на основе моделирования распределения температур по длине рельса.

На рисунке 4 приведены профили температур на поверхности рельса при нестационарном воздействии теплового потока в моменты времени от 5 до 30 с от начала движения нагревателя. Данные получены при значении длины $L = 0,5$ м, при этом тепловой поток подводился ко всем участкам поперечного сечения рельса (Zone_1 – Zone_6). Скорость задавалась на уровне $V = 0,3$ м/с. Данные на рисунке получены при четырех значениях мощности теплового потока: $q = 3 \cdot 10^5$ Вт/м², $q = 4 \cdot 10^5$ Вт/м², $q = 5 \cdot 10^5$ Вт/м², $q = 7 \cdot 10^5$ Вт/м². Тепловой поток движется слева направо. Максимум температуры во всех случаях находится в конце зоны приложения теплового потока. За максимумом температуры наблюдается резкое снижение температуры. При длине приложения теплового потока $L = 0,5$ м и скорости $V = 0,3$ м/с во всех случаях наблюдается существенный недогрев поверхности рельса до заданного диапазона температур.

На рисунке 5 представлены аналогичные рисунку 4 распределения температур, но при длине приложения теплового потока, равной 1 м. При этой длине также наблюдается недогрев рельса, но в последнем случае, при $q = 7 \cdot 10^5$ Вт/м², температура поверхности приближается к максимально допустимой температуре. Следовательно, при увеличении длины участка приложения теплового потока необходимо уменьшать его плотность либо увеличивать скорость движения нагревателя.

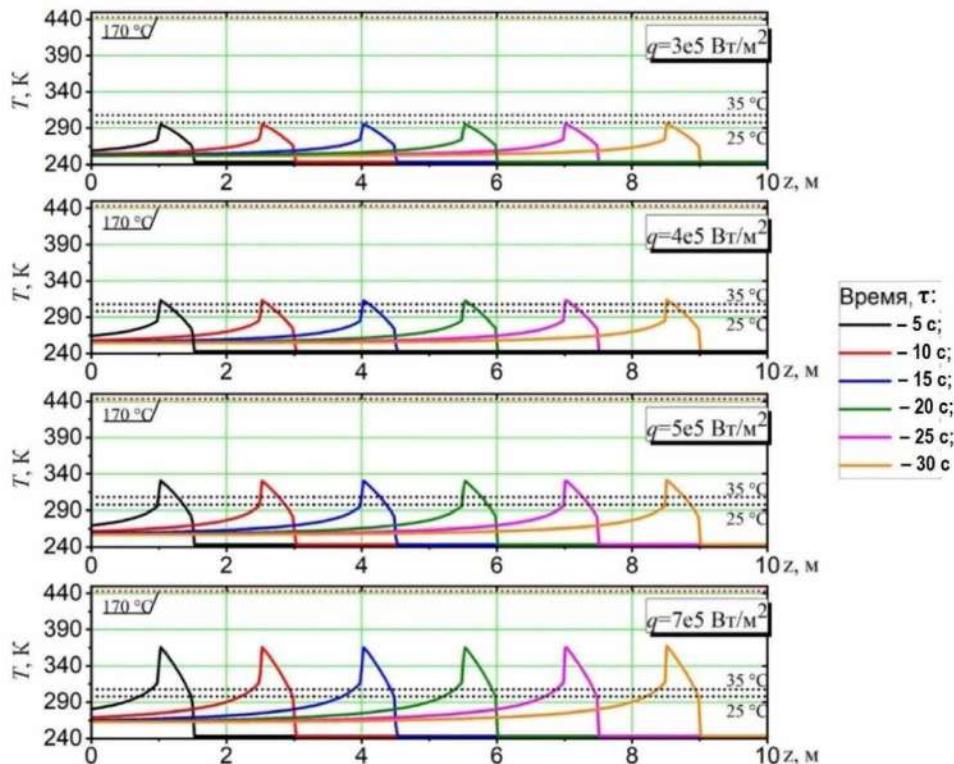


Рисунок 4 – Распределение температуры поверхности рельса от времени
при $V = 0,3$ м/с, $T_0 = 243,15$ К, $L = 0,5$ м

На рисунках 6 и 7 представлены соответственно распределения максимальной, минимальной и средней температуры начального сечения рельса в зависимости от времени. Рассмотрено две длины приложения теплового потока $L = 1$ и 3 м при плотности теплового потока, равной $q = 3 \cdot 10^5$ Вт/м² и скорости движения нагревателя $V = 0,3$ м/с. Величина равномерно распределенного теплового потока $3 \cdot 10^5$ Вт/м² выбрана в качестве оптимального значения исходя из минимизации теплового воздействия на конструкционные материалы рельсового пути, а скорость 0,3 м/с соответствует определенной техническим заданием скорости движения 1,1 км/ч проектируемого перспективного путеукладочного комплекса.

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

При длине нагрева 1 м наблюдается существенный недогрев рельса (см. рисунки 4 – 6). Из этого следует, что использование в большинстве технических средств локального нагрева для ввода рельсовых плетей в требуемый температурный интервал не обеспечивает достижения необходимых результатов, поэтому предлагается использовать нагрев рельсов при длине приложения теплового потока более 1 м. При $L = 3$ м по истечении промежутка времени нагрева 350 с значения средней и минимальной температуры в начальном сечении находятся в диапазоне температур 30 ± 5 °С, при этом максимальное значение температуры выходит из заданного диапазона (см. рисунок 7).

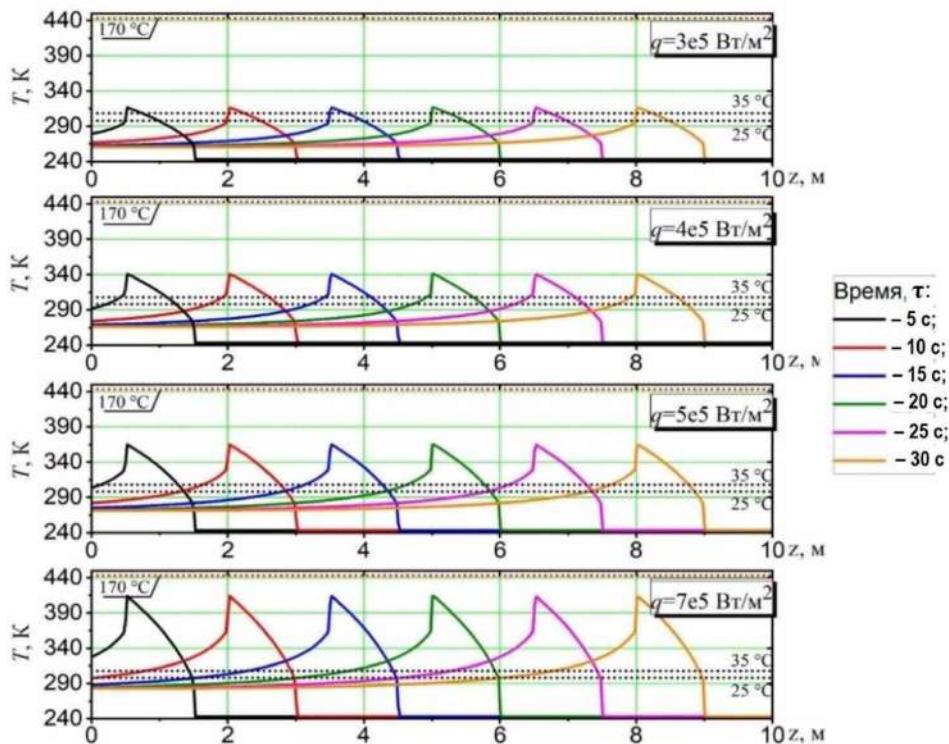


Рисунок 5 – Распределение температуры поверхности рельса от времени
при $V = 0,3$ м/с, $T_0 = 243,15$ К, $L = 1,0$ м

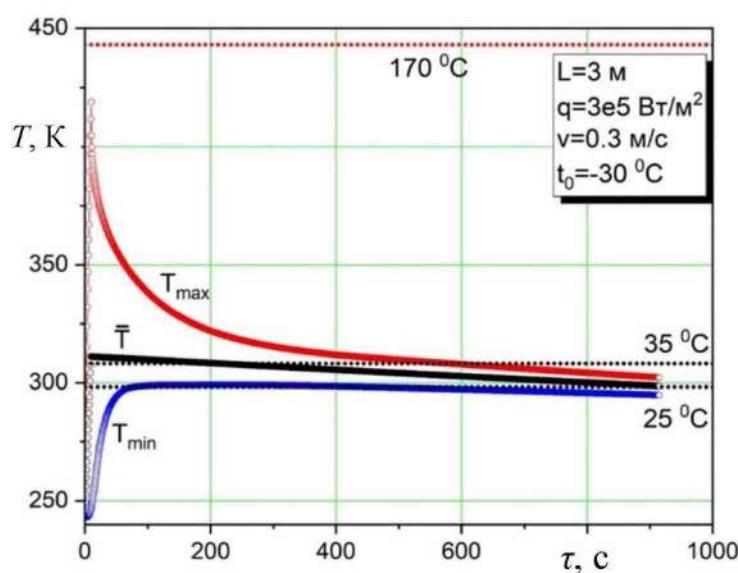


Рисунок 6 – Распределение максимальной, средней и минимальной температуры начального сечения рельса
в зависимости от времени при $L = 1,0$ м

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

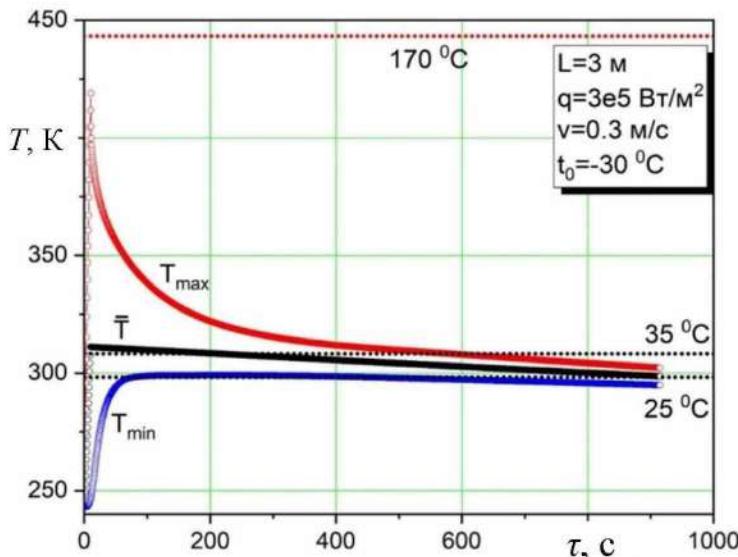


Рисунок 7 – Распределение максимальной, средней и минимальной температуры начального сечения рельса в зависимости от времени при $L = 3,0 \text{ м}$

Таким образом, при заданных значениях максимально низких значений температуры окружающей среды минус 30 °С, скорости движения установленного на путевой машине нагревателя $V = 0,3 \text{ м/с}$ и закреплении рельса на расстоянии от 60 м от нагревательного устройства для поддержания средней температуры рельса в диапазоне $30 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ по прошествии 350 с от момента начала нагрева к рельсу необходимо подводить равномерный тепловой поток по всему периметру рельса с плотностью $q = 3 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$ и длиной приложения теплового потока, равной 3 м. Данные значения ориентировочно соответствуют суммарной мощности нагревательных устройств от 350 до 630 кВт, необходимой для обеспечения технологического процесса ввода рельсовых плетей в требуемый температурный режим. При изменении температуры окружающей среды или скорости движения нагревателя необходимо изменение величины теплового потока и, возможно, длины нагревателя. Результатом выполненных исследований является перспектива разработки модуля для нагрева рельсовых плетей, входящего в комплекс путевых машин для замены рельсовых плетей с вводом их в оптимальный температурный интервал и последующим закреплением. В качестве следующего этапа работы предполагается оптимизация расположения источников тепловой энергии относительно профиля рельсовых плетей на установленной длине приложения теплового потока.

Список литературы

1. Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути: утв. распоряжением ОАО «РЖД» № 2544р от 14.12.2016. – Текст : электронный. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/561035597> (дата обращения: 08.08.2023).
2. О внесении изменений в инструкцию по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути: распоряжение ОАО «РЖД» № 863/р от 10.04.2023 // rzdputi.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: https://rzdputi.ru/wp-content/uploads/2023/05/10.04.2023-n-863_r.pdf (дата обращения: 08.08.2023).
3. Нагрев и термообработка рельс // magnit-m : сайт. – Текст : электронный. – URL: https://magnit-m.ru/nagrev_i_termoobrabotka_rels (дата обращения: 08.08.2023).
4. Установка нагревательная для рельса УНР // zdm.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://zdm.ru/products/zheleznodorozhnaja-tehnika/ystanovka-nagrevatelnaya?yclid=171866763005001727> (дата обращения: 08.08.2023).
5. Оценка напряженно-деформированного состояния рельсов при различных условиях эксплуатации на основе моделирования методом конечных элементов / А. Ю. Абдурашитов,

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Д. В. Овчинников, В. П. Сычев, А. В. Сычева. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 1 (53). – С. 62–73.

6. Моделирование дифференцированной термической обработки железнодорожных рельсов сжатым воздухом / В. Д. Сарычев, С. Г. Молотков, В. Е. Кормышев [и др.]. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2020. – Т. 63. – № 11–12. – С. 907–914.

References

1. *Instrukciya po ustroystvu, ukladke, soderzhaniyu i remontu besstykovogo puti: rasporyazhenie OAO «RZHD» № 2544r*. [Instructions for the construction, laying, maintenance and repair of the jointless track: Order of Russian Railways No. 2544r]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/561035597> (accessed: 08.08.2023).
2. *O vnesenii izmenenij v instrukciyu po ustroystvu, ukladke, soderzhaniyu i remontu besstykovogo puti: rasporyazhenie OAO «RZHD» № 863/r* [On amending the instructions for the construction, laying, maintenance and repair of the jointless track: Order of Russian Railways No. 863/r]. Available at: https://rzdputi.ru/wp-content/uploads/2023/05/10.04.2023-n-863_r.pdf (accessed: 08.08.2023).
3. *Nagrev i termoobrabotka rel's* [Heating and heat treatment of rails]. Available at: https://magnit-m.ru/nagrev_i_termoobrabotka_rels (accessed: 08.08.2023).
4. *Ustanovka nagrevatel'naya dlya rel'sa UNR* [Heating installation for rail UPR]. Available at: <https://zdm.ru/products/zheleznodorozhnaja-tehnika/ystanovka-nagrevatelnaya?yclid=171866763005001727> (accessed: 08.08.2023).
5. Abdurashitov A.Yu., Ovchinnikov D.V., Sychev V.P., Sycheva A.V. Ocenna napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya rel'sov pri razlichnyh usloviyah ekspluatacii na osnove modelirovaniya metodom konechnyh elementov [Estimation of the stress-strain state of rails under various operating conditions based on finite element modeling]. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 1 (53), pp. 62-73 (In Russian).
6. Sarychev V.D., Molotkov S.G., Kormyshev V.E., Nevskij S.A, Polevoj E.V. Simulation of differential thermal treatment of railway rails with compressed air. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaia metallurgiya – Izvestiya. Ferrous metallurgy*, 2020, vol. 63, no. 11-12, pp. 907-914 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ильиных Андрей Степанович

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).
Дуси Ковальчук ул., д. 191, г. Новосибирск, 630049, Российская Федерация.

Доктор технических наук, доцент, декан факультета «Управление транспортно-технологическими комплексами», СГУПС.
Тел.: +7 (383) 328-03-92.
E-mail: asi@stu.ru

Кочергин Виктор Иванович

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).
Дуси Ковальчук ул., д. 191, г. Новосибирск, 630049, Российская Федерация.

Доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин», СГУПС.
Тел.: +7 (383) 328-02-65.
E-mail: vkplus2011@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ilinikh Andrey Stepanovich

Siberian Transport University (STU).

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

Doctor of Sciences in Engineering, Associate Professor, Dean of the Faculty Management of Transport and Technological Complexes, STU.

Phone: +7 (383) 328-03-92.

E-mail: asi@stu.ru

Kochergin Victor Ivanovich

Siberian State Transport University (STU).

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

Doctor of Sciences in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Technology of Transport Mechanical Engineering and Operation of Cars, STU.

Phone: +7 (383) 328-02-65.

E-mail: vkplus2011@yandex.ru

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

Галай Марина Сергеевна

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин», СГУПС.

Тел.: +7 (383) 328-04-36.

E-mail: galayms@mail.ru

Galaj Marina Sergeevna

Siberian State Transport University (STU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department of Technology of Transport Mechanical Engineering and Operation of Cars, STU.

Phone: +7 (383) 328-04-36.

E-mail: galayms@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Ильиных, А. С. Моделирование процесса нагрева рельсовой плети при вводе в температурный режим / А. С. Ильиных, В. И. Kochergin, М. С. Галай. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 4 (56). – С. 63 – 71.

Ilinykh A.S., Kochergin V.I., Galaj M.S. Simulation of rail string heating process at input to temperature conditions. *Journal of Transsib way Studies*, 2023, no. 4 (56), pp. 63-71 (In Russian).

УДК 629.4.07

А. Н. Ларин, И. В. Ларина

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

РАЗВИТИЕ ТРАНСПОРТНЫХ КОРИДОРОВ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Аннотация. Применение транспортных коридоров в современных условиях обусловлено прежде всего минимизацией транспортно-логистических издержек. Помимо снижения издержек транспортные коридоры влияют на развитие региональной инфраструктуры и экономический рост региона в целом. Развитие транспортных коридоров регламентируется нормативными документами и стандартами в области перевозочного процесса, а также в области развития транспортной инфраструктуры в целом. В настоящее время любое развитие транспортных коридоров непосредственно связано не только с развитием транспортной отрасли и транспортной инфраструктуры, но и с внедрением цифровизации всех транспортных процессов и всей транспортной отрасли в целом. Цифровизация транспортных коридоров влечет за собой создание цифровых двойников всех элементов транспортных коридоров – транспорта, инфраструктуры, электронного документооборота. Цифровизация подразумевает также полнейшую интеграцию всех элементов и процессов, участвующих в формировании транспортного коридора в единое целое.

Помимо цифровизации существующих коридоров необходимо рассматривать и организацию новых транспортных коридоров с учетом многофакторного влияния. Развитие транспортных коридоров – прежде всего необходимость, которая продиктована современными реалиями общества. Сам смысл транспортных коридоров подразумевает возможность использования всей транспортной инфраструктуры различными перевозчиками, а также применение единого транспортного документа, который действует на всем протяжении транспортного коридора вне зависимости от государственной принадлежности того или иного участка транспортного коридора. Поэтому модернизация существующих коридоров и внедрение новых транспортных коридоров в повседневное использование становятся необходимыми для более эффективной и безопасной транспортной логистики, улучшения доступности регионов, развития международных транспортных связей и привлечения иностранных инвестиций.

Ключевые слова: транспортный коридор, цифровизация, развитие, международные маршруты, перевозка, современные условия, транспортные коридоры Российской Федерации, цифровые двойники, транспортная отрасль.

Andrey N. Larin, Irina V. Larina

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

DEVELOPMENT OF TRANSPORT CORRIDORS IN MODERN CONDITIONS

Abstract. The use of transport corridors in modern conditions is primarily due to the minimization of transport and logistics costs. In addition to reducing costs, transport corridors affect the development of regional infrastructure and the economic growth of the region as a whole. The development of transport corridors is regulated by regulatory

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

documents and standards in the field of transportation process, as well as in the field of transport infrastructure development in general. Currently, any development of transport corridors is directly related not only to the development of the transport industry and transport infrastructure, but also to the introduction of digitalization of all transport processes and the entire transport industry as a whole. Digitalization of transport corridors entails the creation of digital counterparts of all elements of transport corridors – transport, infrastructure, electronic document management. Digitalization also implies the complete integration of all elements and processes involved in the formation of the transport corridor into a single whole.

In addition to digitalization of existing corridors, it is necessary to consider the organization of new transport corridors taking into account the multifactorial influence. The development of transport corridors is primarily a necessity dictated by the modern realities of society. The very meaning of transport corridors implies the possibility of using the entire transport infrastructure by various carriers, as well as the use of a single transport document that operates throughout the entire length of the transport corridor, regardless of the nationality of a particular section of the transport corridor. Therefore, the modernization of existing corridors and the introduction of new transport corridors into everyday use becomes necessary for more efficient and safe transport logistics, improving the accessibility of regions, developing international transport links and attracting foreign investment.

Keywords: *transport corridor, digitalization, development, international routes, transportation, modern conditions, transport corridors of the Russian Federation, digital twins, transport industry.*

Актуальность рассматриваемой темы обусловлена тем, что применение транспортных коридоров в современных условиях становится необходимостью как для развития целых регионов, так и для повышения экономической составляющей региона вне зависимости от государственной принадлежности. Транспортные коридоры в современных условиях охватывают минимум две и более стран. Работа транспортных коридоров призвана обеспечить не только взаимодействие различных регионов, но и развитие транспортной инфраструктуры, что в целом является отправной точкой для развития экономической составляющей не только задействованных напрямую в транспортных коридорах регионов, но и тех регионов, которые играют вспомогательную роль для обеспечения бесперебойного функционирования транспортных коридоров.

Целью настоящей статьи выступает развитие транспортных коридоров. Задача состоит в описании алгоритма цифровизации существующих коридоров и организации новых транспортных коридоров. В статье в качестве исходных условий указаны современные условия в виде геополитических рисков. С точки зрения научной новизны в данной работе предпринята попытка обосновать необходимость разработки новых транспортных коридоров и предложений по модернизации существующих коридоров.

Изучением данной темы занимались такие авторы, как С. Н. Погодин, Л. Б. Вардомский, М. О. Тураева, Н. В. Пеньшин, В. Ядуха. Проанализировав труды названных исследователей, можно прийти к выводу, что развитие транспортных коридоров Российской Федерации происходит в любой момент времени и в любых условиях, в том числе и с учетом современных тенденций.

Необходимость развития транспортных коридоров. Самыми первыми транспортными коридорами можно считать торговые пути. Торговые пути охватывали территории Африки, Азии, Востока, Индии, Византии. Это наиболее значимые и известные транспортные пути Древнего мира и Средневековья, выступившие моделью для нынешних международных транспортных коридоров [1, 2].

В современных реалиях организация перевозочного процесса – очень актуальная тема. Рассматривать перевозочный процесс в рамках одного государства либо в рамках взаимодействия перевозочных систем двух государств через таможенный пункт в настоящее время нецелесообразно, так как возникают большие издержки в перевозочном процессе, что в свою очередь сказывается на стоимости перевозимого товара. Развитие транспортных коридоров призвано не только снизить издержки в процессе транспортировки, но и повлиять на экономическую составляющую тех регионов, через которые проходит транспортный коридор.

Организация транспортного коридора невозможна без развития транспортной инфраструктуры, которая могла бы поддерживать работу транспортного коридора в

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

бесперебойном режиме. Помимо этого работа транспортной инфраструктуры подразумевает привлечение многочисленных сторонних организаций, которые играют воспитательную роль в процессе поддержки бесперебойной работы всей транспортной инфраструктуры и всего транспортного коридора в целом.

В настоящее время идет комплексное развитие международных транспортных коридоров, которое подразумевает совершенствование государственной транспортной инфраструктуры и интеграцию ее в международные транспортные коридоры.

В современных реалиях развивающиеся международные экономические и социальные связи, а также глобализация производства и распределения ресурсов требуют новых подходов к мониторингу, координации и развитию национальных транспортных инфраструктур. Это обусловлено тем, что сегодня ни одно из государств не может себе позволить с экономической и временной точки зрения полный цикл производства большинства стратегически важной продукции. Необходимые материалы во многих случаях географически находятся довольно далеко друг от друга, что ставит остро вопрос логистики, а это, в свою очередь, ведет к большим издержкам. Поэтому создание международных транспортных коридоров призвано минимизировать эти издержки, а также эта система позволяет использовать преимущества транспортной инфраструктуры стран для международной логистики.

Международные транспортные коридоры дают возможность использования всех преимуществ транспортной инфраструктуры стран-участников. Деятельность транспортных предприятий облегчается благодаря международным логистическим коридорам, которые внедряют новые технологии, обеспечивают единые технические средства и развивают общее информационное пространство. Главная цель формирования системы международных транспортных коридоров (МТК) заключается в увеличении эффективности транспортных операций в регионе и развитии транспортной инфраструктуры стран-участниц [1]. Преимущества системы МТК:

- улучшение связей;
- увеличение объема обслуживания;
- развитие научно-технической, технологической и финансовой сфер;
- оптимизация организации перевозочного процесса.

Чем дольше функционирует транспортный коридор, тем более устойчивыми и прочными становятся связи, созданные вокруг него. [1, 3].

Перевозочный процесс – это совокупность взаимосвязанных технологических мероприятий, выполняемых с грузами и пассажирами в процессе их транспортировки из пункта А в пункт Б.

Организация перевозочного процесса представляет собой деятельность, направленную на выполнение следующих задач:

- определение способа транспортировки;
- определение вида транспорта;
- определение типа транспорта;
- выбор перевозчика, контрагента, логистического посредника при перевозке;
- анализ и оптимизация показателей перевозочного процесса.

Перевозочный процесс в транспортных коридорах – весьма сложный момент, который включает в себя множество различных аспектов.

Формирование процесса начинается с составления и подписания соглашений между участниками транспортных коридоров. Для этого привлекаются силы министерства транспорта и путей сообщения, другие министерства, а также другие необходимые государственные органы.

Затем происходит создание специализированных, государственных отделов, которые занимаются распределением национальных участков международных транспортных коридоров. Указанные отделы создают интернациональные условия функционирования перевозочных процессов в коридорах.

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

Формирование процесса перевозки на международных транспортных коридорах должно быть презентовано в виде грузо-, а также пассажиропотоков, которые совершаются в границах системы транспортных коридоров. Мониторинг транспортировок предполагает как кратковременное, так и долговременное наблюдение. Для полноценного анализа транспортных процессов, которые происходят в транспортных коридорах, используется следующая информация:

- статистические данные и экономические прогнозы рассматриваемой территории;
- результаты и прогнозы развития транспортной системы региона;
- транспортная и экономическая стратегии развития государства.

Исходя из перечисленного составляется стратегия по оптимизации перевозочного процесса, т. е. улучшение необходимой инфраструктуры, введение актуальных транспортно-таможенных технологий, усовершенствование нормативно-правовой базы, а также предоставление участникам транспортных процессов всей необходимой информации [4, 5].

Цифровизация транспортных коридоров. В современном мире необходимо обеспечить высокую скорость и безопасность транспортных перевозок, а также использовать современные технологии для управления и мониторинга транспортной инфраструктуры. Все это невозможно без использования цифровизации и применения искусственного интеллекта.

Способы развития транспортных коридоров с учетом развития современного общества представлены на рисунке 1.



Рисунок 1 – Развитие транспортных коридоров

Среди современных тенденций, которые необходимо учитывать при развитии транспортных коридоров, можно выделить следующие.

1. Увеличение грузопотоков и пассажиропотоков. С ростом населения и развитием экономики транспортные перевозки увеличиваются. Создание транспортных коридоров осуществляется с учетом существующих транспортных перевозок и с учетом прогноза развития транспортных перевозок.
2. Увеличение скорости и эффективности перевозок. Организация транспортных коридоров с учетом увеличения скорости и безопасности.
3. Развитие экологически чистых видов транспорта. Развитие транспортных коридоров с учетом экологических требований и использования экологически чистых видов транспорта.
4. Развитие цифровых технологий и автоматизации. При проектировании транспортных коридоров необходимо учитывать возможности цифровых технологий и цифровизации.

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

5. Учет международных стандартов и норм. Развитие транспортных коридоров с учетом международных стандартов и норм, а также с учетом трансграничных перевозок и взаимодействия различных видов транспорта, стран и регионов [6].

Создание электронно-вычислительных машин, средств передач информации привело к новаторским методам в области информатизации, а также помогло переключиться на промышленный уровень техники, технологий и инструментальных средств. Цифровизация в XXI в. является сильнейшим инструментом увеличения эффективности деятельности компаний, регулирования абсолютно всеми разновидностями ресурсов, а также управления информационными системами в реальном времени.

Цифровизация – это переход к новым процессам, моделям и подходам, основанным на информационных технологиях.

Цифровизация транспортной отрасли – это внедрение в транспортные процессы новых информационных технологий.

Основная задача цифровизации – преобразование всей деятельности транспортных коридоров в соответствии со стремительными изменениями условий нынешнего мира. Иными словами, цифровизация может помочь транспортным компаниям грамотно осуществить в том числе и самые необычные перемены, а также поддержать или даже улучшить уровень конкурентоспособности предприятия на рынке.

Графическое представление алгоритма цифровизации перевозочного процесса изображено на рисунке 2.

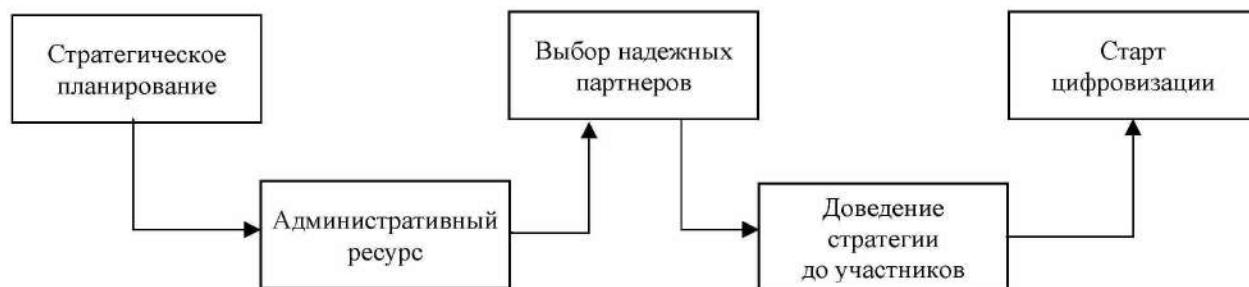


Рисунок 2 – Алгоритм цифровизации перевозочного процесса

Цифровизация перевозочного процесса выполняется по следующему алгоритму.

1. Стратегическое планирование. Необходимо осознавать, какие вопросы должны быть решены, сколько и какие средства понадобятся, как введение цифровизации и современных технологий скажется на перевозочном процессе. На этом этапе выполняются следующие операции:

оценка положения. Определяется нынешнее положение дел, это поможет четко выявить болевые точки, которые как можно скорее следует усовершенствовать;

постановка целей. После выявления актуальных проблем и проведения оценки имеющихся ресурсов определяются задачи и цели цифровизации;

формирование бюджета. Цифровая трансформация – постоянная процедура, как правило, требующая значительных вложений.

2. Административный ресурс. Представление административным аппаратом абсолютно всех аспектов будущего процесса и его результатов – один из основных моментов, показывающий готовность к цифровизации. Непосредственно по этой причине первые лица предприятия нередко начинают осуществлять содействие в цифровизации еще на стадии формирования ее стратегии.

3. Выбор надежных партнеров. Надежный партнер сможет

- обеспечить предприятие необходимыми ресурсами для процесса трансформации;
- порекомендовать консалтинговое обслуживание, которое может помочь ввести современные информационные технологии;

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

- помочь определить правильное направление трансформации;
- подсказать удачные, успешные практики внедрения информационных технологий.

4. Доведение стратегии до участников. Для того чтобы сформировать требования для эффективной цифровизации процесса перевозки в международных транспортных коридорах, необходимо вовремя довести информацию о ее значимости до абсолютно всех участников. Данный этап гарантирует взаимодоверие к грядущему процессу и взаимопомощь среди всех участников, задействованных в реализации стратегии.

Необходимо убедиться в том, что участники перевозочного процесса получили ясную структурную схему и план перехода к цифровизации.

5. Старт информатизации. Выполнение поставленной стратегии должно происходить на всех этапах перевозочного процесса. В ходе цифровой трансформации важно не забывать о поставленных задачах и целях [7].

В 2021 г. в Российской Федерации был утвержден курс на цифровизацию транспортной отрасли, в планах которого цифровое совершенствование транспортной системы страны путем внедрения технологий виртуальной и дополненной реальности, искусственного интеллекта, обработки крупных массивов сведений, а также информационного моделирования, блокчейна и т. д. Современные информационные технологии применяются в различных процессах, примером могут выступить такие процессы, как

мониторинг и анализ путевого трафика;

создание цифровых моделей транспортной обстановки, а также рациональное построение пути подвижного состава;

разработка системы сквозного обмена электронными перевозочными сведениями (документами);

формирование государственного электронного контура логистики экосистемы цифровых транспортных коридоров Евразийского экономического союза, единого центра управления транспортным комплексом, в том числе решений для сбора обращений граждан, электронных двойников имеющихся, а также новейших объектов транспортной инфраструктуры с развитых технологий визуализации (виртуальная и дополненная реальность), концепции моделирования транспортных узлов;

разработка и применение цифровой системы анализа, учета и планирования работ (затрат) на планирование, строительство, восстановление и обслуживание объектов транспортной инфраструктуры (в том числе предиктивная аналитика технического сервиса и ремонта объектов транспортной инфраструктуры);

введение смарт-договоров с использованием систем распределенного реестра с целью наблюдения за грузами и обменом юридически значимой информацией между участниками отрасли и государством [8].

Цифровизация перевозочного процесса в транспортных международных коридорах может выполняться за счет вариантов, которые отражены на рисунке 3 [9].

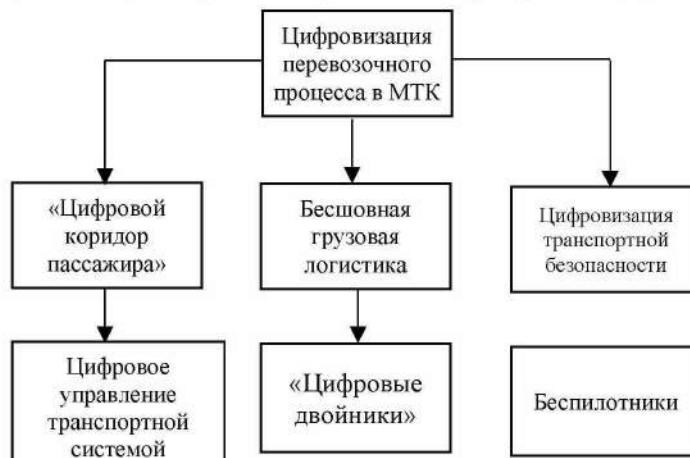


Рисунок 3 – Варианты цифровизации перевозочного процесса

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

Рассмотрим более подробно каждый вариант цифровизации перевозочного процесса.

1. «Цифровой коридор пассажира». Цифровой коридор пассажира представляет собой надежный и единый метод оплаты проезда на всех видах транспорта (с биометрией). Введение данной технологии приведет

- к сокращению времени ожидания транспорта;
- сокращению времени передвижения потребителей транспортных услуг;
- повышению количества пассажиров международного следования в расчете на одного работника пассажирского транспорта;
- повышению количества клиентов транспортных услуг дальнего следования в пересчете на одного работника пассажирского транспорта;
- повышению процента клиентов с безналичной оплатой проезда в крупнейших агломерациях.

Организаторы перевозок осуществляют повышенный контроль над транспортной работой, постоянный мониторинг пассажиропотока, получают полные данные о выполненной работе и достоверную детализированную отчетность.

2. Бесшовная грузовая логистика. Бесшовная грузовая логистика предполагает усиление связей организаций различных видов транспорта не как конкурентов, а как партнеров за счет использования последних информационных технологий для достижения общей цели – удовлетворения потребностей клиента.

3. Цифровизация транспортной безопасности. При цифровизации транспортной безопасности внедряются механизмы по обеспечению информационной безопасности, т. е. происходит подключение перевозочного процесса к системе обнаружения, предупреждения и ликвидации аварийных ситуаций с помощью ИТ-технологий. Новшества позволят контролировать и предотвратить потери, сливы личной и биометрической информации пассажиров путем постоянного анализа потоков сведений.

4. Цифровое управление транспортной системой. С помощью последних технологий происходит онлайн-мониторинг транспортных средств, объектов транспортной инфраструктуры.

5. «Цифровые двойники». Концепция состоит в том, чтобы создать модели стратегически важных объектов инфраструктуры и с помощью этих моделей переключиться на методику планирования, конструкции и анализа.

6. Беспилотники. Данный вариант предполагает создание разумной, защищенной инфраструктуры для беспилотников на всех видах транспорта в системе транспортных коридоров, гарантировав применение беспилотников для осуществления торговых и индивидуальных перевозок.

Проводимая в настоящее время Российской Федерацией и Евразийским экономическим союзом (ЕАЭС) цифровизация транспорта и транспортных коридоров в рамках формирования общего транспортного пространства (ОТП) становится важным фактором повышения конкурентоспособности существующих и создающихся новых межнациональных транспортных коридоров [10].

Интеграция транспортных коридоров России в новые международные транспортные коридоры в современных условиях. На развитие транспортных коридоров в России в современных реалиях огромное влияние оказывает geopolitika. В настоящее время на Россию наложены санкции рядом государств, что в свою очередь препятствует развитию существующих коридоров, зато, с другой стороны, способствует развитию новых транспортных коридоров. Секционная политика может замедлить модернизацию инфраструктуры транспортной отрасли и создать дополнительные трудности при транспортировке грузов, что в свою очередь может повлечь удорожание транспортных услуг за счет дополнительных издержек при составлении маршрутов.

Снижение использования существующих транспортных коридоров заставляет кардинально развернуться в сторону Юга. Россия имеет значительный потенциал для развития

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

своих транспортных коридоров. Страна располагает обширной территорией и географическими преимуществами, что в свою очередь позволяет организовывать новые транспортные коридоры. Также Россия продолжает инвестировать в модернизацию своей транспортной инфраструктуры и поиски альтернативных источников оборудования и технологий. В условиях санкций Российской Федерации должна уделить особое внимание развитию своих собственных транспортных коридоров, которые могут обеспечить экономическую стабильность и независимость от внешних поставщиков. Транспортные коридоры должны разрабатываться с учетом возможности применения взаимодействия различных транспортных систем.

Одним из важных транспортных коридоров России является Транссибирская магистраль, соединяющая Россию с Азией и Европой. Развитие этого коридора может способствовать увеличению объемов торговли с Китаем и странами Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР). Стоит уделить внимание также развитию морских портов на Балтийском, Черном и Каспийском морях. Это позволит России увеличить объемы экспорта и импорта и уменьшить зависимость от транзитных стран.

Россия и Иран, столкнувшись с глобальной изоляцией, спешно развиваются коридор «Север – Юг» (INSTC) длиной 7000 км. Он соединяет Россию с Индией и Юго-Восточной Азией, позволяя обойти Босфор и Суэцкий канал в случае их блокады [11] (рисунок 4).

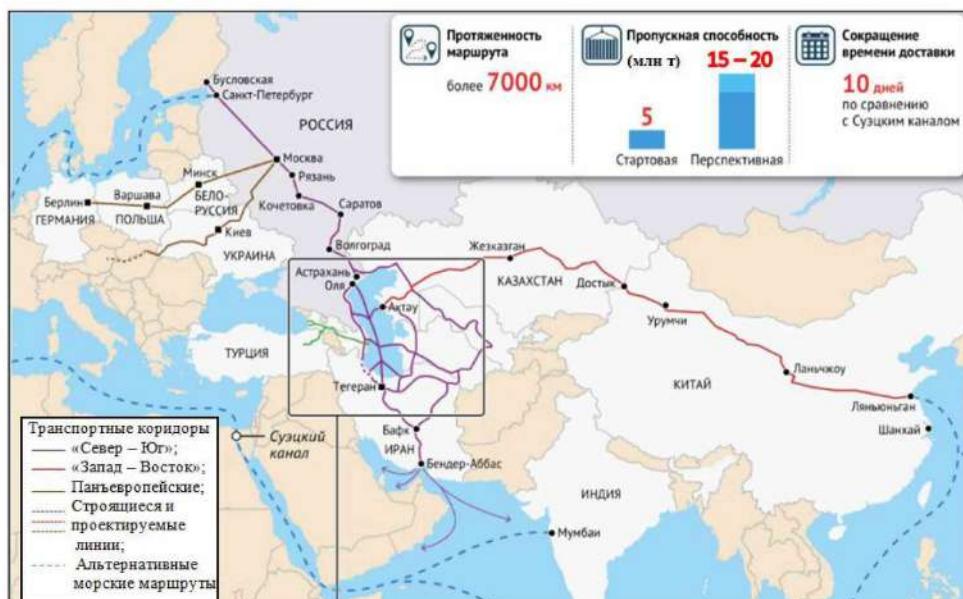


Рисунок 4 – Перспективные транспортные пути [12]

У коридора три ветки. Западная ведет в Иран по железным дорогам России и Азербайджана. Восточная – по железным дорогам России, Казахстана и Туркменистана. Обе они выходят к портам Бендер-Аббас в Персидском заливе и Чабахар в Оманском заливе. А транскаспийская ветка выводит российские грузы из Баку в Турцию и ЕС по одноименному коридору, описанному выше. Основной транзитный узел – Азербайджан. Потенциал коридора Европа – Азербайджан – Баку – Россия (ЕАБР) оценивается в 15 – 25 млн т в год: ожидается, что в основном это будут зерно и контейнеры. После подключения к евразийским широтным транспортным коридорам он может обеспечить России до 40 % контейнерных перевозок [2].

С созданием «Восточного полигона» появляется возможность связать воедино существующие евразийские международные транспортные коридоры, а в перспективе – интегрировать евразийскую и североамериканскую транспортные системы. При этом сроки доставки трансевразийских грузов в среднем должны сократиться минимум на 7 – 10 дней. Это неизбежно приведет к глобальным изменениям в евразийской, а затем и в мировой торговле.

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

Российские власти активно развивают совместные железнодорожные проекты с другими государствами. Так, в июне 2023 г. запущен железнодорожный мост через реку Амур Благовещенск – Хэнхэ (Китай). До 2030 г. Россия планирует построить железные дороги на территории Монголии. Рост мощности железной дороги увеличит темпы развития добывающей, обрабатывающей промышленности, транзитного потенциала России [13].

На основании приведенных выше исследований при модернизации и организации новых транспортных коридоров можно спрогнозировать следующие преимущества (рисунок 5).

Модернизация существующих МТК и развитие, а также создание новых транспортных коридоров приведут к росту конкурентоспособности дальневосточной промышленности на рынках Азиатско-Тихоокеанского региона.



Рисунок 5 – Оценка преимуществ от модернизации существующих и организации новых транспортных коридоров

Современные реалии диктуют необходимость развития новых международных коридоров, которые должны охватывать новые территории и направления, а также развивать существующие транспортные системы. Развитие транспортных коридоров является ключевым фактором для повышения конкурентоспособности экономики России на мировой арене, улучшения доступности регионов и повышения качества жизни населения. Развитие транспортных коридоров России является частью глобальных и региональных интеграционных процессов. Необходимо обеспечить высокую скорость и безопасность транспортных перевозок, а также использовать современные технологии для управления и мониторинга транспортной инфраструктуры. Развитие транспортных коридоров Российской Федерации является важным и стратегическим направлением развития экономики страны, требующим внимания и поддержки со стороны государственных и частных организаций.

Россия может взять на себя роль ведущего транспортного хаба (узла связи) в регионе, предлагая свою инфраструктуру и логистические решения для международных перевозок.

Список литературы

1. Ларин, А. Н. Влияние логистических коридоров на развитие регионов / А. Н. Ларин, Б. Е. Тельжанов. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы современной экономики : материалы международной научно-практической конференции: в 2 ч. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2022. – Ч. 1. – С. 332–339.
2. Погодин, С. Н. Интеграционный проект: Великий шелковый путь (к истории создания) / С. Н. Погодин, Цзюнь Чжоу. – Текст : непосредственный // Управленческое консультирование. – 2017. – № 1 (97) – С. 205–210.
3. Международные транспортные коридоры на евразийском пространстве: развитие широтных маршрутов // ndex1520.com (ERAU-2020): сайт. – Текст : электронный. – URL: https://index1520.com/upload/medialibrary/954/_RU.pdf (дата обращения: 28.10.2023).
4. Пеньшин, Н. В. Организация транспортных услуг и безопасность транспортного процесса : учебное пособие / Н. В. Пеньшин. – Тамбов : Тамбовский гос. техн. ун-т, 2014. – 476 с. – Текст : непосредственный.
5. Цифровая трансформация на транспорте. // tadviser.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Цифровая_трансформация_на_транспорте (дата обращения: 28.10.2023).
6. Современные подходы и принципы формирования железнодорожных международных транспортных коридоров // eav.ru (Евразия Вести-2013) : сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://eav.ru/publ1.php?publid=2013-04a41> (дата обращения: 28.10.2023).
7. Цифровая трансформация на транспорте. // cyberleninka.ru: сайт. – Текст : электронный. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovaya-transformatsiya-na-transporte-vozmozhnosti-razvitiya-i-riski-ogranicheniya-konkurentsii?ysclid=lpurootuk9596846264/Статья: Цифровая_трансформация_на_транспорте:_возможности_развития_и_риски_ограничения_конкуренции (дата обращения: 28.03.2023).
8. Цифровая трансформация бизнеса в 2022 – условия, технологии, направления // eternalhost.net : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://eternalhost.net/blog/perevody/tsifrovaya-transformatsiya-biznesa> (дата обращения: 28.10.2023).
9. Паспорт. Стратегии цифровой трансформации транспортной отрасли Российской Федерации: утв. Минтрансом Российской Федерации 21.12.2021 // mintrans.gov.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://mintrans.gov.ru/documents/8/11374/> (дата обращения: 28.10.2023).
10. Вардомский, Л. Б. Развитие транспортных коридоров постсоветского пространства в условиях современных геополитических и экономических вызовов / Л. Б. Вардомский, М. О. Тураева. – Москва : ИЭ РАН. – 2018. – 66 с. – Текст : непосредственный.
11. Ядуха, В. Новые транспортные коридоры / В. Ядуха // Компания // ko.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://ko.ru/articles/novye-transportnye-koridory/> (дата обращения: 28.03.2023).
12. MTK «Север – Юг» / M-Service Ltd. – Текст : электронный // mscargo.ru : сайт. – URL: <https://mscargo.ru/tpost/8ffmfvg4u1-mtk-sever-yug> (дата обращения: 28.10.2023).
13. Кочкина, Ю. Власти РФ задействуют ключевой резерв для разворота на Восток / Ю. Кочкина // ura.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://ura.news/articles/1036285589> (дата обращения: 28.10.2023).

References

1. Larin A.N., Tel'zhanov B.E. [Vlijanie logisticheskikh koridorov na razvitiie regionov]. *Aktual'nye problemy so-vremennoj ekonomiki. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii: v 2-h chastjakh* [Actual problems of the modern economy. Materials of the International Scientific and practical conference: in 2 parts]. Omsk, 2022, vol. 1, pp. 332-339 (In Russian).

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

2. Pogodin S.N., Tsziun' Chzhou. Integration project: The Great Silk Road (to the history of creation). *Upravlencheskoe konsul'tirovanie – Administrative consulting*, 2017, no. 1 (97), pp. 205-210 (In Russian).
3. *Mezhdunarodnye transportnye koridory na evrazijskom prostranstve: razvitiye shirotnykh marshrutov*. [International transport corridors in the Eurasian space: the development of wide routes]. Available at: https://index1520.com/upload/medialibrary/954/_RU.pdf (accessed: 28.10.2023).
4. Pen'shin N. V. *Organizacija transportnyh uslug i bezopasnost' transportnogo processa: uchebnoe posobie* [The organization of transport services and the safety of the transport process: textbook]. Tambov: Tambov State Technical University Publ., 2014, 476 p. (In Russian).
5. *Cifrovaja transformacija na transporte*. [Digital transformation in transport]. Available at: https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Digital_transformation_in_transport (accessed: 28.10.2023).
6. *Sovremennye podhody i principy formirovaniya zhelezodorozhnykh mezhdunarodnykh transportnyh koridorov*. [Modern approaches and principles of the formation of international railway transport corridors]. Available at: <http://eav.ru/publ1.php?publid=2013-04a41> (accessed: 28.10.2023).
7. *Cifrovaja transformacija na transporte*. [Digital transformation in transport]. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovaya-transformatsiya-na-transporte-vozmozhnosti-razvitiya-i-riski-ogranicheniya-konkurentsii?ysclid=lpurootuk9596846264> (accessed: 28.10.2023).
8. *Cifrovaja transformacija biznesa v 2022 – usloviya, tehnologii, napravlenija* [Digital transformation of business in 2022 — conditions, technologies, directions]. Available at: <https://eternalhost.net/blog/perevody/tsifrovaya-transformatsiya-biznesa> (accessed: 28.10.2023).
9. *Pasport. Strategii cifrovoj transformacii transportnoj otrassli Rossijskoj Federacii: utv. Mintransom Rossijskoj Federacii 21.12.2021 g. – 124 pp.* [Passport. Strategies of digital transformation of the transport industry of the Russian Federation: approved. Ministry of Transport of the Russian Federation 21.12.2021 – 124 p.]. Available at: <http://mintrans.gov.ru/documents/8/11374/> (accessed: 28.10.2023).
10. Vardomsky L.B., Turaeva M.O. *Razvitiye transportnyh koridorov postsovetskogo prostranstva v usloviyah sovremennoy geopoliticheskikh i ekonomicheskikh vyzovov* [Development of transport corridors of the post-Soviet space in the conditions of modern geopolitical and economic challenges]. Moscow: IE RAS Publ., 2018, 66 p. (In Russian).
11. *Jaduha V. Novye transportnye koridory* [New transport corridors]. Available at: <https://ko.ru/articles/novye-transportnye-koridory/> (accessed: 28.10.2023).
12. *MTK «Sever – Jug»* [MTK «North – South»]. Available at: <https://mscargo.ru/tpost/8ffmfvg4u1-mtk-sever-yug> (date of application: 28.10.2023).
13. Kochkina Ju. *Vlasti RF zadejstvujut kljuchevoj rezerv dlja razvoroata na Vostok* [the authorities of the Russian Federation will use a key reserve for a turn to the East]. Available at: <https://ura.news/articles/1036285589> (accessed: 28.10.2023).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ларин Андрей Николаевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Экономика транспорта, логистика и управление качеством», ОмГУПС.
Тел.: +7 (3812) 31-06-48.
E-mail: larinan75@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Larin Andrey Nikolaevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Transport economics, logistics and quality management», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-48.
E-mail: larinan75@mail.ru

Энергетические системы и комплексы

Ларина Ирина Вячеславовна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат экономических наук, доцент кафедры «Менеджмент, маркетинг и коммерция», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-48.

E-mail: larinai73@mail.ru

Larina Irina Vyacheslavovna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Economic, associate professor of the department « Management, marketing and commerce », OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-48.

E-mail: larinai73@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Ларин, А. Н. Развитие транспортных коридоров в современных условиях / А. Н. Ларин, И. В. Ларина. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 4 (56). – С. 71 – 82.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Larin A.N., Larina I.V. Development of transport corridors in modern conditions. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 4 (56), pp. 71-82 (In Russian).

УДК 697.3:621.577.001

А. Ю. Финиченко, А. П. Полозкова, А. С. Гусаров

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российской Федерации

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СОЛНЕЧНОГО КОЛЛЕКТОРА С ОБРАТНЫМ ДРЕНАЖЕМ

Аннотация. Целью исследования является выявление технических проблем в эксплуатации гелиооборудования, препятствующих широкому внедрению систем. В настоящей работе приведены, полученные на основе анализа рабочего процесса гелиоустановки данные по условиям возникновения возможных гидравлических ударов (ГУ) и гидравлическому режиму работы системы. Произведены инструментальные измерения гидравлических параметров в реальных условиях эксплуатации гелиоустановки. Приведены результаты опытных исследований на собранной установке, сравнительный анализ с проведенными ранее экспериментами, методика расчета ГУ в солнечных тепловых системах. Рассмотрена солнечная тепловая система с обратным дренажем (ОД), приведена схема собранной опытной установки. Известные традиционные способы защиты от гидроударов, применяемые, например, в системах водоснабжения, основанные на гашении ГУ, рассчитаны на сравнительно редкие случаи аварийной остановки и запуска насосов при отключении подачи электроэнергии и не являются энергоэффективными решениями для самодренируемых систем с ежедневным штатным пуском и остановкой насосов. Поэтому для подобных установок известны также оригинальные технические решения, исключающие ГУ за счет применения специальных клапанов с электроприводом. Однако работоспособность таких систем зависит от надежности электроснабжения и не обеспечивает защиту от ГУ при его внезапном отключении. Технические решения полученные из экспериментальных данных по исключению возникновения гидроударов в гелиоустановках могут стать важным фактором более широкого внедрения гелиоустановок в системы теплоснабжения, вопрос требует дополнительных исследований в области автоматизации. Приведены рекомендации по подбору оборудования во избежание аварий в гелиосистеме.

Ключевые слова: гелиосистема, гидравлический удар, солнечный коллектор, теплоноситель, обратный дренаж.

Alexandra Yu. Finichenko, Anastasia P. Polozkova, Artem S. Gusarov

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

STUDY OF THE OPERATION OF THE HYDRAULIC SYSTEM OF A SOLAR COLLECTOR WITH REVERSE DRAINAGE

Abstract. The purpose of the study is to identify technical problems in the operation of helioburdenation that cause the mass introduction of systems. In this work, based on an analysis of the working process of a solar power plant, data are obtained taking into account the conditions for the emergence of special hydraulic systems (HS), as well as the

hydraulic shock mode of operation of the system. Instrumental measurements of hydraulic parameters corresponding to the operating conditions of the solar installation were made. The results of experimental studies on the assembled installation, a comparative analysis with previously conducted experiments, and a methodology for calculating GI in solar thermal systems are presented. A solar thermal system with reverse drainage (RD) has been considered and a pilot installation has been assembled. Known traditional methods of protection against water hammer, used, for example, in water supply systems, based on extinguishing hydrocarbons, are designed for relatively rare cases of emergency stop and start of pumps during a power outage and are not energy-efficient solutions for self-draining systems with daily routine start and stop of pumps. Therefore, for such installations, original technical solutions are also known that eliminate power generators through the use of special valves with an electric drive. However, the performance of such systems depends on the reliability of the power supply and does not provide protection from the power supply in the event of its sudden shutdown. Technical solutions obtained from experimental data to eliminate the occurrence of water hammer in solar installations can become an important factor in the wider implementation of solar installations in heat supply systems; the issue requires additional research in the field of automation. Recommendations are given for the selection of equipment to avoid accidents in a solar system.

Keywords: solar system, water hammer, solar collector, coolant, reverse drainage.

Системы, использующие солнечные коллекторы (СК) с обратным дренажем (ОД) (Drainback Systems), являются одним из перспективных направлений применения гелиооборудования, так как характеризуются множеством преимуществ [1, 2].

Особенностью конструкции данных систем является опорожнение СК от теплоносителя при остановке насоса гелиоконтура в бак-аккумулятор.

Применение солнечных коллекторов в системах теплоснабжения осложнено возможным возникновением гидравлических ударов (ГУ) в момент запуска и остановки системы. Авторов литературных источников [3, 4] интересовал вопрос определения гидравлического удара, и ими были сделаны попытки расчетного определения этой величины для качественной оценки работы станции.

В гелиоустановках помимо ГУ существуют различные аварийные условия их работы – тепловой удар, предельный нагрев теплоносителя, потеря герметичности трубок коллектора, превышение давления в системе и механические повреждения (в том числе по причине возникновения ГУ). Требования к долговечности (включая механическую прочность), надежность и безопасность солнечных коллекторов установлены в ГОСТ Р 55617.1–2013 [5]. Коллектор, выполненный из медных трубок, может выдерживать слабые гидравлические удары и достаточно сильный нагрев, но подающие и обратные трубопроводы для теплоносителя могут выходить из строя, так как часто выполнены из других материалов. Исследование гелиоустановки с ОД рассматривалось в диссертационной работе Гнатюка Ильи Сергеевича, где был обоснован отказ от установки обратных клапанов в контуре теплоносителя и даны рекомендации по обеспечению избыточного давления в верхних точках СК для предотвращения закипания теплоносителя [6].

В особенностях работы системы СК присутствует множество факторов, влияющих на эксплуатацию, в том числе изменение гидравлического режима в холодном климате [7].

В качестве рабочего тела в системе теплоснабжения с применением СК рассматривается смесь гликоля и воды в различных концентрациях в зависимости от температуры наружного воздуха. В зимний период свойства рабочего вещества изменяются с понижением температуры (повышение вязкости, снижение теплопроводности). В летний период, при высоких температурах, рабочая жидкость может достигать температуры 200 °C, что может вызывать преждевременное разложение смесей гликоля и воды.

Решением проблемы с замерзанием, температурной деградацией теплоносителя является применение систем с ОД.

Существуют различные варианты активных систем солнечного отопления, представленные на рисунке 1, классификация адаптирована из предложенной в работе [3].

Энергетические системы и комплексы

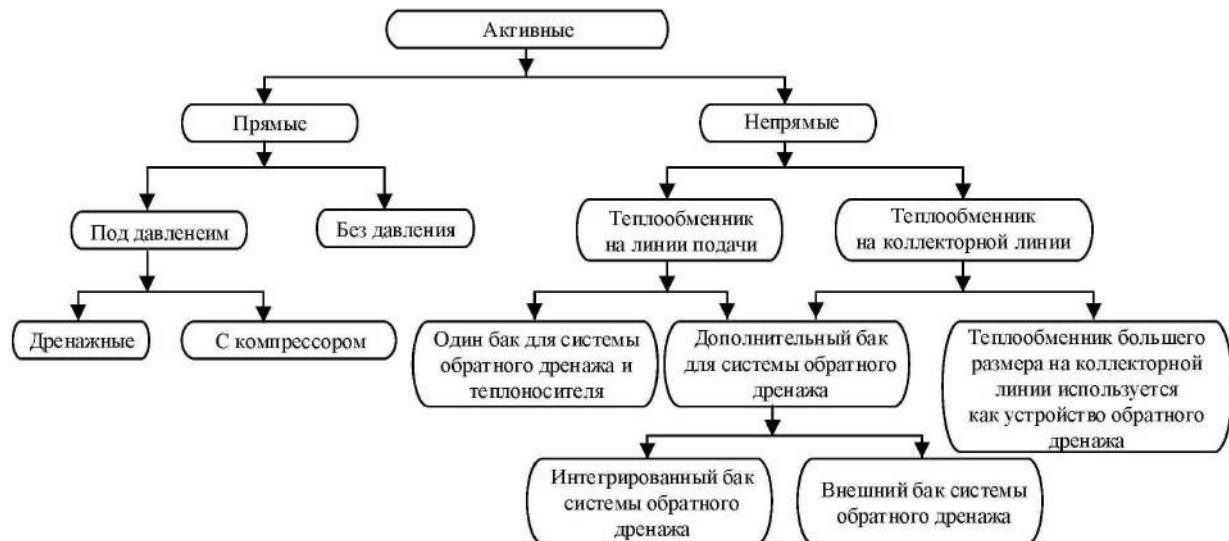


Рисунок 1 – Классификация солнечных дренажных активных систем

Режим работы установки с ОД при нормальной эксплуатации предусматривает запуск и остановку циркуляционных насосов гелиоконтура по температуре теплоносителя для предотвращения его замерзания и снижения тепловых потерь. Это приводит к ГУ в трубопроводах гелиоконтура вследствие резкого изменения скорости движения теплоносителя [8]. ГУ классифицируется в зависимости от причины возникновения изменения скорости. К типам гидроудара относятся следующие: ГУ, вызванный резким закрытием клапана; ГУ, вызванный запуском циркуляционного насоса гелиоконтура и другими причинами [3].

Для исследования работы гидравлической системы СК с ОД была спроектирована опытная установка (рисунок 2).

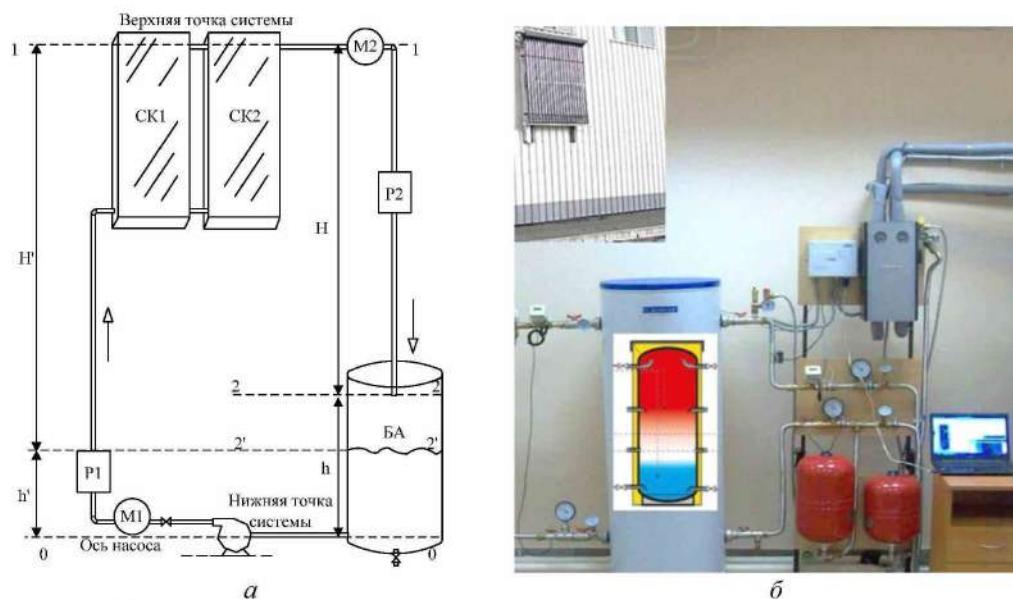


Рисунок 2 – Опытная установка для исследования гидравлического режима работы СК с ОД:
схема установки (а) и внешний вид установки (б)

На рисунке 2 изображены: СК1, СК2 – солнечные коллекторы; Р1, Р2 – расходомеры на подающем и обратном трубопроводах; М1, М2 – манометры на подающем и обратном трубопроводах; БА – бак-аккумулятор (дренажный); Н, Н' – полный гидростатический напор при циркуляции и остановленном контуре; h , h' – подпор при циркуляции и остановленном контуре.

Энергетические системы и комплексы

Модель коллектора изготовлена из цельной изогнутой медной трубы ($d = 9$ мм). Размер всего коллектора составляет 1050×1050 мм, объем внутренних каналов – 0,7 л, эти характеристики являются аналогичными коллектору марки ЯSolar типа П1 (SK-001), который изготавливается в России. Сборка корпуса коллектора не осуществлялась, так как для исследования гидравлического режима это не требуется, присоединительные патрубки выбраны диаметром 20 мм. Подающий и обратный трубопроводы изготовлены из полипропиленовых труб PP-R ($d = 20$ мм). Коллектор был закреплен на стене здания с внешней стороны на высоте 5 м, бак-аккумулятор, трубопроводы, измерительные устройства (расхода и давления) находились внутри здания. Для выяснения влияния гидравлического сопротивления и конструкции коллектора на процесс дренирования в эксперименте был применен вакуумный коллектор зарубежной фирмы, который был подключен аналогично изготовленному коллектору. Трубчатые вакуумные коллекторы по конструкции отличаются от плоских СК, но применение системы ОД для них также остается актуальным. В процессе работы вакуумного коллектора без применения ОД при проведении опытов в летний период с повышенными температурами и возникновении стагнации, т. е. режимом, при котором прекращался проток теплоносителя по контуру гелиосистемы, наблюдались частичное вскипание теплоносителя и выброс его через предохранительный клапан в окружающую среду.

При выборе насосного оборудования и подборе диаметров трубопроводов необходимо учитывать минимально допустимую скорость движения теплоносителя по циркуляционному контуру, которая должна составлять более 0,3 м/с (1 фут/с). Выбор следует осуществлять по номограмме, приведенной в работе [9], в противном случае насос будет перекачивать теплоноситель, но полностью удалить воздух из контура коллектора будет невозможно, так как будет происходить разделение потока на воздушную и жидкую фазу, будет невозможно и измерять расход теплоносителя стандартными расходомерами, что было установлено при проведении опытного исследования – после запуска циркуляционного насоса в фазе вытеснения воздуха из циркуляционного контура расходомер показывает неверные данные из-за наличия воздуха. Такая нестабильная работа влияет на теплообмен в СК. На работу насоса могут повлиять вскипание теплоносителя и возникновение разрыва струи при определенной высоте гелиоконтура, при этом насос будет преодолевать гидростатический напор [10]. При установлении достаточной скорости движения теплоносителя по циркуляционному контуру фаза вытеснения воздуха из СК заканчивается и далее наблюдается стабильная работа системы без пульсаций и появления воздуха в трубках. В опыте установлено, что скорость, обеспечивающая стабильную работу СК, фиксируется от 0,5 м/с при использовании гликоля в качестве теплоносителя; при снижении скорости теплоносителя фаза вытеснения воздуха из СК становится слишком долгой или вовсе не заканчивается, расхождение данных с предыдущими исследованиями данного вопроса возможно из-за индивидуальных особенностей конструкции опытной системы. При проведении эксперимента установлено также, что при подключении нескольких коллекторов, удалять воздух и заполнять СК становится сложнее, требуются более мощный насос для прокачки теплоносителя и дополнительная автоматизация по управлению гидравлическим режимом контура. Подобные исследования проводились при работе гелиоустановки с ОД, состоящей из множества коллекторов, для больничного комплекса в г. Усть-Лабинске (Краснодарский край) [6], в ходе которых было отмечено, что для корректного запуска системы без возникновения ГУ требуется управлять специальным клапаном, функционирующим через программируемый контроллер. Помимо проблемы с заполнением гелиоконтура теплоносителем при запуске в работу остановка циркуляционного насоса в системах с ОД большой мощности с множеством СК и соединяющих их трубопроводов может привести к возникновению ГУ [11], разрушающих систему.

Таким образом, установление режима работы без разделения потока на две фазы в гелиосистемах с ОД является одним из ключевых факторов их эффективного использования,

этот вопрос требует дополнительных исследований и индивидуального подхода к каждой системе из-за конструктивных особенностей и компоновки оборудования, использованного при построении циркуляционного контура СК.

Проанализируем результаты, полученные при проведении гидравлических испытаний на опытной установке. При составлении методики испытаний были учтены положения, изложенные в источниках [12, 13]. Результаты эксперимента при проведении испытаний показаны на рисунке 3.

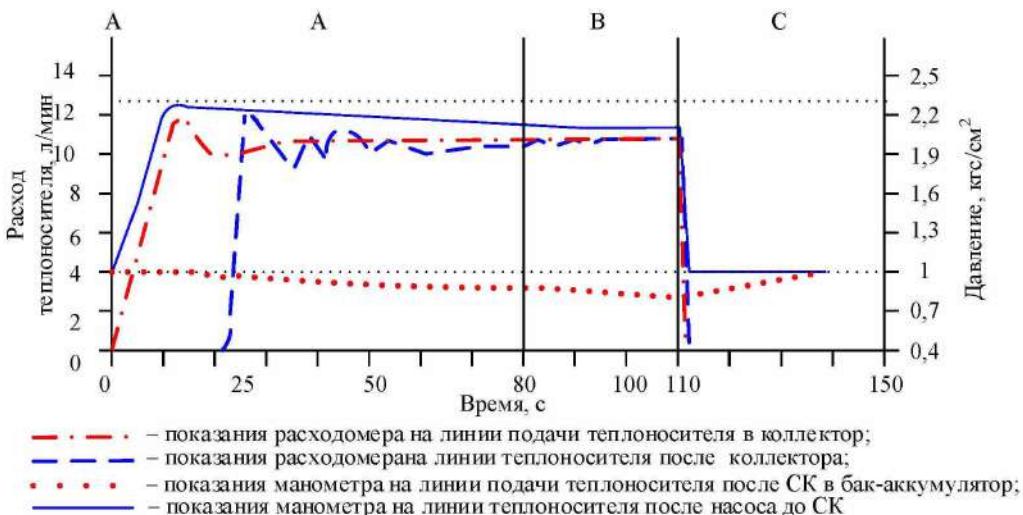


Рисунок 3 – Стадии и режимы работы гидравлической системы СК с ОД

Для исключения влияния случайных факторов было проведено десять опытов, результаты которых незначительно отличались от друг от друга, на полученном графике (см. рисунок 3) представлены средние значения измеренных величин. При работе гидравлической системы с ОД можно выделить несколько стадий, которые характеризуют определенный гидравлический режим в соответствующий момент времени. В начале опыта показания расхода теплоносителя расходомеров равны нулю, так как циркуляция отсутствует, показания давления теплоносителя верхнего манометра М2 соответствует атмосферному давлению, а показания давления теплоносителя манометра М1 незначительно отличается за счет подпора h' (см. рисунок 2).

Стадия А – это заполнение СК, начинается оно с запуска циркуляционного насоса, абсолютное давление становится более $2,2 \text{ кгс}/\text{см}^2$, насос начинает прокачивать теплоноситель по подающему трубопроводу к СК, постепенно заполняются коллекторы. На ротаметре Р1 также фиксируется резкий скачок расхода до 12 л/мин. Во время процесса заполнения коллекторов расход теплоносителя несколько снижается, так как теплоноситель преодолевает гидравлические сопротивления и гидростатический напор H' . На 25-й секунде СК заполнены и теплоноситель устремляется вниз через обратный трубопровод к баку-аккумулятору (Б-А), вновь заполняя его теплоносителем. При этом напор на подающем ротаметре немножко повышается за счет обратного тока теплоносителя, в работу включается ротаметр Р2, который тоже фиксирует резкий скачок расхода теплоносителя. В нормальных условиях показания подающего Р1 и обратного Р2 ротаметров должны совпадать, так как утечек теплоносителя в системе не наблюдается, но показания ротаметра Р2 приобретают пульсационный характер – это объясняется вытеснением воздуха из СК и установлением режима двухфазного потока в обратном трубопроводе. Данный режим будет продолжаться до тех пор, пока воздух полностью не будет вытеснен теплоносителем из СК.

Установившийся режим стадии В наблюдается в среднем с 68-й – 82-й секунды от начала пуска насоса, время установки такого режима будет зависеть от многих факторов, как уже

Энергетические системы и комплексы

было отмечено ранее. Режим характеризуется прекращением пульсаций потока и равенством показаний ротаметров Р1 и Р2.

Насос выключается на стадии дренирования С на 110-й секунде. Установка спроектирована так, что при отключении насоса происходит автоматическое дренирование теплоносителя обратно в бак-аккумулятор, верное подключение патрубков к коллекторам обеспечивает свободный слив теплоносителя, в противном случае часть теплоносителя останется в коллекторе, что приведет к выходу его из строя при неблагоприятных условиях окружающей среды, стрелками на рисунке 4 показан ход теплоносителя в режиме дренирования. На этой стадии расходомеры показывают нулевые значения, так как поток теплоносителя идет в обратном направлении, а у манометра М2 постепенно выравниваются показания с манометром М1 до исходных значений.

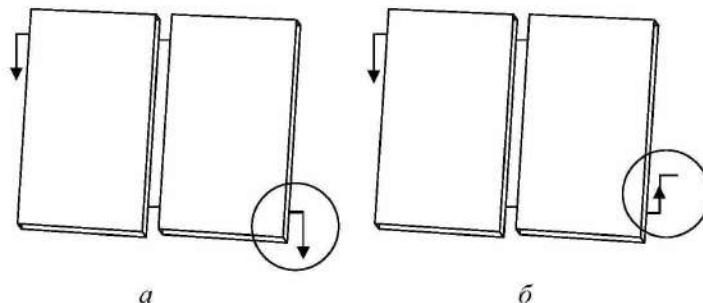


Рисунок 4 – Подключение подающего и обратного трубопроводов к СК:
а – верное подключение; б – неверное подключение

В результате проведенного опытного исследования работы гидравлической системы гелиоустановки с обратным дренажем определен момент возможного возникновения ГУ – это момент пуска и остановки насоса.

По представленной методике в научной статье «Расчет гидравлического удара в самодренируемых гелиоустановках» [14] в журнале «Общество и инновации» рассчитан полный напор во время пуска циркуляционного насоса, возникающий в трубопроводе при ГУ. Из приведенного анализа выводятся следующие условия для возникновения ГУ:

для полного ГУ –

$$T_y < \frac{2L}{c}; \quad (1)$$

для неполного ГУ –

$$T_y > \frac{2L}{c}, \quad (2)$$

где T_y – время закрытия запорного оборудования или пуска и остановки насоса, с; L – длина ударной волны, м; c – скорость ударной волны, м/с.

Получена формула для определения величины ГУ в СК с ОД в зависимости от его геометрических и режимных параметров и характеристик циркуляционного насоса:

$$h_{уд} = \frac{2L\nu_2}{gT_y}, \quad (3)$$

где $h_{уд}$ – полный напор во время (пуска) остановки циркуляционного насоса; L – длина ударной волны, м; ν_2 – скорость движения воды, м³/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; T_y – время, с.

Из источника [14] следует, что при одном и том же диаметре трубопровода самодренируемой солнечной системы гидравлический удар при пуске (остановке) насоса

будет тем сильнее, чем больше длина трубопровода L , чем выше скорость движения воды v_2 и чем быстрее разгоняется (тормозится) насос, время T_y .

Таким образом, из теоретического анализа и опытного исследования можно сделать вывод о том, что ГУ связан с ежедневными пуском и остановкой циркуляционного насоса в связи с резкими изменениями скорости движения потока рабочего вещества, на величину ГУ в солнечных самодренируемых системах существенно влияют электромеханические характеристики насоса. Величина ГУ в гелиосистеме при пуске циркуляционного насоса меньше, чем при остановке оборудования. Соответственно подбор оборудования для подобных систем должен осуществляться не только по параметрам напора и расхода, но и учитывать мощность, число оборотов, момент инерции ротора. Плавный пуск насоса, применение обратных клапанов в контуре и специальных автоматизированных запорных и регулирующих устройств, выполнение элементов гидравлической системы из эластичных материалов могут предотвратить возникновение гидравлических ударов.

Список литературы

1. Самодренируемые гелиоустановки / В. А. Бутузов, Е. В. Брянцева, В. В. Бутузов, И. С. Гнатюк. – Текст : непосредственный // Альтернативная энергетика и экология. – 2010. – № 2 (82) – С. 10–13.
2. Самодренируемые гелиоустановки: мировой и российский опыт разработки и сооружения / В. А. Бутузов, В. В. Бутузов, Е. В. Брянцева, И. С. Гнатюк. – Текст : непосредственный // Журнал СОК. – 2017. – № 2. – С. 53–57.
3. Botraev R., Louvet Y., Perers B., Furbo S., Vajen K. Drainback solar thermal systems: A review. *Solar Energy*, 2016, vol. 128, pp. 41-60.
4. Рашидов, Ю. К. Расчет гидравлического удара в традиционных самодренируемых гелиоустановках атмосферного типа / Ю. К. Рашидов, З. Х. Файзиев. – Текст : непосредственный // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность : сборник статей по материалам международной научно-практической конференции / Севастопольский государственный университет. – Севастополь, 2020. – С. 493–498.
5. ГОСТ Р 55617.1–2013. Возобновляемая энергетика. Установки солнечные термические и их компоненты. Солнечные коллекторы. Часть 1. Общие требования. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 16 с. – Текст : непосредственный.
6. Гнатюк, И. С. Повышение энергетической эффективности гелиоустановок горячего водоснабжения и создание новой конструкции солнечного коллектора : специальность 05.14.08 «Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Гнатюк Илья Сергеевич. – Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства. – Краснодар, 2016. – 132 с. – Текст : непосредственный.
7. Финиченко, А. Ю. Внедрение технических решений в гелиосистемы для эксплуатации в холодном климате / А. Ю. Финиченко, А. П. Полозкова. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы научной конференции / Омский государственный университет путей сообщения. – Омск, 2023. – С. 505–510.
8. Botraev R., Vajen K. Drainback systems: market overview. *Proc. of the XI Internationale Konferenz für solares Heizen und Kühlen*. Gleisdorf, Austria, 2014.
9. Патент США № US4336792 (A). Solar heating freeze protection system / Seiler E. N. – Текст : непосредственный.
10. Karshiev Sh.Sh. Prospective ways of self-draining helio structures in the use of solar energy. *Economy and society. International scientific and practical journal*, 2020, no. 5 (72), pp. 68-71.

11. Karshiev Sh.Sh. Improving Efficiency of Solar Heating Systems with Flat Solar Collectors: Key Reserves and Possible Ways of Their Implementation. *Int. J. Adv. Res. Sci. Eng. Technol.*, 2019, vol. 6, no. 8, pp. 10361-10364.
12. Botpaev R., Orozaliev J., Vajen K. Experimental Investigation of the Filling and Draining Processes of the Drainback System (Part 1). *Energy Procedia*, 2013 ISES Solar World Congress 57, 2014, pp. 2467-2476, doi:10.1016/j.egypro.2014.10.256.
13. Botpaev R., Vajen K. 2014b. Experimental investigation of the filling and draining processes of the drainback system (Part 2). *Proceedings of the EuroSun 2014 Conference, Aix-les-Bains, France*.
14. Рашидов, Ю. Расчет гидравлического удара в самодренируемых гелиоустановках / Ю. Рашидов, З. Файзиев, К. Рашидов. – Текст : непосредственный // Общество и инновации. – 2020. – № 1 (1/с). – С. 16–29.

References

1. Butuzov V.A., Bryantseva E.V., Butuzov V.V., Gnatyuk I.S. Self-draining solar installations. *Al'ternativnaia energetika i ekologija – Alternative energy and ecology*, 2010, vol. 2 (82), pp. 10-13 (In Russian).
2. Butuzov V.A., Butuzov V.V., Bryantseva E.V., Gnatyuk I.S. Modern solar installations: world and Russian experience in development and construction. *The Journal S.O.K. – The Journal Plumbing. Heating. Air conditioning. Energy saving. Renewable energy*, 2017, no. 2, pp. 53-57 (In Russian).
3. Botpaev R., Louvet Y., Perers B., Furbo S., Vajen K. Drainback solar thermal systems: A review. *Solar Energy*, 2016, vol. 128, pp. 41-60.
4. Rashidov Yu.K., Fayziev Z.Kh. [Calculation of hydraulic shock in traditional self-draining solar installations of atmospheric type]. *Ekologicheskaja, promyshlennaja i energeticheskaja bezopasnost' : sbornik statej po materialam mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Environmental, industrial and energy safety: Collection of articles based on the materials of the international scientific and practical conference]. Sevastopol, 2020, pp. 493-498 (In Russian).
5. National Standard 55617.1-2013 Renewable energy. Solar thermal installations and their components. Solar collectors. Moscow, Standartinform, 2014, 16 p. (In Russian).
6. Gnatyuk I.S. *Povyshenie energeticheskoi effektivnosti gelioustanovok goriachego vodosnabzhenija i sozdanie novoi konstruktsii solnechnogo kollektora* (Increasing the energy efficiency of solar hot water installations and creating a new solar collector design). Doctor's thesis, Krasnodar, Russian Research Institute for Electrification of Agriculture, 2016, 132 p. (In Russian).
7. Finichenko A. Yu., Polozkova A. P. [Introduction of technical solutions in solar systems for operation in cold climates]. *Innovatsionnye proekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte : materialy nauchnoi konferentsii* [Innovative projects and technologies in education, industry and transport: materials of the scientific conference]. Omsk, 2023, pp. 505-510 (In Russian).
8. Botpaev R., Vajen K. Drainback systems: market overview. *Proc. of the XI Internationale Konferenz für solares Heizen und Kühlen*. Gleisdorf, Austria, 2014.
9. Seiler E.N. Patent USA № US4336792 (A).
10. Karshiev Sh.Sh. Prospective ways of self-draining helio structures in the use of solar energy. *Economy and society. International scientific and practical journal*, 2020, no. 5 (72), pp. 68-71.
11. Karshiev Sh.Sh. Improving Efficiency of Solar Heating Systems with Flat Solar Collectors: Key Reserves and Possible Ways of Their Implementation. *Int. J. Adv. Res. Sci. Eng. Technol.*, 2019, vol. 6, no. 8, pp. 10361-10364.
12. Botpaev R., Orozaliev J., Vajen K. Experimental Investigation of the Filling and Draining Processes of the Drainback System (Part 1). *Energy Procedia*, 2013 ISES Solar World Congress 57, 2014, pp. 2467-2476, doi:10.1016/j.egypro.2014.10.256.
13. Botpaev R., Vajen K. 2014b. Experimental investigation of the filling and draining processes of the drainback system (Part 2). *Proceedings of the EuroSun 2014 Conference, Aix-les-Bains, France*.

Электроэнергетика

14. Rashidov Yu., Fayziev Z., Rashidov K. Calculation of hydraulic shock in self-draining solar installations. *Obshchestvo i innovatsii – Society and innovation*, 2020, vol. 1 (1/s), pp. 16-29 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Финиченко Александра Юрьевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

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

Тел.: +7 (3812) 31-06-23.

E-mail: finichenko@mail.ru

Полозкова Анастасия Петровна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Студентка кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (983) 660-07-63.

E-mail: nastyapolozkova6@gmail.com

Гусаров Артем Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Старший преподаватель кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-23.

E-mail: kafedrateplo@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Финиченко, А. Ю. Исследование работы гидравлической системы солнечного коллектора с обратным дренажем / А. Ю. Финиченко, А. П. Полозкова, А. С. Гусаров. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 4 (56). – С. 82 – 90.

УДК 621.316.729

Е. Ю. Сапцына, Р. Б. Абеуов

Томский политехнический университет (ТПУ), г. Томск, Российская Федерация

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ТОЧНОЙ СИНХРОНIZАЦИИ ЭНЕРГОРАЙОНА С СЕТЬЮ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Аннотация. В настоящее время большое распространение в Единой энергетической системе Российской Федерации получили объекты распределенной генерации, эксплуатируемые в составе энергорайонов, работающих параллельно с сетью энергосистемы. Для таких энергорайонов актуальной является задача обратного включения на параллельную работу с сетью энергосистемы после выделения энергорайонов в островной режим работы при возникновении системных аварий. Сейчас отсутствуют эффективные алгоритмы автоматического управления для устройств синхронизации энергорайонов с сетью энергосистемы, позволяющие управлять процессом синхронизации. Целью исследования является разработка алгоритма управления для автоматических устройств точной синхронизации, позволяющих осуществлять включение

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Finichenko Alexandra Yurievna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Thermal power engineering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-23.

E-mail: finichenko@mail.ru

Polozkova Anastasia Petrovna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Student of the Department of Heat Power Engineering, OSTU.

Phone: +7 (983) 660-07-63.

E-mail: nastyapolozkova6@gmail.com

Gusarov Artem Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Senior Lecturer of the department «thermal power engineering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-23.

E-mail: kafedrateplo@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Finichenko A.Yu., Polozkova A.P., Gusarov A.S. Study of the operation of the hydraulic system of a solar collector with reverse drainage. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 4 (56), pp. 82-90 (In Russian).

энергорайона на параллельную работу с сетью энергосистемы. В рамках данных исследований рассматривается возможность разработки подобного алгоритма на основании принципа управления по программным траекториям движения технических объектов, суть которого заключается в разделении задачи синтеза систем управления на подзадачу построения программных (желаемых) траекторий движения технических объектов и подзадачу формирования обеспечивающих эти траектории управлений. На основе этого принципа выведены математические выражения для расчета параметров программных траекторий движения и обеспечивающих эти траектории управлений в процессе точной синхронизации. С использованием данного математического аппарата разработана схема алгоритма синхронизации и выполнена его атробация в подсистеме имитационного математического моделирования Matlab Simulink. Результаты моделирования показали, что разработанный алгоритм управления в заданное время и с достаточной точностью позволяет осуществить точную синхронизацию энергорайона с сетью энергосистемы. Предложенный алгоритм управления может применяться при разработке современных устройств точной автоматической синхронизации энергорайонов с сетью энергосистемы, позволяющих эффективно управлять процессом синхронизации.

Ключевые слова: синхронизация, энергорайон, электроэнергетическая система, устройство точной синхронизации, распределенная генерация, алгоритм.

Elizaveta Yu. Sapcyna, Renat B. Abeuov

Tomsk Polytechnic University (TPU), Tomsk, the Russian Federation

CONTROL ALGORITHM OF PRECISION SYNCHRONIZATION PROCESS FOR POWER DISTRICT WITH ELECTRIC POWER SYSTEM

Abstract. *Distributed generation has become widespread in the United Energy System of Russia. Distributed generation facilities are usually operated as part of power districts. Such power districts switch to an island mode of operation in the event of system fault. After the elimination of the system fault for the island mode the issue of connecting to interconnected operation with the electric power system. At present, there are no effective automatic control algorithms for devices for synchronizing power districts with the electric power system that allow you to control the synchronization process. The purpose of the study is to develop an algorithm for controlling the process of precise synchronization. As part of the research, the possibility of developing such an algorithm based on the principle of control along programmed trajectory movement of technical objects. The essence of the principle of control along programmed trajectory movement is to divide the task of synthesizing control systems into a subtask of constructing programmed (desired) trajectory movement of technical objects and a subtask of forming controls these trajectories. On the basis of this principle, mathematical expressions are obtained for calculating the parameters of programmed trajectory movement. Using the mathematical apparatus developed a scheme of the synchronization algorithm and tested in the subsystem of simulation mathematical modeling Matlab Simulink. The simulation results showed that the developed algorithm allows precision synchronization of the power district with the electric power system at a given time and with sufficient accuracy.*

Keywords: synchronization, power district, electric power system, precision synchronization device, distributed generation, algorithm.

Одним из наиболее динамично развивающихся направлений современной энергетики является распределенная генерация [1], которая признана одним из самых эффективных средств, помогающих справиться с интенсивным ростом электрической нагрузки в крупных городах и районах. В настоящее время в России наибольшее распространение получают электростанции малой и средней мощности, использующие в качестве топлива попутный или природный газ, к ним относятся газотурбинные и газопоршневые электростанции. Такие электростанции, как правило, эксплуатируются в составе энергорайонов, которые в свою очередь работают либо параллельно с сетью энергосистемы, либо в островном режиме.

Параллельная работа объектов распределенной генерации с сетью энергосистемы в нормальном режиме позволяет покрывать дефицит генерируемой мощности в энергорайоне, а в аварийных режимах сохранять электроснабжение потребителей при отключении объектов распределенной генерации. При параллельной работе энергорайона с сетью энергосистемы нередки случаи его выделения в островной режим работы, что, как правило, происходит при возникновении системных аварий в энергосистеме. После устранения таких аварий энергорайон снова включается на параллельную работу с сетью энергосистемы посредством синхронизации.

Электроэнергетика

Синхронизация с сетью энергосистемы осуществляется включением выключателей в точках выделения энергорайона в островной режим работы. Такими точками, как правило, являются шины центров питания электрической сети энергосистемы.

При синхронизации энергорайонов с сетью энергосистемы в момент включения выключателя должны выполняться следующие условия точной синхронизации:

- равенство напряжений на шинах энергорайона и сети энергосистемы;
- совпадение фаз напряжений энергорайона и сети энергосистемы;
- равенство частот энергорайона и сети энергосистемы.

Первое условие – равенство напряжений – обеспечивается путем регулирования тока возбуждения синхронного генератора энергорайона. Выполнение второго и третьего условий может быть достигнуто изменением врачающего момента на валу турбины или двигателя генерирующего агрегата энергорайона.

Включение генератора на параллельную работу с сетью энергосистемы при значительном неравенстве напряжений и большой разности фаз может вызвать появление в генераторе уравнительного тока и связанных с ним последствий. Особенно опасно включение при несовпадении напряжений по фазе. В наиболее тяжелом случае, когда напряжения на шинах генератора и сети окажутся сдвинутыми по фазе на 180° , а мощность энергосистемы во много раз будет превышать мощность генератора, уравнительный ток в момент включения может в два раза превысить ударный ток трехфазного короткого замыкания на выводах генератора [2].

При соблюдении всех необходимых условий точной синхронизации генератора с сетью энергосистемы уравнительный ток не возникнет. Однако точное совпадение трех указанных выше условий, особенно совпадение фаз напряжений и равенство частот, может привести к значительному замедлению процесса синхронизации, поскольку достичь положения, при котором частоты генератора и сети энергорайона уравнялись именно в тот момент, когда напряжения совпадут по фазе, достаточно трудно.

Основными устройствами для точной автоматической синхронизации генераторов с сетью энергосистемы, позволяющими обеспечивать выполнение необходимых условий синхронизации, в настоящее время являются автоматические синхронизаторы (устройства синхронизации). Такие устройства имеют автоматические уравнители частоты и напряжения, воздействующие на цепи возбуждения и регулирования частоты вращения турбины генератора.

Принцип работы автоматических синхронизаторов заключается в подгонке напряжения и частоты генератора к напряжению и частоте сети энергосистемы, а также в ожидании момента времени, при котором угол разности фаз между векторами ЭДС генератора и напряжения сети попадает в допустимый диапазон, после чего подается команда на включение генератора в сеть энергосистемы.

Однако ввиду того, что для синхронизации энергорайонов с сетью энергосистемы устройства синхронизации устанавливаются на шинах центров питания электрических сетей порой за несколько десятков километров от генерирующих агрегатов энергорайона, возможность регулирования напряжения и частоты на них отсутствует. В связи с этим при осуществлении включения на параллельную работу энергорайона с сетью энергосистемы существующие автоматические синхронизаторы генераторов, применяемые для этих целей, из трех условий точной синхронизации могут обеспечивать только одно – контроль угла разности фаз. Фактически устройства не управляют процессом синхронизации, а ожидают попадания угла разности фаз в допустимый для синхронизации диапазон, после чего подается команда на включение энергорайона в сеть энергосистемы [3].

Применение для синхронизации энергорайонов с сетью энергосистемы автоматических устройств синхронизации генераторов, использующих в качестве способа управления ожидание совпадения угла разности фаз, является неэффективным, так как не позволяет обеспечить быстрое и качественное включение энергорайона на параллельную работу с сетью энергосистемы. Повышение эффективности автоматических синхронизаторов может быть

достигнуто за счет появления более эффективных алгоритмов управления. В данной области ведется ряд исследований. Так, в патенте [4] предложен способ управления процессом синхронизации энергосистемы и отделившегося в аварийном режиме энергорайона посредством отключения части нагрузки потребителей энергорайона. В патенте [5] описан способ синхронизации частей электрической сети с множественными разрывами, в соответствии с которым измеряют и регулируют напряжение и частоту напряжения одной части сети в направлении сближения с напряжением и частотой второй части сети, измеряют и регулируют угол между напряжениями частей сети до достижения нулевого или близкого к нулевому значений. В статье [6] рассмотрен алгоритм работы системы синхронизации, целью которого является восстановление параллельной работы «островов», образовавшихся в результате отключения системы электроснабжения от основного пункта питания. Анализ представленных исследований в области синхронизации энергорайонов с энергосистемой показывает разносторонние подходы к решению данной проблемы.

Одним из наиболее эффективных алгоритмов синхронизации может быть алгоритм, разработанный на базе общего принципа управления по программным траекториям движения (ПТД) технических объектов [7], развивающегося в Томском политехническом университете, приложенного к задаче управления динамическими переходами энергосистем [8], в основном к задаче синтеза устройств точной синхронизации генераторов [9, 10].

Суть данного принципа заключается в разделении задачи синтеза систем управления на подзадачу построения программных (желаемых) траекторий движения технических объектов и подзадачу формирования управлений, обеспечивающих эти траектории. Предложен алгоритм управления процессом точной синхронизации энергорайона с сетью энергосистемы, сформированный на этом принципе.

В основу предложенного алгоритма заложено формирование программной траектории движения, представляющей собой рассчитанное (желаемое) движение вектора напряжения генератора синхронизируемого энергорайона. Основным целевым условием построения ПТД является достижение нулевых значений управляемых параметров.

В качестве управляемых параметров в процессе синхронизации приняты небаланс мощностей на валу $\Delta P_y(t)$, угол вылета $\delta_y(t)$ и угловая относительная скорость $v_y(t)$ ротора генератора энергорайона с постоянной инерции T_J . Связь между этими управляемыми параметрами однозначно определяется через известную [11] подсистему дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \dot{\delta}_y(t) = \dot{v}_y(t); \\ \dot{v}_y(t) = \frac{\omega_0}{T_J} \Delta P_y(t), \end{cases}$$

представленную в форме, соответствующей размерностям параметров: t – с; T_J – с; δ_y – рад; v_y – рад/с; ΔP_y – отн. ед; ω_0 – рад/с.

Объектом управления в рассматриваемом случае является изображающая точка $X_y = \text{colon}[t, \Delta P_y, v_y, \delta_y]$, которой искомым управлением $u(t)$ предписывается перемещение по ПТД $X_p = \text{colon}[t, \Delta P_p, v_p, \delta_p]$ в динамической среде энергорайона. Для построения ПТД используются приведенные выше уравнения, так как $X_p(t)$ – это одна из траекторий движения объекта.

Координаты изображающей точки, движущейся по ПТД, $X_p = \text{colon}[t, \Delta P_p, v_p, \delta_p]$ отражают пространственное и энергетическое состояния ротора генератора энергорайона в каждый момент времени.

Задача состоит в определении управлений, обеспечивающих движение ротора генератора по программной траектории $X_p = \text{colon} [t, \Delta P_p, v_p, \delta_p]$.

В силу уравнений из приведенной выше системы программную траекторию движения представляет любая из зависимостей $\Delta P_p, v_p, \delta_p$ либо любая пара этих зависимостей. Во втором случае параметр, не составляющий пару, можно рассматривать в качестве управления $u(t)$, обеспечивающего движение по ПТД. Наиболее удобно на данном этапе принять в качестве управления небаланс мощности на валу, т. е. считать, что $u(t) = \Delta P_p$.

Пример построения ПТД генератора синхронизируемого энергорайона представлен на рисунке 1.

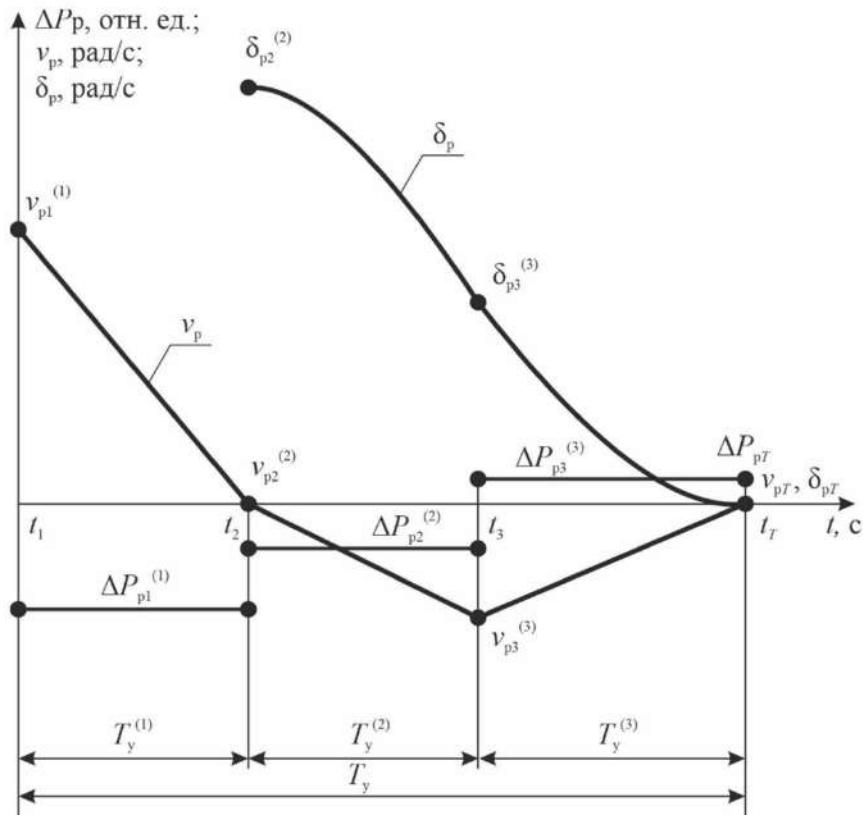


Рисунок 1 – Пример построения ПТД генератора синхронизируемого энергорайона

В начале первого интервала управления t_1 замеряется фактическая относительная скорость $v_p^{(1)}$ ротора генератора, работающего в составе энергорайона, и для построения программной траектории движения принимается, что $v_{p1}^{(1)} = v_p^{(1)}$.

Генератор к моменту включения энергорайона на параллельную работу с сетью энергосистемы должен подойти с желаемыми параметрами, представленными в виде совокупности значений t_T, δ_{pT}, v_{pT} и ΔP_{pT} . Границные значения параметров δ_{pT}, v_{pT} и ΔP_{pT} в момент t_T определяются целью управления. В рассматриваемом случае целью автоматического управления является приведение синхронизируемого генератора энергорайона к конечному моменту времени t_T с нулевыми значениями относительных потенциальной и кинетической энергий ротора, которому соответствуют условия $\delta_{pT} = 0$, $v_{pT} = 0$ и $\Delta P_{pT} = 0$.

Электроэнергетика

Принимается, что небаланс мощностей ΔP_{pt} в момент t_T может быть обнулен скачком. Границные значения угла δ_{pt} и скорости v_{pt} в момент t_T определяются условиями точной синхронизации в конце интервала управления. При таких конечных условиях построения ПТД сводится к типовой задаче управления с целью перевода управляемого объекта в заданное конечное состояние. Решение этой задачи в рассматриваемом случае осуществляется на трех интервалах управления.

На первом интервале управления $[t_1, t_2]$ достигается нулевое значение скорости: $v_{p2}^{(2)} = 0$, при этом угол $\delta_{p2}^{(2)}$ принимает некоторое произвольное значение.

Задача перевода угла от произвольного $\delta_{p2}^{(2)}$ к нулевому значению решается на втором и третьем интервалах управления. Для этого используется двухполярное управление типа «затормозить-ускорить» или «ускорить-затормозить». При этом будет изменяться и скорость, так как она является производной от угла по времени, которая к концу интервала управления должна получить нулевое значение.

В таблице 1 приведены расчетные выражения для определения конечных и текущих значений параметров ПТД $\Delta P_p(t)$, $v_p(t)$, $\delta_p(t)$ на интервалах управления управляемого генератора энергорайона в процессе синхронизации с сетью энергосистемы.

Таблица 1 – Расчетные выражения для определения конечных и текущих значений параметров ПТД и управлений

№ п/п	Определение интервалов управления и управлений	Определение текущих и конечных значений угла на интервалах	Определение текущих и конечных значений относительной скорости на интервалах
1	Задано: $T_y^{(1)}$, t_1 , t_T , ω_0 , T_J . Вычисляются: $t_2 = t_1 + T_y^{(1)}$, $\Delta P_{p1}^{(1)} = -\frac{T_J v_{p1}^{(1)}}{\omega_0 T_y^{(1)}}.$	Текущие значения угла на первом интервале управления не вычисляются. В конце первого интервала управления измеряется реальное значение угла $\delta_{p2}^{(2)}$.	$v_p = v_{p1}^{(1)} + \frac{\omega_0}{T_J} \Delta P_{p1}^{(1)} (t - t_1),$ $v_{p2}^{(2)} = v_{p1}^{(1)} + \frac{\omega_0}{T_J} \Delta P_{p1}^{(1)} T_y^{(1)}.$
2	Задано: $T_y^{(2)}$. Вычисляются: $t_3 = t_2 + T_y^{(2)}$, $\Delta P_{p2}^{(2)} = \frac{2T_J (\delta_{pt} - \delta_{p2}^{(2)})}{\omega_0 T_y^{(2)} (T_y^{(2)} - T_y^{(1)})}.$	$\delta_p = \delta_{p2}^{(2)} + v_{p2}^{(2)} (t - t_2) +$ $+ \frac{\omega_0}{2T_J} \Delta P_{p2}^{(2)} (t - t_2)^2,$ $\delta_{p3}^{(3)} = \delta_{p2}^{(2)} + v_{p2}^{(2)} T_y^{(2)} +$ $+ \frac{\omega_0}{2T_J} \Delta P_{p2}^{(2)} T_y^{(2)2}.$	$v_p = v_{p2}^{(2)} + \frac{\omega_0}{T_J} \Delta P_{p2}^{(2)} (t - t_2),$ $v_{p3}^{(3)} = v_{p2}^{(2)} + \frac{\omega_0}{T_J} \Delta P_{p2}^{(2)} T_y^{(2)}.$
3	Вычисляются: $T_y^{(3)} = T_y - T_y^{(1)} - T_y^{(2)},$ $\Delta P_{p3}^{(3)} = -\frac{\Delta P_{p2}^{(2)} T_y^{(2)}}{T_y^{(3)}}.$	$\delta_p = \delta_{p3}^{(3)} + v_{p3}^{(3)} (t - t_3) +$ $+ \frac{\omega_0}{2T_J} \Delta P_{p3}^{(3)} (t - t_3)^2,$ $\delta_{pT} = \delta_{p3}^{(3)} + v_{p3}^{(3)} T_y^{(3)} +$ $+ \frac{\omega_0}{2T_J} \Delta P_{p3}^{(3)} T_y^{(3)2}.$	$v_p = v_{p3}^{(3)} + \frac{\omega_0}{T_J} \Delta P_{p3}^{(3)} (t - t_3),$ $v_{pT} = v_{p3}^{(3)} + \frac{\omega_0}{T_J} \Delta P_{p3}^{(3)} T_y^{(3)}.$

В качестве исходных данных для расчета параметров ПТД и управлений принимаются численные значения постоянной инерции T_J , синхронной частоты ω_0 , моментов времени t_1 , t_T , угла $\delta_{p2}^{(2)}$ (измеряется), относительной скорости $v_{p1}^{(1)}$ (измеряется) и длительность первого $T_y^{(1)}$ и второго $T_y^{(2)}$ интервалов управления.

Выражения, представленные в таблице 1, получены на основе решения подсистемы уравнений, приведенных в начале статьи при заданных граничных значениях параметров ПТД $x_{pt} = \text{colon} [t_T, \Delta P_{pt}, v_{pt}, \delta_{pt}]$ всего интервала управления.

В таблице 1 и на рисунке 1 обозначено: ω_0 , рад/с, – синхронная частота; T_J , с, – постоянная инерции ротора управляемого генератора; t_1, t_2, t_3, t_T , с, – моменты времени интервалов управления; $T_y^{(i)}$, с, $i = \overline{1, 3}$ – длительность интервалов управления; $\Delta P_{pi}^{(i)}$ [отн. ед.], $i = \overline{1, 3}$ – небалансы мощностей в конечные моменты времени интервалов управления; $v_p^{(i)}(t), v_{pi}^{(i)}$, $\delta_p^{(i)}(t), \delta_{pi}^{(i)}$, $i = \overline{1, 3}$ – текущие и конечные значения относительной скорости и, соответственно, угла на интервалах управления.

Простота расчетных выражений позволяет оперативно доопределить граничные значения параметров ПТД на интервалах управления и при помощи них вычислить желаемые, текущие значения угла и относительной скорости ротора генератора и объемы управлений.

На основе расчетных выражений для определения ПТД, приведенных в таблице 1, сформирован алгоритм работы устройства автоматической синхронизации. Алгоритм управления процессом точной синхронизации энергорайона с сетью энергосистемы приведен на рисунке 2.

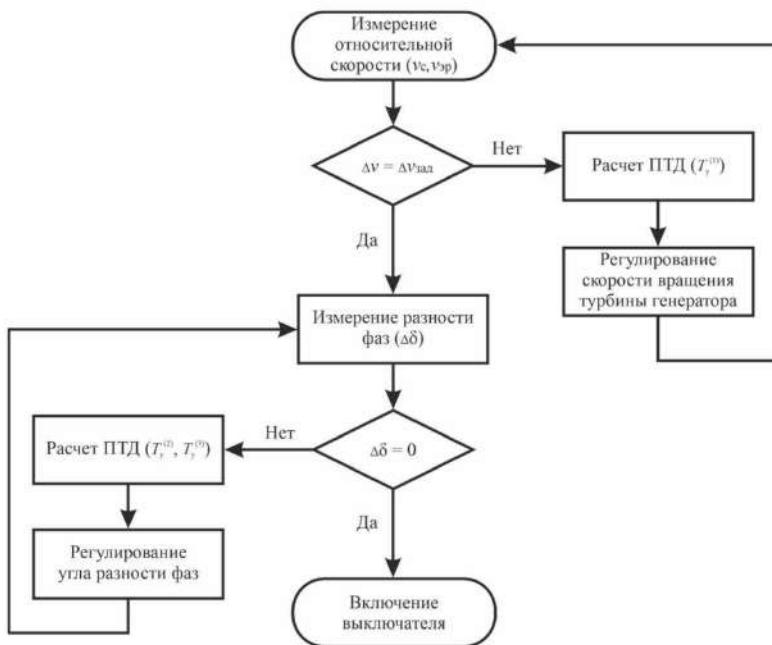


Рисунок 2 – Алгоритм управления процессом точной синхронизации энергорайона с сетью энергосистемы

Действие приведенного алгоритма направлено на осуществление управления процессом синхронизации, позволяющим с достаточными скоростью и точностью обеспечить включение энергорайона на параллельную работу с сетью энергосистемы. Исходными данными для действия алгоритма являются непрерывно измеряемые параметры режимов энергорайона и энергосистемы. К таким параметрам относятся значения относительной скорости и фазового угла.

На первом шаге алгоритма на основании измеренных параметров осуществляется сравнение значений относительных скоростей. Сравнение осуществляется между значениями разности относительных скоростей сети энергосистемы (v_c) и энергорайона (v_{cp}) и заданным значением относительной скорости ($v_{зад}$). Данный шаг алгоритма имеет два альтернативных исхода и подразумевает выбор только одного из них. Если значение разности относительных скоростей энергосистемы и энергорайона равно заданному значению, то дальнейшее действие алгоритма направлено на сравнение фазовых углов. Если значение разности относительных

Электроэнергетика

скоростей энергосистемы и энергорайона отлично от заданного значения, то действие алгоритма направлено на приведение относительной скорости энергорайона к относительной скорости энергосистемы путем управления по ПТД. Первый шаг алгоритма реализуется на первом интервале управления.

На втором шаге алгоритма на основании измеренных параметров осуществляется сравнение значений фазовых углов. Сравнение осуществляется между значениями фазового угла сети энергосистемы и энергорайона. Данный шаг алгоритма также имеет два альтернативных исхода и подразумевает выбор только одного из них. Если разность фазовых углов сети энергосистемы и энергорайона не образует нулевого значения, то действие алгоритма направлено на приведение фазового угла энергорайона к сети энергосистемы путем управления по ПТД. Если разность фазовых углов соответствует нулевому значению, то действие алгоритма считается завершенным, подается сигнал на синхронизацию энергорайона с сетью энергосистемы посредством включения линейного выключателя. Второй шаг алгоритма реализуется на втором и третьем интервалах управления.

Апробация изложенного алгоритма управления процессом точной синхронизации энергорайона с сетью энергосистемы была осуществлена посредством моделирования в подсистеме имитационного математического моделирования Matlab Simulink. Моделирование выполнялось на примере схемы электрической сети, приведенной на рисунке 3.

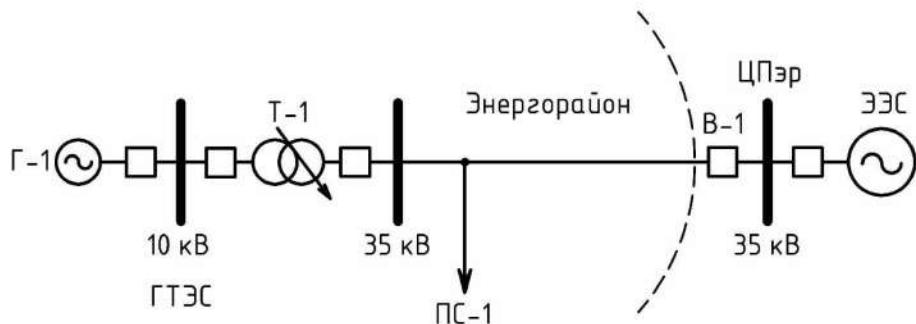


Рисунок 3 – Схема электрической сети

Рассматриваемая схема электрической сети представляет собой энергорайон, работающий параллельно с электроэнергетической системой (ЭЭС) через шины напряжением 35 кВ, которые в свою очередь являются центром питания данного энергорайона (ЦПэр).

В ходе эксперимента проводилось моделирование процесса синхронизации энергорайона, ранее выделившегося в островной режим работы в результате системной аварии в ЭЭС. Расчетная модель электрической сети и системы синхронизации, сформированная в подсистеме имитационного математического моделирования Matlab Simulink, представлена на рисунке 4.

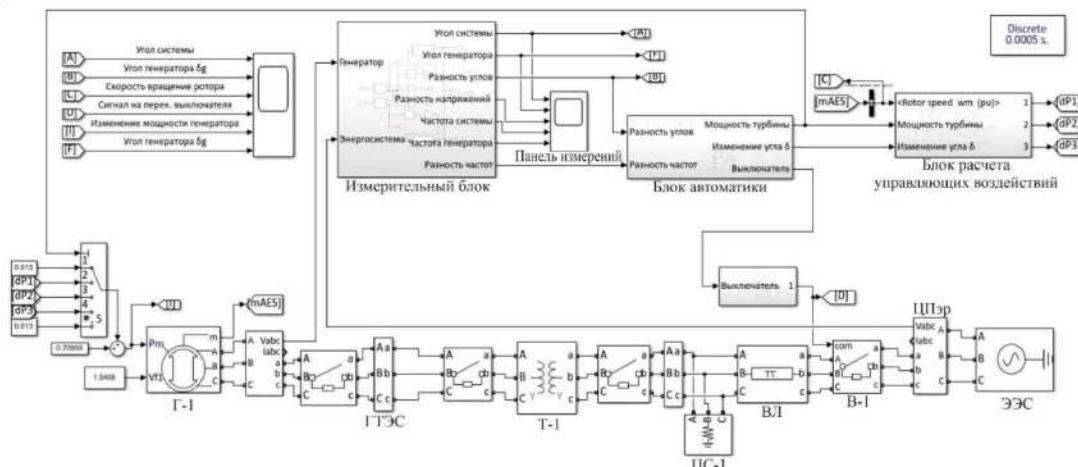


Рисунок 4 – Расчетная модель электрической сети и системы синхронизации в среде Matlab Simulink

Электроэнергетика

Расчетная модель электрической сети состоит из модели электрической сети, приведенной на рисунке 3, и системы синхронизации, состоящей из измерительного блока, блока автоматики и блока расчета управляющих воздействий.

Блок измерений является основополагающим блоком для действия алгоритма управления процессом точной синхронизации энергорайона с сетью энергосистемы. Данный блок необходим для определения разности напряжений, частот и углов энергорайона и сети энергосистемы.

Блок автоматики предназначен для расчета и построения программных траекторий движения по заданному алгоритму.

Блок расчета управляющих воздействий осуществляет расчет и выдачу управлений на регулятор скорости вращения турбины генерирующего агрегата энергорайона, воздействуя на изменение относительной скорости и фазового угла в соответствии с ПТД.

В качестве исходных данных для моделирования алгоритма управления процессом точной синхронизации энергорайона с сетью энергосистемы приняты следующие начальные заданные условия: $T_J = 6,5$ с; $\omega_0 = 314$ рад/с; $t_1 = 0$ с; $t_T = 5$ с; $T_y^{(1)} = 2,5$ с и $T_y^{(2)} = 1,5$ с.

Длительность процесса синхронизации для генерирующих агрегатов различных типов может составлять от пяти до десятков секунд [12], в рамках данных исследований она принята равной 5 с, что характерно для газопоршневых агрегатов.

Синхронизация энергорайона с сетью энергосистемы выполнялась при начальном значении частоты 50,5 Гц и значении угла 150°, при этом значение частоты и угла энергосистемы приняты эталонными: 50 Гц и 0° соответственно. На рисунках 5 и 6 приведены результаты моделирования процесса синхронизации.

На первом интервале управления происходит измерение начальной относительной скорости генератора энергорайона, расчет и реализация управления $\Delta P_{p1}^{(1)}$, в результате чего наблюдается уменьшение разности относительных скоростей энергорайона и сети энергосистемы до нуля. В начале второго интервала управления в момент приведения разности относительных скоростей к нулю происходит измерение значения разности углов, расчет и выдача управления $\Delta P_{p2}^{(2)}$ на турбину генерирующего агрегата, регулирование угла ротора генератора энергорайона в сторону его уменьшения. На третьем интервале посредством реализации управления $\Delta P_{p3}^{(3)}$ осуществляется подведение разности углов и относительной скорости к нулевым значениям. В конце процесса управления в момент включения выключателя В-1 выполняется синхронизация энергорайона с сетью энергосистемы.

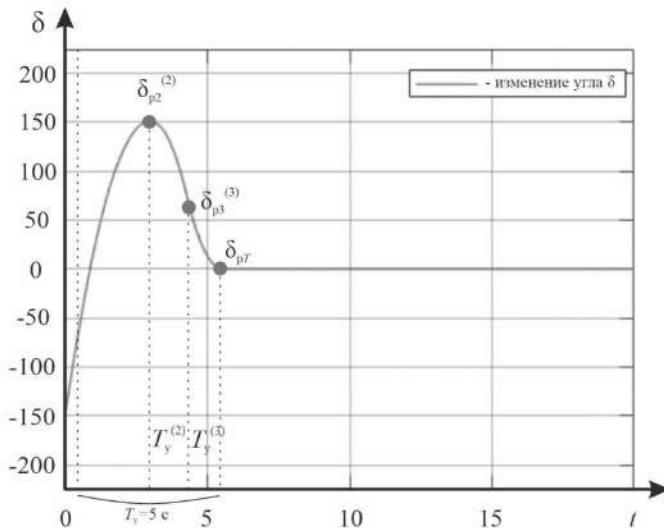


Рисунок 5 – Оциллограмма изменения угла управляемого генератора энергорайона в процессе синхронизации с сетью энергосистемы при начальном значении частоты и угла энергорайона 50,5 Гц и 150°

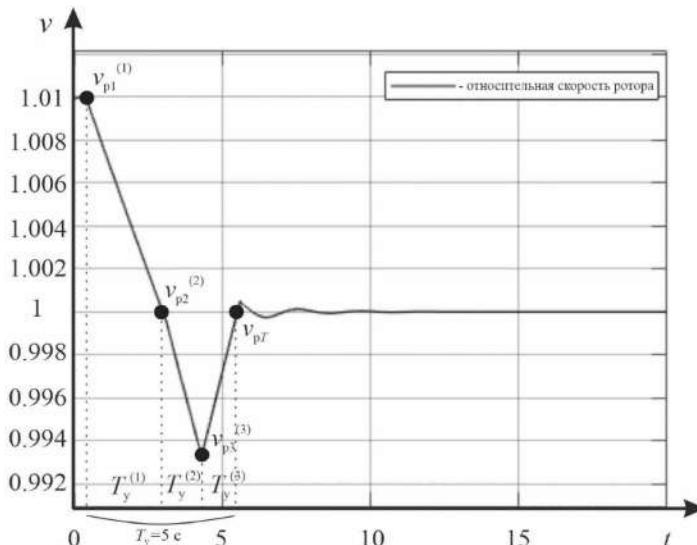


Рисунок 6 – Оциллограмма изменения относительной скорости вращения ротора управляемого генератора энергорайона в процессе синхронизации с сетью энергосистемы при начальном значении частоты и угла энергорайона 50,5 Гц и 150°

Результаты моделирования показали, что разработанный алгоритм обеспечивает эффективное управление процессом точной синхронизации энергорайона с сетью энергосистемы, обеспечивая включение энергорайона на параллельную работу с сетью энергосистемы в заданное время и с высокой точностью в строгом соответствии с программной траекторией движения.

Проведенные исследования показали, что разработанный алгоритм управления процессом точной синхронизации энергорайона с сетью энергосистемы является достаточно эффективным и может быть положен в основу современных устройств точной синхронизации энергорайонов, позволяющих управлять основными режимными параметрами для выполнения условий точной синхронизации.

Список литературы

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. № 1523-р. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. – Собрание законодательства Российской Федерации. – 2020. – Текст : непосредственный.
2. Грудинский, П. Г. Техническая эксплуатация основного электрооборудования станций и подстанций : учебное пособие / П. Г. Грудинский, С. А. Мандрыкин, М. С. Улицкий; под ред. П. И. Устинова. – Москва : Энергия, 1974. – 576 с. – Текст : непосредственный.
3. Овчаренко, Н. И. Автоматика энергосистем : учебник / Н. И. Овчаренко; под ред. А. Ф. Дьякова. – Москва : МЭИ, 2007. – 467 с. – Текст : непосредственный.
4. Патент 1647765 СССР, Н02J3/42. Способ синхронизации энергосистемы и отделившегося в аварийном режиме энергорайона : № 4692221/07 : заявлено : 15.05.1989 : опубликовано : 07.05.1991 / Калентионок Е. В., Файбисович В. А. – 5 с. – Текст : непосредственный.
5. Патент № 2686079 Российской Федерации, МПК Н02J3/08 (2006.01). Способ синхронизации частей электрической сети : № 2017141897, 2017 : заявлено 30.11.2017 : опубликовано 24.04.2019 / Фишов А. Г., Армееев Д. В., Сердюков О. В. – 5 с. – Текст : непосредственный.
6. Азорин, А. Ю. Автоматическая синхронизация «Островов» при восстановлении систем электроснабжения с распределенной генерацией / А. Ю. Азорин. – Текст : непосредственный // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22. – № 8 (139). – С. 83–94.

7. Тимофеев, А. В. Построение адаптивных систем управления программным движением / А. В. Тимофеев. – Ленинград : Энергия, 1980. – 88 с. – Текст : непосредственный.
8. Хрущев, Ю. В. Управление движением генераторов в динамических переходах энергосистем / Ю. В. Хрущев. – Томск: СТТ, 2001. – 310 с. – Текст : непосредственный.
9. Абеуов, Р. Б. Автоматическое управление процессом точной синхронизации генераторов с сетью по программным траекториям движения / Р. Б. Абеуов, Ю. В. Хрущев. – Текст : непосредственный // Электричество. – 2009. – № 12. – С. 32–36.
10. Беляев, Н. А. Алгоритмы эталонной модели и регулятора в задаче синтеза адаптивного устройства синхронизации генератора с электрической сетью / Н. А. Беляев, Ю. В. Хрущев. – Текст : непосредственный // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока.– 2015. – № 1. – С. 208–213.
11. Абеуов, Р. Б. Синтез адаптивных синхронизаторов для мини-энергосистем с управлением по программным траекториям движения генераторов и подсистем : специальность 05.14.02 «Электростанции и электроэнергетические системы» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Абеуов Ренат Болтабаевич ; Томский политехнический университет. – Томск, 2010. – 142 с. – Текст : непосредственный.
12. Павлов, Г. М. Автоматика энергосистем / Г. М. Павлов, Г. В. Меркульев. – Санкт-Петербург : Папирус, 2001. – 387 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Decree of the Government of the Russian Federation June 9, 2020 1523-r. Energy strategy of the Russian Federation for the period up to 2035. Collection of legislation of the Russian Federation Moscow, 2020 (In Russian).
2. Grudinskiy P.G. *Tehnicheskaja jekspluatacija osnovnogo jelektrooborudovanija stancij i podstancij : uchebnoe posobie* [Technical operation of the main electrical equipment of stations and substations: textbook]. Moscow, Energiia Publ., 1974, 576 p. (In Russian).
3. Ovcharenko N.I. *Avtomatika jenergosistem : uchebnik* [Automation of power systems: textbook]. Moscow, MEI Publ., 2007, 467 p. (In Russian).
4. Kalentionok E.V., Faibisovich V.A. *Patent SU 1647765 A1*, 07.05.1991.
5. Fishov A.G., Armeev D.V., Serdiukov O.V. *Patent RU 2686079 C1*, 24.04.2019.
6. Azorin A.Yu. Automatic synchronization of «Islands» at restoration of power supply systems with distributed generation. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2018, vol. 22, no. 8 (139), pp. 83-94 (In Russian).
7. Timofeev A.V. *Postroenie adaptivnyh sistem upravlenija programmnym dvizheniem* [Building adaptive motion control systems]. Leningrad, Energiia Publ., 1980, 88 p. (In Russian).
8. Khrushchev Yu.V. *Upravlenie dvizheniem generatorov v dinamicheskikh perehodah jenergosistem* [Controlling the movement of generators in dynamic transitions of power systems]. Tomsk, СТТ Publ., 2001, 310 p. (In Russian).
9. Abeuov R.B., Khrushchev Yu.V. Automatic control of the process of precise synchronization of generators with the network according to programmed motion trajectories. *Elektrичество – Electricity*, 2009, no. 12, pp. 32-36 (In Russian).
10. Belyaev H.A., Khrushchev Yu.V. Regulator and reference model block algorithms of adaptive generator-to-grid synchronizer development. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka – Scientific problems of transport in Siberia and the Far East*, 2015, no. 1, pp. 208-213 (In Russian).
11. Abeuov R.B. *Sintez adaptivnyh sinchronizatorov dlja mini-jenergosistem s upravleniem po programmnym traektorijam dvizhenija generatorov i podsistem* (Synthesis of adaptive synchronizers for minigrid by programmed trajectory movement for generator and subsystem). Doctor's thesis, Tomsk, TPU, 2010, 142 p. (In Russian).
12. Pavlov G.M., Merkul'ev G.V. *Avtomatika jenergosistem* [Automation of power systems]. Saint Petersburg, Papirus Publ., 2001, 387 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сапцына Елизавета Юрьевна

Томский политехнический университет (ТПУ),
инженерная школа энергетики.

Ленина пр., д. 30, г. Томск, 634050, Российская
Федерация.

Аспирант отделения электроэнергетики и электротехники, ТПУ.

Тел.: +7 (903) 951-32-16.

E-mail: lizoksu@gmail.com

Абеуов Ренат Болтабаевич

Томский политехнический университет (ТПУ),
инженерная школа энергетики.

Ленина пр., д. 30, г. Томск, 634050, Российская
Федерация.

Кандидат технических наук, доцент отделения
электроэнергетики и электротехники, ТПУ.

Тел.: +7 (3822) 70-17-77.

E-mail: Abeuov_RB@list.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Сапцына, Е. Ю. Алгоритм управления процессом точной синхронизации энергорайона с сетью энергосистемы / Е. Ю. Сапцына, Р. Б. Абеуов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 4 (56). – С. 90 – 101.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sapcyna Elizaveta Yur'evna

Tomsk Polytechnic University (TPU), School of Energy & Power Engineering.

30, Lenina av., Tomsk, 634050, the Russian Federation.

Ph. D. student of the department Power Engineering and Electrical Engineering TPU.

Phone: +7 (903) 951-32-16.

E-mail: lizoksu@gmail.com

Abeuov Renat Boltabaevich

Tomsk Polytechnic University (TPU), School of Energy & Power Engineering.

30, Lenina av., Tomsk, 634050, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department Power Engineering and Electrical Engineering TPU.

Phone: +7 (3822) 70-17-77.

E-mail: Abeuov_RB@list.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Sapcyna E.Yu., Abeuov R.B. Control algorithm of precision synchronization process for power district with electric power system. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 4 (56), pp. 90-101 (In Russian).

УДК 621.331: 621.311

А. В. Есаулов, С. Г. Тигунцев, Е. О. Анненков

Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ),
г. Иркутск, Российская Федерация

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ В ТЯГОВОЙ СЕТИ СИСТЕМЫ 2×25 кВ

Аннотация. Статья посвящена разработке и исследованию методики определения места повреждения (короткого замыкания на землю или на рельс) в контактной сети 2×25 кВ двухпутной железной дороги. В работе применены ключевые требования по формированию схем замещения и математических моделей электрических сетей. Сформирована в фазных координатах схема замещения и математическая модель контактной сети 2×25 кВ между двумя тяговыми подстанциями для моделирования режима короткого замыкания. В схеме замещения учтены собственные сопротивления проводов, сопротивления взаимоиндукции и емкостные сопротивления каждого провода с каждым проводом, емкостные сопротивления между проводами и землей. Расчет режима короткого замыкания выполняется в программе расчета в фазных координатах, разработанной на кафедре Электрических станций, сетей и систем ИРНИТУ. Для определения места короткого замыкания формируются графики изменения напряжений вдоль контактной сети между двумя подстанциями. Определение места короткого замыкания выполняется по вычислительной программе, разработанной на кафедре Электрических станций, сетей и систем ИРНИТУ, реализующей метод численного интегрирования телеграфных уравнений, описывающих режим контактной сети. Исходными данными для формирования графиков напряжений являются параметры схемы замещения и величины токов и напряжений по концам контактной сети в момент короткого замыкания. Получены графики изменения напряжений с одного и другого концов контактной сети, которые пересекаются в точке короткого замыкания. Методика определения места повреждения может быть использована на всех подстанциях железной дороги, электрифицированной на переменном токе 2×25 кВ. Для практического применения методики необходимо использовать величины токов и напряжений по концам контактной сети в момент короткого замыкания от

цифровых регистраторов аварийных процессов. Выводы: разработана методика определения места повреждения в контактной сети 2×25 кВ железной дороги, выполнено исследование методики, получены результаты, демонстрирующие высокую точность определения места повреждения.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, определение места повреждения, телеграфные уравнения.

Aleksei V. Esaulov, Stepan G. Tiguntsev, Evgeniy O. Annenkov

Irkutsk National Research Technical University (INRTU), Irkutsk, the Russian Federation

DETERMINATION OF THE FAULT LOCATION IN 2×25 kV RAILWAY POWER SUPPLY SYSTEM

Abstract. The article is devoted to the development and research of a methodology for determining the location of damage (short circuit to the ground or to the rail) in the 2×25 kV contact network of a double-track railway. The paper applies the key requirements for the formation of substitution schemes and mathematical models of electrical networks. A replacement circuit and a mathematical model of a 2×25 kV contact network between two traction substations have been formed in phase coordinates to simulate a short circuit mode. The replacement circuit takes into account the intrinsic resistances of the wires, the mutual induction resistances and the capacitive resistances of each wire with each wire, the capacitive resistances between the wires and the ground. The calculation of the short circuit mode is performed in the calculation program in phase coordinates, developed at the Department of «Electric Stations, Networks and Systems» of INRTU. To determine the location of a short circuit, graphs of voltage changes along the contact network between two substations are formed. The determination of the short circuit location is performed using a computational program developed at the Department of «Electric Stations, Networks and Systems» of INRTU, which implements the method of numerical integration of telegraphic equations describing the contact network mode. The initial data for the formation of voltage graphs are the parameters of the substitution circuit and the values of currents and voltages at the ends of the contact network at the time of a short circuit. Graphs of voltage changes from one and the other ends of the contact network, which intersect at the point of short circuit, are obtained. The method of determining the location of the damage can be used at all substations of a railway electrified with alternating current of 2×25 kV. For practical application of the technique, it is necessary to use the values of currents and voltages at the ends of the contact network at the time of a short circuit from digital recorders of emergency processes. Conclusions: a method for determining the location of damage in the 2×25 kV contact network of a railway has been developed, a study of the technique has been performed, and results have been obtained demonstrating high accuracy in determining the location of damage.

Keywords: traction power supply system, fault location determination, telegraph equations.

Ранее авторами данной статьи была проверена применимость метода численного интегрирования телеграфных уравнений [1] для определения места повреждения (ОМП) в тяговой сети 25 кВ [2]. Данный метод показал хорошую точность, погрешность ОМП при моделировании составила 3,3 % на 56 км.

В настоящей статье будет рассмотрена и проверена применимость метода численного интегрирования для тяговых сетей 2×25 кВ (рисунок 1).

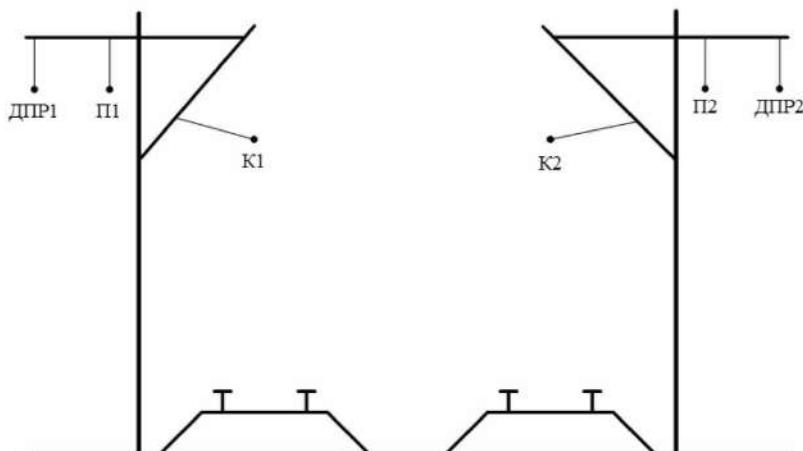


Рисунок 1 – Конструкция двухпутного перегона контактной сети системы 2×25 кВ

Электроэнергетика

Для использования метода численного интегрирования необходимы параметры аварийного режима (ПАР) – значения токов и напряжений в проводах по концам перегона [1, 2], зафиксированные, например, цифровым регистратором аварийных процессов (ЦРАПом) [3]. Поскольку такие параметры на реальном железнодорожном перегоне авторам недоступны, то для получения этих данных сформируем математическую модель тяговой сети 2×25 кВ в фазных координатах.

Математическая модель сформирована на основе принципиальной схемы контактной сети системы 2×25 кВ (рисунок 2), разбитой на участки по 1 км каждый, и представляет собой двухпутный перегон длиной 40 км, содержащий тяговые трансформаторы на подстанциях, промежуточные автотрансформаторы, контактные и питающие провода, провода ДПР, а также нагрузки, моделирующие ЭПС. Для удобства отображения на рисунке 3 представлена схема математической модели, на которой участки по 1 км объединены в группы по 5 км.

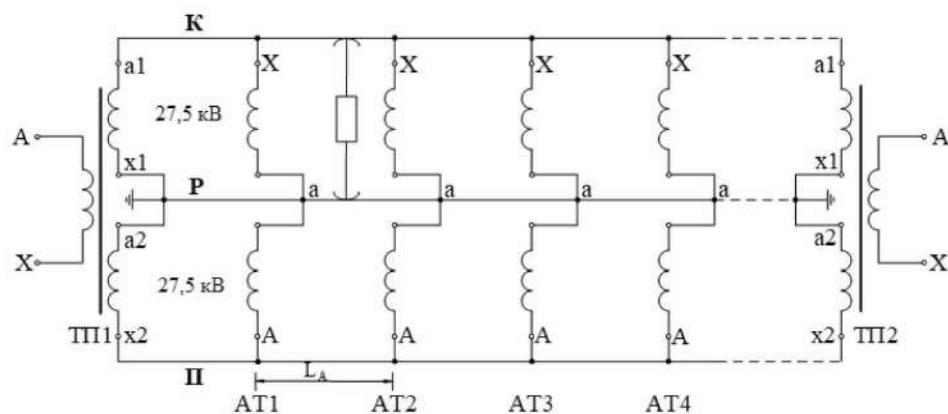


Рисунок 2 – Принципиальная схема контактной сети системы 2×25 кВ

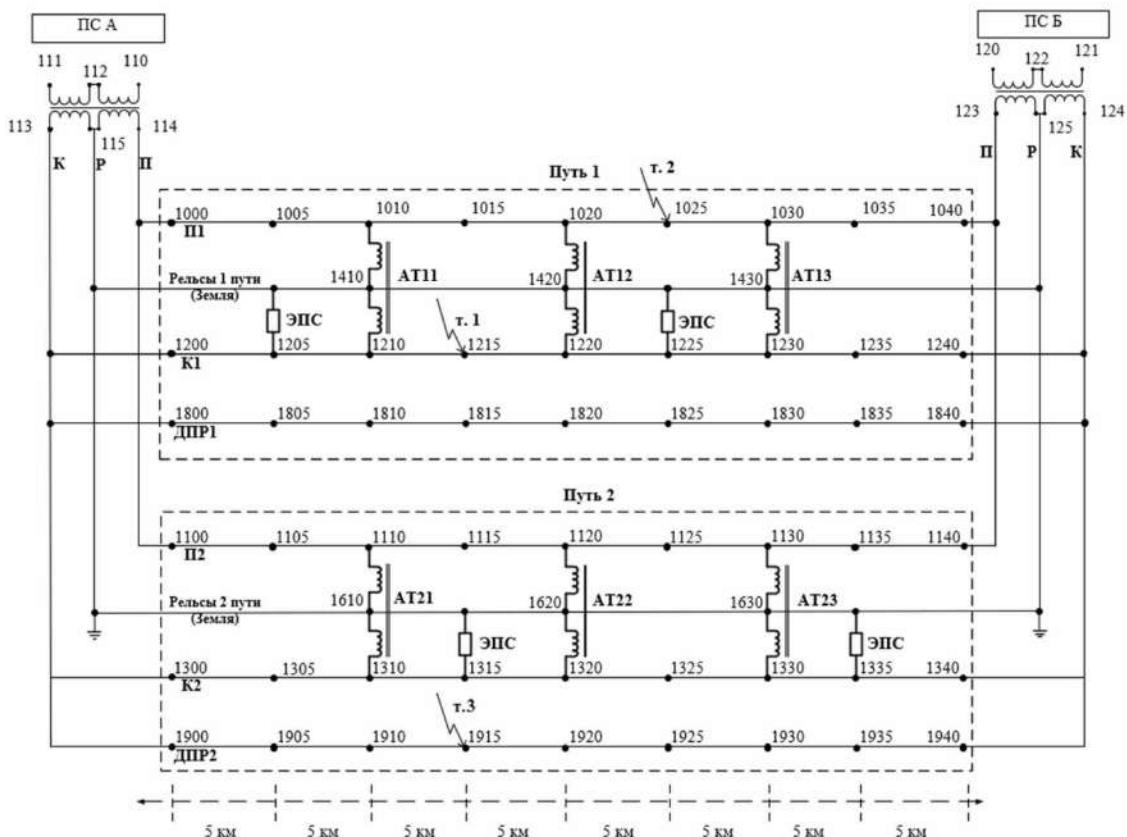


Рисунок 3 – Схема замещения двухпутного перегона контактной сети системы 2×25 кВ

Для каждого участка длиной 1 км были определены полные продольные сопротивления, емкостные сопротивления и сопротивления взаимоиндукции всех элементов контактной сети (контактные и питающие провода, провода системы «два провода – рельс (ДПР)», обмотки автотрансформаторов). Информация по схеме замещения занесена в программно-вычислительном комплексе (ПВК) «Расчет в фазных координатах», разработанном на кафедре Электрических станций, сетей и систем (ЭССиС) ИРНИТУ. Точки короткого замыкания (КЗ) 1÷3 были расставлены таким образом, чтобы проверить метод численного интегрирования для ОМП не только в контактных проводах, но и в питающих и проводах ДПР.

Подробная информация о формировании математических моделей в этом ПВК представлена в работах [1, 4].

Результатом расчета ПАР для каждой точки КЗ являются значения комплексных значений (модуль, угол) токов и напряжений, полученные по концам перегона, т. е. на подстанции А и Б. Все результаты сведены в таблицы 1÷6.

Таблица 1 – Результаты расчета ПАР в тяговой сети системы 2×25 кВ в начале перегона при КЗ в т. 1 (1215)

Номер узла/элемент сети	U, В	$\varphi_U, ^\circ$	I, А	$\varphi_I, ^\circ$
1200 (К1)	26574,17	354,02	1140,94	340,31
1000 (П1)	28677,03	185,55	774,57	170,97
1800 (ДПР1)	26584,72	354,015	152,92	49,02
1300 (К2)	26573,82	354,02	107,24	65,18
1100 (П2)	28671,45	185,55	558,14	186,75
1900 (ДПР2)	26584,72	354,01	152,84	49,05

Таблица 2 – Результаты расчета ПАР в тяговой сети системы 2×25 кВ в конце перегона при КЗ в т. 1 (1215)

Номер узла/элемент сети	U, В	$\varphi_U, ^\circ$	I, А	$\varphi_I, ^\circ$
1240 (К1)	27103,58	347,91	-371,18	135,20
1040 (П1)	27932,26	172,04	-328,33	271,45
1840 (ДПР1)	27106,1	347,91	-150,60	48,43
1340 (К2)	27105,67	347,92	-219,53	5,87
1140 (П2)	27933,63	172,05	-243,70	227,96
1940 (ДПР2)	27106,84	347,92	-150,52	48,46

Таблица 3 – Результаты расчета ПАР в тяговой сети системы 2×25 кВ в начале перегона при КЗ в т. 2 (1025)

Номер узла/элемент сети	U, В	$\varphi_U, ^\circ$	I, А	$\varphi_I, ^\circ$
1200 (К1)	28032,17	0,112	581,58	344,87
1000 (П1)	26945,47	179,89	809,58	173,68
1800 (ДПР1)	28040,04	0,11	152,38	49,34
1300 (К2)	28028,92	0,11	325,01	0,38
1100 (П2)	26942,67	179,88	328,05	211,32
1900 (ДПР2)	28040,04	0,11	152,32	49,37

Таблица 4 – Результаты расчета ПАР в тяговой сети системы 2×25 кВ в конце перегона при КЗ в т. 2 (1025)

Номер узла/элемент сети	U, В	$\varphi_U, ^\circ$	I, А	$\varphi_I, ^\circ$
1240 (К1)	28032,17	0,11	-581,58	344,85
1040 (П1)	26945,47	179,89	-809,58	173,68
1840 (ДПР1)	28040,04	0,11	-152,38	49,34
1340 (К2)	28028,92	0,11	-325,01	0,38
1140 (П2)	26942,67	179,88	-328,05	211,32
1940 (ДПР2)	28040,04	0,11	-152,32	49,36

Электроэнергетика

Таблица 5 – Результаты расчета ПАР в тяговой сети системы 2×25 кВ в начале перегона при КЗ в т. 3 (1915)

Номер узла/элемент сети	U, В	$\varphi_U, ^\circ$	I, А	$\varphi_I, ^\circ$
1200 (К1)	25995,91	353,10	-156,02	55,78
1000 (П1)	29343,44	186,10	-545,83	183,68
1800 (ДПР1)	25995,49	353,10	-154,11	48,83
1300 (К2)	25996,17	353,10	-152,68	93,03
1100 (П2)	29337,38	186,11	-607,93	181,15
1900 (ДПР2)	25986,29	353,11	-1033,19	340,16

Таблица 6 – Результаты расчета ПАР в тяговой сети системы 2×25 кВ в конце перегона при КЗ в т. 3 (1915)

Номер узла/элемент сети	U, В	$\varphi_U, ^\circ$	I, А	$\varphi_I, ^\circ$
1240 (К1)	26586,78	346,53	-297,18	354,43
1040 (П1)	28515,78	173,24	-264,22	234,30
1840 (ДПР1)	26576,74	346,54	-151,81	48,25
1340 (К2)	26589,57	346,53	-281,85	353,88
1140 (П2)	28516,51	173,25	-254,28	246,42
1940 (ДПР2)	26571,73	346,55	-576,57	136,97

Полученная информация о величинах фазных токов и напряжений на тяговых подстанциях в каждом из трех испытаний является исходными данными для ОМП методом численного интегрирования.

Метод численного интегрирования для ОМП реализован в ПВК «ОМПКЗ», разработанном на кафедре Электрических станций, сетей и систем ИРНИТУ. Помимо значений токов и напряжений исходными данными для расчета являются:

1) Матрица погонных продольных сопротивлений и сопротивлений взаимоиндукции Z двухпутного перегона системы 2×25 кВ [5 – 7] (таблица 7).

В таблице 7 диагональные значения $Z = (R + jX)$ являются погонными продольными сопротивлениями проводов перегона, а недиагональные – погонными сопротивлениями взаимоиндукции.

Таблица 7 – Матрица погонных продольных сопротивлений и сопротивлений взаимоиндукции Z , Ом/км

R	jX	R	jX	R	jX	R	jX	R	jX	R	jX
0,227	0,764	0,05	0,333	0,05	0,31	0,05	0,346	0,05	0,296	0,05	0,282
0,05	0,333	0,21	0,737	0,05	0,384	0,05	0,296	0,05	0,269	0,05	0,259
0,05	0,31	0,05	0,384	0,635	0,774	0,05	0,282	0,05	0,259	0,05	0,251
0,05	0,346	0,05	0,296	0,05	0,282	0,227	0,764	0,05	0,333	0,05	0,31
0,05	0,296	0,05	0,269	0,05	0,259	0,05	0,333	0,21	0,737	0,05	0,384
0,05	0,282	0,05	0,259	0,05	0,251	0,05	0,31	0,05	0,384	0,635	0,774

2) Матрица погонных поперечных емкостных проводимостей B [5 – 7] (таблица 8).

Таблица 8 – Матрица погонных поперечных емкостных проводимостей Y , См/км

B	B	B	B	B	B
$2,332 \cdot 10^{-6}$	$-2,865 \cdot 10^{-7}$	$-1,489 \cdot 10^{-7}$	$-3,305 \cdot 10^{-7}$	$-1,191 \cdot 10^{-7}$	$-7,13 \cdot 10^{-8}$
$-2,865 \cdot 10^{-7}$	$2,511 \cdot 10^{-6}$	$-5,733 \cdot 10^{-7}$	$-1,191 \cdot 10^{-7}$	$-6,28 \cdot 10^{-8}$	$-4,24 \cdot 10^{-8}$
$-1,489 \cdot 10^{-7}$	$-5,733 \cdot 10^{-7}$	$2,294 \cdot 10^{-6}$	$-7,13 \cdot 10^{-8}$	$-4,24 \cdot 10^{-8}$	$-3,02 \cdot 10^{-8}$
$-3,305 \cdot 10^{-7}$	$-1,191 \cdot 10^{-7}$	$-7,13 \cdot 10^{-8}$	$2,332 \cdot 10^{-6}$	$-2,865 \cdot 10^{-7}$	$-1,489 \cdot 10^{-7}$
$-1,191 \cdot 10^{-7}$	$-6,28 \cdot 10^{-8}$	$-4,24 \cdot 10^{-8}$	$-2,865 \cdot 10^{-7}$	$2,5114 \cdot 10^{-6}$	$-5,733 \cdot 10^{-7}$
$-7,13 \cdot 10^{-8}$	$-4,24 \cdot 10^{-8}$	$-3,02 \cdot 10^{-8}$	$-1,489 \cdot 10^{-7}$	$-5,733 \cdot 10^{-7}$	$2,2943 \cdot 10^{-6}$

3) Величина собственных сопротивлений обмоток и сопротивлений взаимоиндукции между обмотками промежуточных автотрансформаторов в фазных координатах (таблица 9). В качестве примера для расчета использован автотрансформатор АОМЖ-10000/27. (Z_1 и Z_2 –

Электроэнергетика

сопротивления обмотки 1 и обмотки 2, Z_m – сопротивление взаимоиндукции между обмотками).

Таблица 9 – Собственные сопротивления обмоток и сопротивления взаимоиндукции между обмотками автотрансформатора АОМЖ-1000/27, Ом

Z ₁		Z ₂		Z _m	
R ₁	X ₁	R ₂	X ₂	R _m	X _m
0	52165,004	0	52165,004	0	52155,172

4) Сопротивления нагрузок, Ом.

После получения информации ПАР о величине токов и напряжений, а также сопротивлений элементов перегона, исходные данные заносятся в ПВК «ОМПКЗ». Поскольку ввод исходных данных для всех трех экспериментов одинаков, то ниже с подробными разъяснениями рассмотрим только эксперимент с КЗ в т. 1 (номер узла 1215) на 15-м километре контактного провода от ПС «А».

На первую вкладку (рисунок 4) вносятся данные о величинах токов и напряжений в ПАР и о количестве участков, о длине перегона, о количестве учитываемых проводов контактной сети. В сформированной математической модели, с помощью которой были определены токи и напряжения (см. рисунок 3), длина перегона равняется 40 км, а количество проводов – шесть (два контактных, два питающих провода и два провода ДПР; рельсы не являются отдельным элементом).

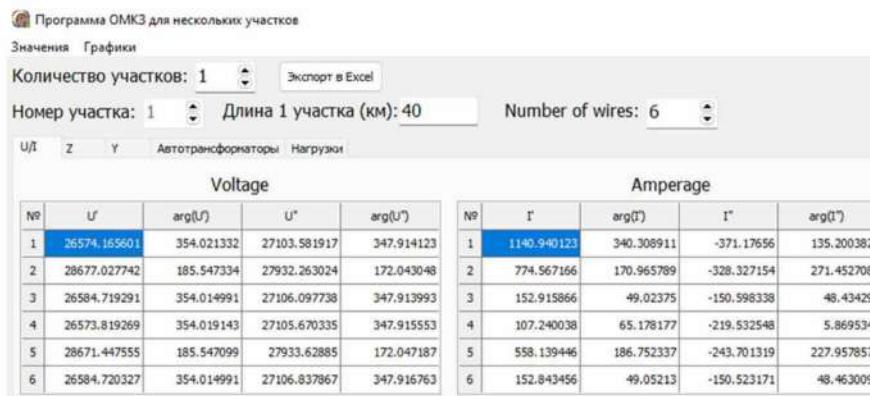


Рисунок 4 – Ввод данных о токах и напряжениях в ПАР, полученных в начале и в конце перегона при КЗ в т. 1

Во второй и третьей вкладках содержится информация о матрице Z (рисунок 5) и о матрице Y (рисунок 6) соответственно.

Продольные сопротивления											
R	jX	R	jX	R	jX	R	jX	R	jX	R	jX
0.227	0.764	0.05	0.333	0.05	0.31	0.05	0.346	0.05	0.296	0.05	0.282
0.05	0.333	0.21	0.737	0.05	0.384	0.05	0.296	0.05	0.269	0.05	0.259
0.05	0.31	0.05	0.384	0.635	0.774	0.05	0.282	0.05	0.259	0.05	0.251
0.05	0.346	0.05	0.296	0.05	0.282	0.227	0.764	0.05	0.333	0.05	0.31
0.05	0.296	0.05	0.269	0.05	0.259	0.05	0.333	0.21	0.737	0.05	0.384
0.05	0.282	0.05	0.259	0.05	0.251	0.05	0.31	0.05	0.384	0.635	0.774

Рисунок 5 – Матрица Z

Электроэнергетика

U/I Z Y Автотрансформаторы Нагрузки

Поперечные проводимости

G	B	G	B	G	B	G	B	G	B	G	B
0 2.3323E-6	0 -2.865E-7	0 -1.489E-7	0 -3.305E-7	0 -1.191E-7	0 -7.13E-8	0 -2.865E-7	0 -4.24E-8	0 -5.733E-7	0 -1.489E-7	0 -6.28E-8	0 -3.02E-8
0 -2.865E-7	0 2.5114E-6	0 -5.733E-7	0 -2.2943E-6	0 -7.13E-8	0 -2.3323E-6	0 -4.24E-8	0 -2.865E-7	0 -5.733E-7	0 -2.5114E-6	0 -5.733E-7	0 -2.2943E-6
0 -1.489E-7	0 -5.733E-7	0 2.2943E-6	0 -7.13E-8	0 2.3323E-6	0 -2.865E-7	0 -4.24E-8	0 -2.865E-7	0 -5.733E-7	0 -2.5114E-6	0 -5.733E-7	0 -2.2943E-6
0 -3.305E-7	0 -1.191E-7	0 -7.13E-8	0 2.3323E-6	0 -2.865E-7	0 -4.24E-8	0 -2.865E-7	0 -5.733E-7	0 -2.5114E-6	0 -5.733E-7	0 -2.2943E-6	0 -2.2943E-6
0 -1.191E-7	0 -6.28E-8	0 -4.24E-8	0 -2.865E-7	0 -5.733E-7	0 -1.489E-7	0 -6.28E-8	0 -3.02E-8	0 -2.5114E-6	0 -5.733E-7	0 -2.2943E-6	0 -2.2943E-6
0 -7.13E-8	0 -4.24E-8	0 -3.02E-8	0 -1.489E-7	0 -6.28E-8	0 -2.5114E-6	0 -5.733E-7	0 -2.2943E-6				

Рисунок 6 – Матрица Y

На четвертой вкладке указываются данные о собственных сопротивлениях обмоток и сопротивлениях взаимоиндукции между обмотками промежуточных автотрансформаторов (рисунок 7), а также данные о количестве, месте их расположения и порядке подключения к питающим и контактным проводам (см. рисунок 3).

U/I Z Y Автотрансформаторы Нагрузки

Количество: 6

	км	№п	№к	№р1	№р2	R1	Z1	X1	R2	Z2	X2	Rm	Zm	Xm	Rp	Zp	Xp
1	10	2	1	0	0	0	52165.004		0	52165.004		0	52155.172		0.1		0
2	20	2	1	0	0	0	52165.004		0	52165.004		0	52155.172		0.1		0
3	30	2	1	0	0	0	52165.004		0	52165.004		0	52155.172		0.1		0
4	10	5	4	0	0	0	52165.004		0	52165.004		0	52155.172		0.1		0
5	20	5	4	0	0	0	52165.004		0	52165.004		0	52155.172		0.1		0
6	30	5	4	0	0	0	52165.004		0	52165.004		0	52155.172		0.1		0

Рисунок 7 – Данные о промежуточных автотрансформаторах

И на последнюю вкладку (рисунок 8) заносится информация о ЭПС, которая учитывается в виде сопротивлений.

U/I Z Y Автотрансформаторы Нагрузки

Количество: 4

	км	№п	№к	№р1	№р2	Rh	Zh	Xh	Rp	Zp	Xp
1	5	1	0	0		275		0.1	0.1		0
2	15	4	0	0		229		0.1	0.1		0
3	25	1	0	0		305		0.1	0.1		0
4	35	4	0	0		250		0.1	0.1		0

Рисунок 8 – Данные о ЭПС

Результатом расчета являются графики модулей и углов токов и напряжений, где осью абсцисс является длина перегона, а осью ординат – модули токов и напряжений и их углов соответственно.

Как было показано в работах [1, 2], суть ОМП с помощью метода численного интегрирования – это нахождение точки пересечения графиков пошагового изменения напряжения от концов рассматриваемой линии до противоположных концов. Однако для тяговых сетей системы 2×25 кВ только этого критерия недостаточно, так как часто на полученных графиках модулей напряжения присутствуют две точки пересечения, одна из которых ложная (рисунок 9). Для того чтобы определить истинную точку пересечения, а следовательно, и место, где произошло КЗ, необходим второй критерий. Таким критерием является точка пересечения на графике зависимости углов напряжений от расстояния. Поскольку величина напряжения комплексное число, то в истинной точке КЗ должны совпадать не только модули напряжений, но и углы. Графически это выражается в том, что

Электроэнергетика

графики изменения углов напряжения в зависимости от расстояния должны пересекаться в одной точке (рисунок 10).

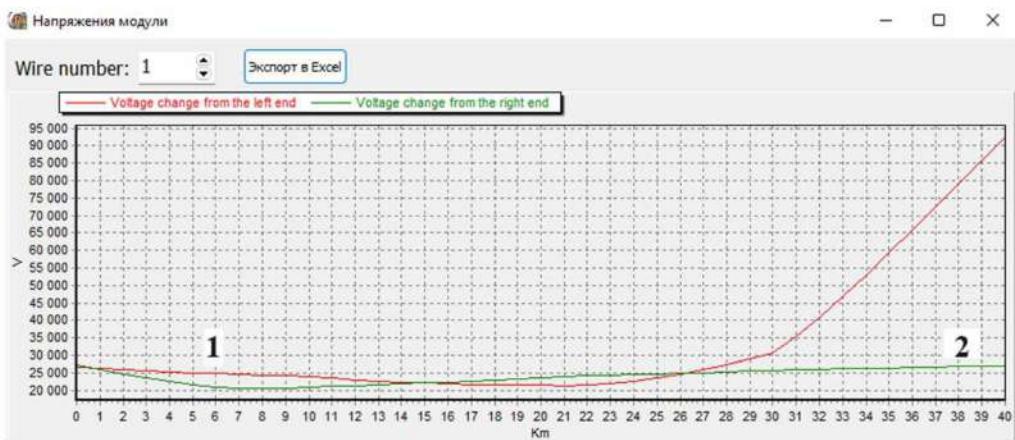


Рисунок 9 – Графики модулей напряжений в контактном проводе первого пути, полученные в ПВК «ОМПКЗ» для т. 1 (1215)



Рисунок 10 – Графики углов напряжений в контактном проводе первого пути, полученные в ПВК «ОМПКЗ» для т. 1 (1215)

На рисунке 9 график № 1 представляет собой изменение модуля напряжения в контактном проводе первого пути с левого конца перегона, т. е. от ПС «А» до ПС «Б», а график № 2 с правого конца перегона, т. е. от ПС «Б» до ПС «А» соответственно. На рисунке 9 отчетливо видно, что имеется две точки пересечения – на 15 км и на 26,5 км от ПС «А». Это происходит из-за того, что после пересечения графиков модулей напряжений в истинной точке КЗ дальнейшие значения модулей напряжений не соответствуют действительности как для графика № 1, так и для графика № 2, следовательно, возможны повторные случайные пересечения. Поэтому для точного определения действительной точки КЗ рассматриваем точку пересечения графиков углов напряжений (см. рисунок 10). Из результатов, представленных на рисунках 9 и 10, можно сделать вывод о том, что истинная точка КЗ находится на 15-ом км от ПС «А», т. е. там, где в математической модели контактной сети 2×25 кВ и была задана точка КЗ в первом эксперименте.

При детальном приближении графиков пересечения модулей напряжений (рисунок 11) и углов напряжений в контактном проводе видно, что проекция точки пересечения на ось абсцисс находится ровно на расстоянии 15 км, следовательно, погрешность составляет 0 %.

Электроэнергетика

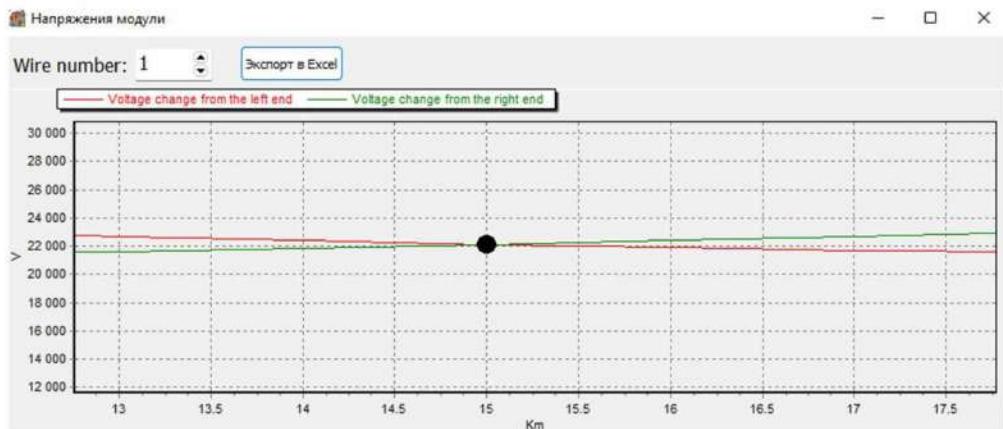


Рисунок 11 – Точка пересечения графиков модулей напряжения в контактном проводе при КЗ в т. 1 (1215)

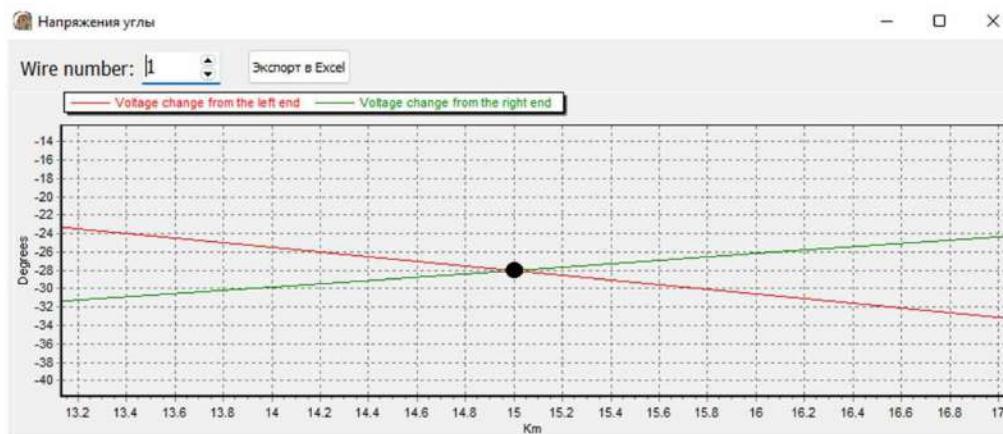


Рисунок 12 – Точка пересечения графиков углов напряжения в контактном проводе при КЗ в т. 1 (1215)

Далее приведем графики модулей напряжения, графики углов для экспериментов в точках КЗ 2 и 3, которые выбраны, чтобы проверить возможность ОМП методом численного интегрирования не только в контактном, но и в питающем (рисунки 13 и 14) проводе, а также в проводе ДПР (рисунки 15 и 16).

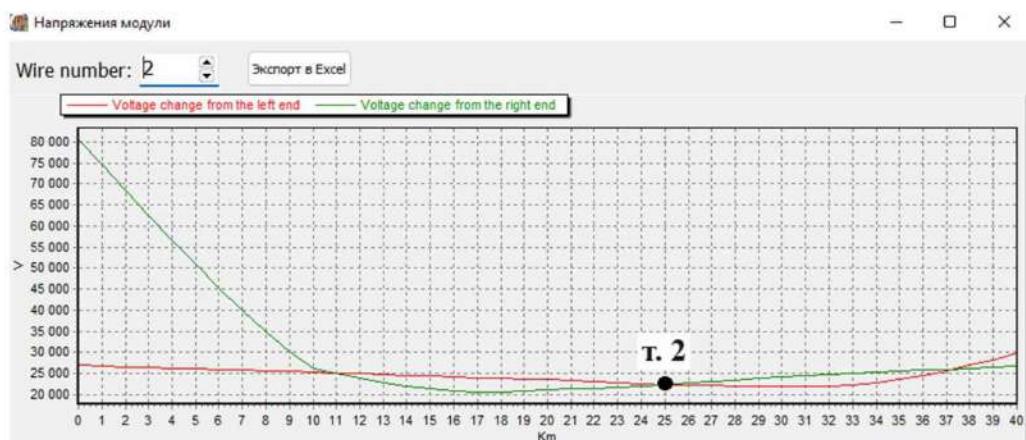


Рисунок 13 – Графики модулей напряжений в питающем проводе первого пути, полученные в ПВК «ОМПКЗ» для т. 2 (1025)

Электроэнергетика



Рисунок 14 – Графики углов напряжений в питающем проводе первого пути, полученные в ПВК «ОМПКЗ» для т. 2 (1025)

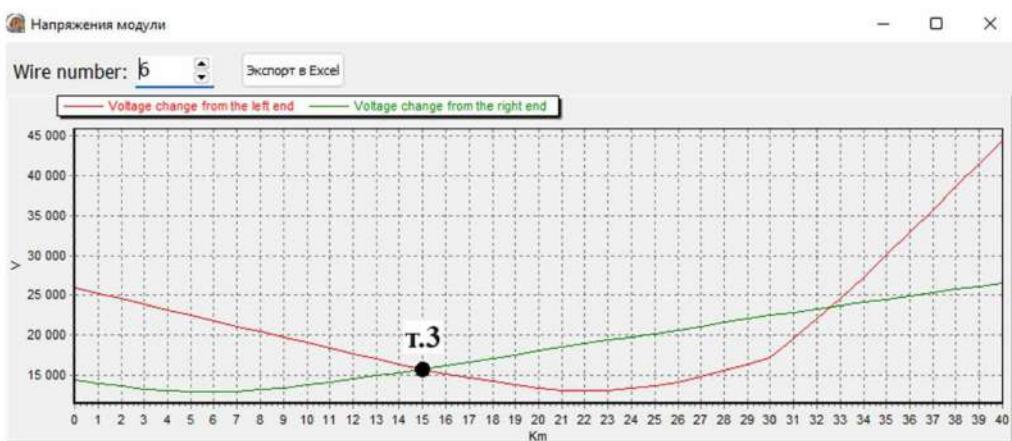


Рисунок 15 – Графики модулей напряжений в проводе ДПР второго пути, полученные в ПВК «ОМПКЗ» для т. 3 (1915)



Рисунок 16 – Графики углов напряжений в проводе ДПР второго пути, полученные в ПВК «ОМПКЗ» для т. 3 (1915)

Анализ полученных графиков позволяет сделать вывод о том, что метод численного интегрирования с высокой точностью определяет место КЗ не только в контактных, но также в питающих проводах и проводах ДПР.

Поскольку для ОМП с помощью метода численного интегрирования необходимы лишь измеренные значения фазных токов и напряжений в аварийном режиме, то данный способ ОМП для своей реализации потребует некоторых затрат на ЦРАПы, установленные на каждой тяговой подстанции.

Электроэнергетика

На кафедре Электрических станций, сетей и систем ИРНИТУ проводятся работы по формированию ЦРАПов на базе устройств телемеханики.

На основании всего изложенного выше можно сделать выводы.

1. Способ определения места повреждения, основанный на методе численного интегрирования, применим не только к трехфазным линиям электроснабжения и тяговым сетям 25 кВ, но и к сложной системе тягового электроснабжения 2×25 кВ.

2. Метод численного интегрирования показал высокую точность на модели. Расхождение определенной с помощью данного метода точки КЗ с заранее установленной точкой КЗ в математической модели составило 0 % для всех трех экспериментов, т. е. в реальных условиях погрешность ОМП будет зависеть лишь от погрешности измерительных трансформаторов токов и напряжений, а также от точности определения параметров схемы замещения перегона.

3. Способ ОМП с помощью метода численного интегрирования применим не только для поиска повреждения в контактном проводе, но и в питающем проводе и проводе ДПР.

4. Поскольку для ОМП с помощью метода численного интегрирования необходимы лишь измеренные значения фазных токов и напряжений в ПАР, то данный способ ОМП для своей реализации потребует несущественных затрат на ЦРАПы, установленные на каждой тяговой подстанции.

Список литературы

1. Тигунцев, С. Г. Определение мест коротких замыканий на длинных линиях электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения / С. Г. Тигунцев. – Текст : непосредственный // Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление : материалы всерос. конф. / Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук. – Иркутск, 2015. – С. 357–360.
2. Есаулов, А. В. Определение места повреждения в тяговой сети системы 25 кВ / А. В. Есаулов, С. Г. Тигунцев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 2 (54). – С. 120–127.
3. Пуляев, В. И. Цифровые регистраторы аварийных событий энергосистем / В. И. Пуляев, Ю. В. Усачев. – Москва : НТФ «Энергопрогресс», 1999. – 80 с. – Текст : непосредственный.
4. Тигунцев, С. Г. Разработка расчетной модели контактной сети железной дороги 2×25 кВ для совместного расчета несинусоидальных и несимметричных режимов в питающей сети / С. Г. Тигунцев, А. В. Есаулов, Ю. О. Еремеева. – Текст : непосредственный // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири : материалы всерос. науч.-техн. конф. с международным участием / Иркутский национальный исследовательский технический университет. – Иркутск, 2021. – С. 118–123.
5. Диагностика состояния воздушных линий электропередачи 10–110 кВ в нормальных и аварийных режимах : учебное пособие / под ред. А. Н. Висящева. – Иркутск : Иркутский государственный технический университет, 2012. – 270 с. – Текст : непосредственный.
6. Висящев, А. Н. Приборы и методы определения места повреждения на линиях электропередачи : учебное пособие. – Иркутск : Иркутский государственный технический университет, 2001. – Ч. 2. – 146 с. – Текст : непосредственный.
7. Закарюкин, В. П. Моделирование систем тягового электроснабжения : учебное пособие / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков. – Москва : Директ-Медиа, 2021. – 216 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Tiguntsev S.G. [Determination of short-circuit locations on long power transmission lines of high and ultrahigh voltage]. *Energetika Rossii v XXI veke. Innovatsionnoe razvitiye i upravlenie : materialy vserosciiskoi konferentsii* [Energy of Russia in the XXI century. Innovative development and Management : materials of the All-Russian Conference]. Irkutsk, 2015, pp. 357-360 (In Russian).
2. Esaulov A.V., Tiguntsev S.G. Determination of the fault location in 25 kV railway power supply system. *Izvestiya Transsib – Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 2 (54), pp. 120-127 (In Russian).

Электроэнергетика

3. Pulyaev V.I., Usachev Y. V. *Tsifrovye registratory avariynykh sobytiy energosistem* [Digital recorders of emergency events of power systems]. Moscow, Energoprogress Publ., 1999, 80 p. (In Russian).
4. Tiguntsev S.G., Esaulov A.V., Eremeeva Yu.O. [Development of a computational model of a 2×25 kV railway contact network for the joint calculation of non-sinusoidal and asymmetric modes in the supply network]. *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniia energii v usloviakh Sibiri : materialy vserossiiskoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii* [Improving the efficiency of energy production and use in conditions of Siberia : materials of the All-Russian scientific and technical conference]. Irkutsk, 2021, pp. 118-123 (In Russian).
5. Visyashev A. N. ed. *Diagnostika sostoianiiia vozdushnykh linii elektroperedachi 10-110 kV v normal'nykh i avariynykh rezhimakh : uchebnoe posobie* [Diagnostics of the condition of ascending power lines of 10-110 kV in normal and emergency modes: textbook]. Irkutsk, Irkutsk State Technical University Publ., 2012, 270 p. (In Russian).
6. Visyashchev A.N. *Pribory i metody opredeleniiia mesta povrezhdeniiia na liniakh elektroperedachi : uchebnoe posobie* [Devices and methods for determining the location of damage on power lines : textbook]. Irkutsk, Irkutsk State Technical University Publ., 2001, Part 2, 146 p. (In Russian).
7. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Modelirovanie sistem tiagovogo elektronsnabzheniya : uchebnoe posobie* [Modeling of traction power supply systems : textbook]. Moscow, Direct Media Publ., 2021, 216 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Есаулов Алексей Владимирович

Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ).
Лермонтова ул., д. 83, г. Иркутск, 644074, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электрические станции, сети и системы», ИРНИТУ.

Тел.: +7 (950) 093-36-73.

E-mail: alex.esaulov98@mail.ru

Тигунцев Степан Георгиевич

Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ).
Лермонтова ул., д. 83, г. Иркутск, 644074, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические станции, сети и системы», ИРНИТУ.

Тел.: +7 (914) 927-81-77.

E-mail: stiguncev@yandex.ru

Анненков Евгений Олегович

Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ).
Лермонтова ул., д. 83, г. Иркутск, 644074, Российская Федерация.

Учебный мастер-программист кафедры «Электрические станции сети и системы», ИРНИТУ.

Тел.: +7 (914) 887-90-30.

E-mail: kejio@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Есаулов, А. В. Определение места повреждения в тяговой сети системы 2×25 кВ / А. В. Есаулов, С. Г. Тигунцев, Е. О. Анненков. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 4 (56). – С. 101 – 112.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Esaulov Alexey Vladimirovich

Irkutsk National Research Technical University (INRTU).
83, Lermontov st., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department «Electric power stations, networks and systems», INRTU.

Phone: +7 (950) 093-36-73.

E-mail: alex.esaulov98@mail.ru

Tiguntsev Stepan Georgievich

Irkutsk National Research Technical University (INRTU).
83, Lermontov st., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Electric power stations, networks and systems», INRTU.

Phone: +7 (914) 927-81-77.

E-mail: stiguncev@yandex.ru

Annenkov Evgeniy Olegovich

Irkutsk National Research Technical University (INRTU).
83, Lermontov st., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Educational master programmer of the department «Electric power stations, networks and systems», INRTU.

Phone: +7 (914) 887-90-30.

E-mail: kejio@yandex.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Esaulov A.V., Tiguntsev S.G., Annenkov E.O. Determination of the fault location in 2x25 kV railway power supply system. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 4 (56), pp. 101-112 (In Russian).

УДК 621.313

В. В. Харламов, Ю. В. Москалев, А. Ю. Милютин

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

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОЛЮСНЫХ НАКОНЕЧНИКОВ РОТОРА СИНХРОННОЙ МАШИНЫ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Аннотация. В настоящее время в мире особое внимание уделяется повышению эффективности использования энергетических ресурсов, также важен бережный и рациональный расход электроэнергии. Для достижения этих целей производители электрических машин постоянно совершенствуют их конструкцию с целью увеличения энергетических показателей. Рассмотрены синхронные машины с постоянными магнитами. Они имеют широкое применение в различных областях промышленности и на транспорте, в связи с этим оптимизация конструкции данных машин с целью повышения массогабаритных и энергетических показателей является актуальной темой исследования. В статье предложен новый подход к оптимизации конструкции синхронной электрической машины с постоянными магнитами. Исследовано влияние изменения геометрических размеров дуги полюсного наконечника на величину магнитной индукции в воздушном зазоре. Сегмент между магнитами на роторе, он же полюсный наконечник, выполнен из ферромагнитного материала с заданной магнитной проницаемостью. Анализ магнитных полей проводился с помощью программы FEMM. Выполнен анализ ротора с различными геометрическими вариантами изготовления сегментов из ферромагнетика. Оценено влияние угла дуги сегментов из ферромагнитного материала на гармонический состав нормальной и тангенциальной составляющих магнитной индукции в воздушном зазоре. Амплитудные значения гармоник нормальной и тангенциальной составляющих магнитной индукции рассчитываются с использованием программы Mathcad. Сформулирован критерий оценки содержания высших гармоник индукции магнитного поля по внутренней окружности сердечника статора. В результате исследования определена оптимальная дуга сегментов ротора с минимальным содержанием гармоник магнитной индукции в воздушном зазоре. Предложена последовательность действий для определения оптимальной дуги полюсных наконечников ротора с тангенциально намагниченными магнитами.

Ключевые слова: электрическая машина, постоянный магнит, магнитная индукция, ряд Фурье.

Viktor V. Kharlamov, Yuriy V. Moskalev, Alexey Yu. Milyutin

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

OPTIMIZATION OF ROTOR POLE TIPS SYNCHRONOUS MACHINE WITH PERMANENT MAGNETS

Abstract. Currently, special attention is paid in the world to improving the efficiency of the use of energy resources, careful and rational consumption of electricity is also important. To achieve these goals, manufacturers of electric machines are constantly improving the design in order to increase energy performance. Synchronous machines with permanent magnets are considered. They are widely used in various fields of industry and transport, in this regard, the optimization of the design of these machines in order to increase the weight and size and energy performance is an urgent topic of research. The article presents the optimization of the design of a synchronous electric machine with permanent magnets. The influence of changes in the geometric dimensions of the pole tip arc on the magnitude of magnetic induction in the air gap is investigated. The segment between the magnets on the rotor, also known as the pole tip, is made of a ferromagnetic material with a given magnetic permeability. The analysis of magnetic fields was carried out using the FEMM program. The analysis of a rotor with various geometric variants of manufacturing segments from a ferromagnetic is performed. The influence of the arc angle of ferromagnetic material segments on the harmonic composition of the normal and tangential components of magnetic induction in the air gap is estimated. The amplitude values of the harmonics of the normal and tangential components of magnetic induction are calculated using the Mathcad program. A criterion for estimating the content of higher harmonics of magnetic field induction along the inner circumference of the stator core is formulated. As a result of the study, the optimal arc of the rotor segments with a minimum content of magnetic induction harmonics in the air gap was found. A sequence of actions is proposed to determine the optimal arc of the rotor pole tips with tangentially magnetized magnets.

Keywords: electric machine, permanent magnet, magnetic flux density, Fourier series.

Современное развитие всех отраслей промышленности требует применения управляемых приводов. Синхронные машины с постоянными магнитами (СМПМ) имеют преимущество по

Электротехнические комплексы и системы

сравнению с машинами постоянного тока ввиду отсутствия коллекторно-щеточного узла, который имеет определенный ресурс и создает искрения и помехи, воздействующие на работу электронных узлов. Ведущие производители России и мира делают акцент на исследования СМПМ, которые в ряде областей уже заменили машины постоянного тока. Некоторые области использования электрических машин с постоянными магнитами приведены на рисунке 1.



Рисунок 1 – Области применения электрических машин с постоянными магнитами

К преимуществам СМПМ можно отнести высокие энергетические и массогабаритные показатели; возможность создания большого врачающего момента; надежность за счет исключения обмотки возбуждения, скользящего токосъема, коллектора (для машин постоянного тока). Основные недостатки СМПМ: высокая стоимость из-за наличия дорогостоящих магнитов; сложность регулирования магнитного потока; наличие сильных магнитных полей магнитов усложняет процесс сборки; перегрев постоянных магнитов приводит к их размагничиванию.

Область использования СМПМ постоянно расширяется, например, тяговые двигатели рудничных электровозов, привод гребных винтов кораблей, двигатели беспилотных летательных аппаратов, кинетических накопителей энергии и др.

СМПМ является наиболее перспективной машиной в диапазоне малых и средних мощностей. Такая электрическая машина не имеет потерь на возбуждение, а малые габаритные размеры, возможность работы с высокой угловой скоростью, малый момент инерции ротора, небольшие электромеханические и электромагнитные постоянные времена позволяют реализовать энергоэффективный регулируемый электропривод [1 – 5, 7].

Применение высокоэнергетических редкоземельных постоянных магнитов при изготовлении электрических машин позволяет получать магнитные поля до 1,5 Тл в воздушном зазоре, что дает возможность выполнять машины с лучшими массогабаритными показателями, а также исключает электрические потери на возбуждение, что положительно сказывается на коэффициенте полезного действия [1].

Существуют различные варианты размещения постоянных магнитов на роторе, различают СМПМ с радиальным, радиально-тангенциальным и тангенциальным направлением намагничивания [1, 6 – 9].

При проектировании электрических машин часто используют оптимизационные методы. В результате оптимизации ротора с постоянными магнитами определяются геометрические размеры магнитов, размеры магнитомягких и немагнитных материалов, их размещение на роторе [9 – 12].

Рассмотрим различные варианты конструкции ротора на примере четырехполюсной электрической машины с тангенциальным размещением постоянных магнитов с целью определения оптимальной дуги полюсного наконечника сегмента из ферромагнитного материала. Модель четырехполюсной СМПМ в программе *FEMM* приведена на рисунке 2 (*d-d*—продольные оси, *q-q*—поперечные оси).

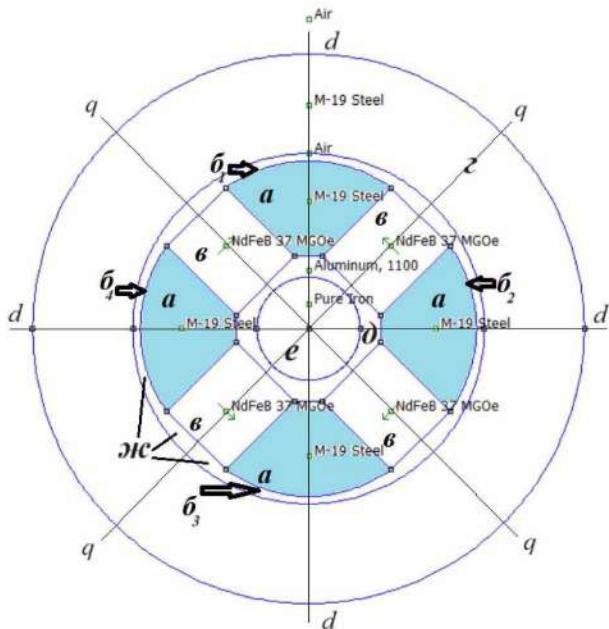


Рисунок 2 – Модель СМПМ в программе FEMM:
 а – сегмент из ферромагнетика; б – дуга сегмента;
 в – постоянный магнит; г – сердечник статора;
 д – втулка из немагнитного материала; е – стальной вал;
 жс – воздушный зазор

Решение рассматриваемой оптимизационной задачи позволит обеспечить минимизацию высших гармоник магнитного поля в воздушном зазоре СМПМ и, как следствие, снижение пульсации вращающего момента, уменьшение вибрации и шума.

Необходимо отметить, что улучшение формы распределения магнитной индукции синхронных машин с обмоткой возбуждения за счет оптимизации формы полюсных наконечников длительное время применяется на практике [13]. При этом предлагаемый авторами подход отличается от других известных способов оптимизации магнитной цепи электрической машины с тангенциальным намагничиванием магнитами, встроенными в ротор.

При решении оптимизационной задачи изменяются полюсные наконечники сегментов из ферромагнитного материала, размещенные между постоянными магнитами на роторе (элемент б на рисунке 2).

Каждый полюсный наконечник представляет собой дугу условной окружности, проходящей через углы прямоугольных магнитов (см. рисунок 2). Различные варианты полюсных наконечников с различными длинами дуг формируются за счет изменения центрального угла окружностей (угол α), центр которых имеет возможность смещаться по продольной оси электрической машины (рисунок 3).

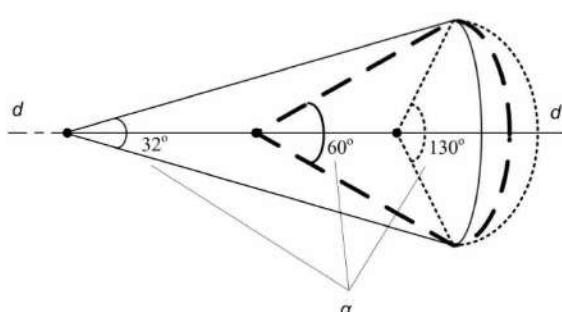


Рисунок 3 – Зависимость изменения длины дуги полюсного наконечника от угла α

Конструкция ротора с тангенциальным размещением постоянных магнитов более рациональна при использовании высококоэрцитивных магнитов на основе редкоземельных материалов, которые могут быть слабочувствительны к величине немагнитного зазора в магнитной цепи [1]. Длина магнита вдоль поля невелика, так как требуемая МДС достигается за счет больших показателей напряженности магнитных полей постоянных магнитов. Относительно малые длины позволяют создавать компактные многощипковые конструкции роторов с тангенциальным намагничиванием для машин с повышенной частотой, что в свою очередь способствует снижению размера магнитов при заданной мощности бесконтактных электрических машин. Еще одна важная особенность использования конструкции с тангенциальным намагничиванием – это возможность получения с ее помощью индукции в зазоре, превышающей индукцию в магните [1].

Для рассматриваемой модели СМПМ с заданными геометрическими размерами значение центрального угла изменяется в диапазоне от 60° до 85° , так как при уменьшении значений рассматриваемого угла существенно увеличивается воздушный зазор и уменьшается магнитная индукция между полюсным наконечником ротора и сердечником статора. При значении угла более 85° полюсный наконечник будет пересекать внутреннюю окружность сердечника статора. В результате изменения дуги

сегментов происходит изменение величины воздушного зазора при одинаковых размерах постоянных магнитов на роторе (суммарный объем всех магнитов и их энергия не изменяются).

Для пояснения влияния угла α на изменения величины дуги сегмента и воздушных зазоров на рисунке 4 приведены модели рассматриваемых СМПМ при $\alpha = 60^\circ$ (рисунок 4, а) и $\alpha = 85^\circ$ (рисунок 4, б).

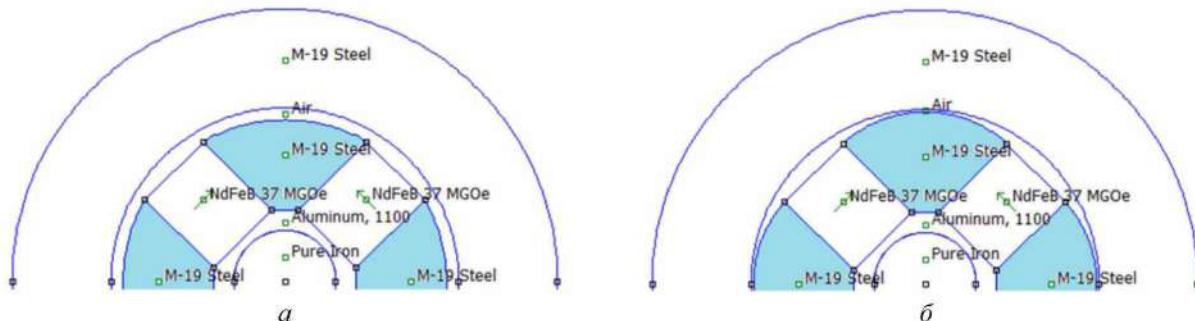


Рисунок 4 – Модель СМПМ с углом дуги полюсного наконечника 60° (а) и 85° (б)

В качестве основного показателя при сравнении различных вариантов сегментов принят следующий критерий, позволяющий учесть содержание высших гармоник индукции магнитного поля по внутренней окружности сердечника статора:

$$F(\alpha) = \sum_{i=4}^{30} B_{hi} + \sum_{i=4}^{30} B_{ti} \rightarrow \min,$$

где B_{hi} и B_{ti} – модуль i -й гармоники нормальной и тангенциальной составляющих магнитной индукции вдоль внутренней поверхности статора СМПМ соответственно, Тл.

При использовании приведенного критерия учитывается только 30 гармоник, так как при увеличении порядка гармоник их амплитудные значения уменьшаются, у гармоник больше 30-й амплитуда не превышает значений, которые могли бы существенно повлиять на результаты расчета.

Для двухмерной модели СМПМ (см. рисунок 1) приняты следующие размеры: внешний диаметр ротора – 100 мм, воздушный зазор изменяется в зависимости от угла дуги сегмента из ферромагнетика, внутренний диаметр сердечника статора – 102 мм, наружный диаметр сердечника статора – 160 мм. Длина окружности по внутренней расточке статора L равна 320 мм. Для упрощения анализа сердечник статора принят гладким (без пазов).

Расчет магнитных полей выполнен в программе *FEMM* [14]. Материалы всех элементов магнитной цепи были заданы из библиотеки *FEMM*. В качестве магнитомягкого материала (сердечник статора и элементы ротора) использована сталь марки *M-19*, магниты неодимовые – *NdFeB 40 MGoe* с коэрцитивной силой 979 кА/м.

Для расчета двухмерного магнитного поля в программе *FEMM* использован метод конечных элементов. При этом осуществляется аппроксимация векторного магнитного потенциала рассматриваемой магнитной цепи дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей – конечных элементов треугольной формы. Магнитные потенциалы каждого конечного элемента в узловых точках (в вершинах треугольников) представляются в виде линейного полинома первого порядка с постоянными в пределах этого элемента коэффициентами. При определении картины магнитного поля решается система алгебраических уравнений, определяются коэффициенты линейных полиномов всех конечных элементов и значения магнитных потенциалов в узловых точках, а также индукция и напряженность магнитного поля в этих точках.

На рисунках 5 и 6 приведены график изменения составляющих магнитной индукции вдоль внутренней поверхности сердечника статора и значения амплитуд гармоник этих составляющих для схемы ротора с углом дуги сегмента, равным 60° и 85° соответственно.

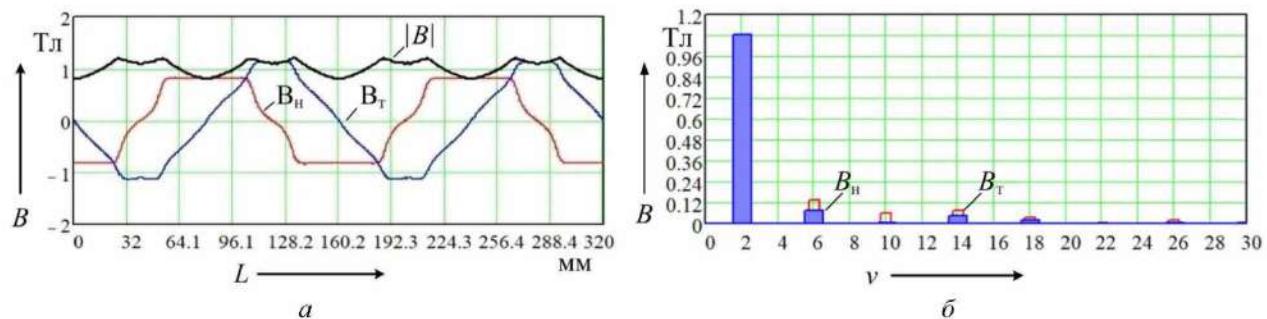


Рисунок 5 – Графики для схемы ротора с углом дуги сегмента, равным 60° : *а* – нормальная (B_h), тангенциальная (B_t) составляющие и модуль ($|B|$) магнитной индукции вдоль внутренней поверхности сердечника статора; *б* – амплитуды гармоник нормальной (B_h), тангенциальной (B_t) составляющих магнитной индукции

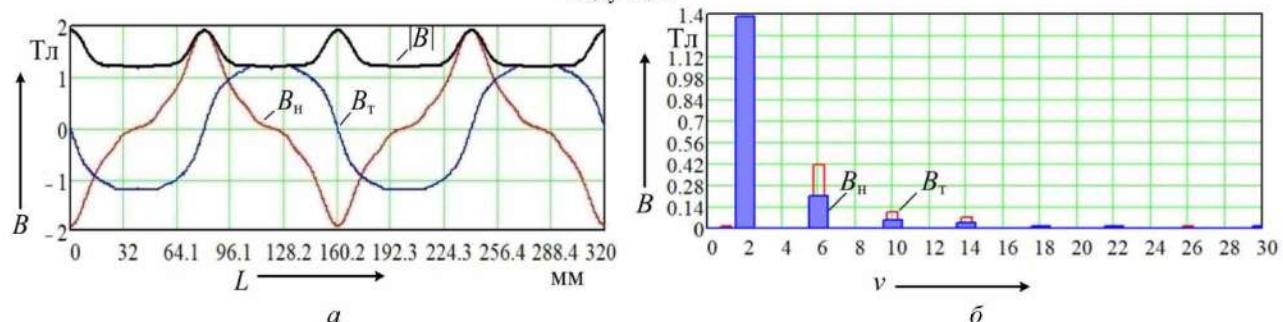


Рисунок 6 – Графики для схемы ротора с углом дуги сегмента, равным 85° : *а* – нормальная (B_h), тангенциальная (B_t) составляющие и модуль ($|B|$) магнитной индукции вдоль внутренней поверхности сердечника статора; *б* – амплитуды гармоник нормальной (B_h), тангенциальной (B_t) составляющих магнитной индукции

Средние значения модуля магнитной индукции при $\alpha = 60^\circ$ и 85° равны 1,03 и 1,38 Тл соответственно. Как видно на рисунках 5 и 6, для конструкций ротора с $\alpha = 60^\circ$ и 85° кривые магнитной индукции значительно отличаются от синусоидальной формы.

В результате анализа различных вариантов ротора с различными значениями длины дуги полюсных наконечников получена зависимость $F(\alpha)$, приведенная на рисунке 7.

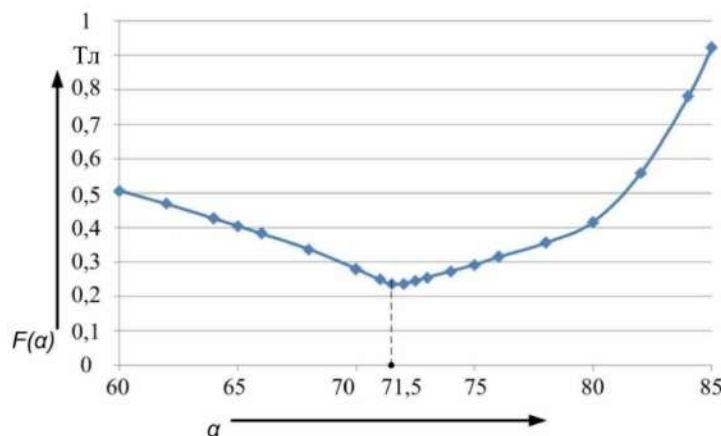


Рисунок 7 – График зависимости $F(\alpha)$

В результате анализа зависимости $F(\alpha)$ (см. рисунок 7) определено, что минимальное содержание гармоник в магнитной индукции будет при $\alpha = 71,5^\circ$.

На рисунке 8 приведены график изменения составляющих магнитной индукции вдоль внутренней поверхности сердечника статора и значения гармоник этих составляющих для схемы ротора с углом дуги сегмента, равным $71,5^\circ$.

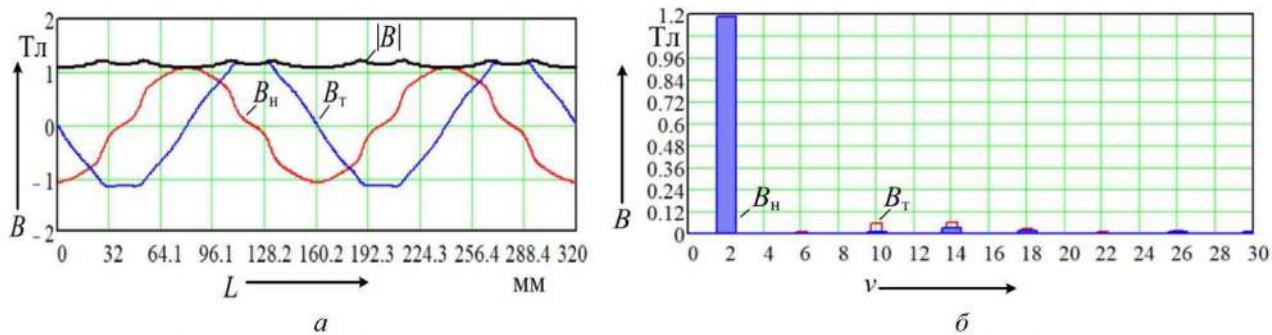


Рисунок 8 – Графики для схемы ротора с углом дуги сегмента, равным $71,5^\circ$:
 а – нормальная (B_n), тангенциальная (B_t) составляющие и модуль ($|B|$) магнитной индукции в воздушном зазоре;
 б – амплитуды гармоник нормальной (B_n), тангенциальной (B_t) составляющих магнитной индукции

Среднее значение модуля магнитной индукции при $\alpha = 71,5^\circ$ равно 1,13 Тл.
 На рисунке 9 приведена картина магнитного поля при $\alpha = 71,5^\circ$.

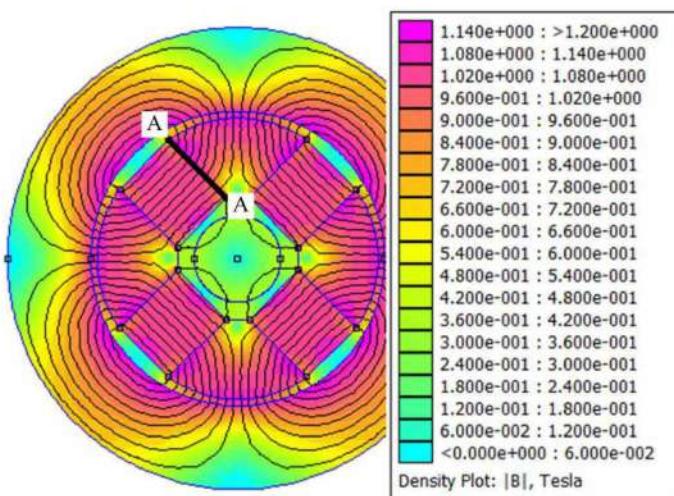


Рисунок 9 – Магнитное поле СМПМ для схемы ротора при $\alpha = 71,5^\circ$

Как можно видеть на рисунке 9, магнитное поле четырехполюсной СМПМ является симметричным, среднее значение магнитной индукции постоянного магнита вдоль линии А-А на рисунке 9 составляет 1,12 Тл, среднее значение магнитной индукции вдоль дуги полюсного наконечника – 0,99 Тл.

Последовательность действий для определения оптимальной дуги полюсных наконечников ротора с тангенциально намагниченными магнитами:

- 1) определение геометрических размеров и свойств материалов активной части синхронной машины с тангенциально намагниченными магнитами на роторе;
- 2) составление модели синхронной машины с заданными геометрическими размерами и свойствами материалов в программе *FEMM*;
- 3) формирование различных вариантов полюсных наконечников ферромагнитных сегментов на роторе в программе *FEMM*;
- 4) расчет магнитного поля для каждого заданного варианта полюсных наконечников сегментов на роторе и определение значения целевой функции (1);
- 5) определение оптимальной длины дуги полюсного наконечника, при которой обеспечивается минимальное содержание высших гармоник индукции магнитного поля по внутренней окружности сердечника статора.

Рассмотренный подход к оптимизации магнитной цепи может быть использован для синхронной машины с любым заданным числом пар полюсов с тангенциально намагниченными магнитами призматической формы на роторе.

В результате изложенного можно сделать следующие выводы:

- 1) предложен подход для определения оптимальной длины дуги полюсных наконечников ферромагнитных сегментов на роторе синхронной машины с тангенциально намагниченными магнитами призматической формы на роторе. При использовании рассмотренного подхода можно уменьшить содержание высших гармоник магнитной индукции по внутренней окружности сердечника статора и улучшить показатели работы СМПМ;
- 2) в качестве примера выполнено определение оптимальной длины дуги полюсных наконечников ротора четырехполюсной синхронной машины.

Список литературы

1. Бут, Д. А. Бесконтактные электрические машины / Д. А. Бут. – Москва : Высшая школа, 1990. – 416 с. – Текст : непосредственный.
2. Гаврилов, Р. С. Управление синхронными машинами с постоянными магнитами / Р. С. Гаврилов, Ю. Н. Мустафаев. – Санкт-Петербург : Балтийский гос. техн. ун-т, 2019. – 78 с. – Текст : непосредственный.
3. Сравнительный анализ роторных систем синхронных машин на постоянных магнитах / И. В. Кириллов, Р. Г. Апальков, Н. А. Борисоглебский, А. С. Иванов. – Текст : непосредственный // The scientific heritage. – 2021. – № 71. – С. 26–30.
4. Татевосян, А. А. Научные основы проектирования оптимальных конструкций тихоходных синхронных генераторов с постоянными магнитами для ветроэнергетических установок / А. А. Татевосян. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2021. – № 1 (175). – С. 32–38.
5. Харламов, В. В. Анализ схем размещения постоянных магнитов на роторе четырехполюсной электрической машины / В. В. Харламов, Ю. В. Москалев, Л. Е. Серкова. – Текст : непосредственный // Динамика систем, механизмов и машин / под ред. А. В. Косых. – Омск : Омский гос. техн. ун-т, – 2019. – Т. 7. – № 2. – С. 73–79.
6. Оптимизация величины неравномерного воздушного зазора синхронной машины с постоянными магнитами на роторе / В. В. Харламов, Ю. В. Москалев, А. Ю. Милютин, А. П. Попов. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2023. – № 2 (186). – С. 112–118.
7. Krause P.C, Wasynczuk O., Sudhoff S.D. Analysis of electric machinery and drive systems. USA : IEEE Press, 2002, 613 p.
8. Смирнов, А. Ю. Особенности конструирования и анализа высокооборотных синхронных машин с постоянными магнитами на роторе / А. Ю. Смирнов. – Текст : непосредственный // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева / под ред. А. А. Куркина. – Нижний Новгород : Нижегородский гос. техн. ун-т, 2013. – № 4 (101). – С. 231–235.
9. Effect of the load angle on radial and tangential magnetic forces in permanent magnet synchronous machine // researchgate.net : сайт. – Текст : электронный. – URL: https://www.researchgate.net/publication/310828395_Effect_of_the_load_angle_on_radial_and_tangential_magnetic_forces_in_Permanent_Magnet_Synchronous_Machines / (дата обращения: 12.07.2023).
10. Zhang X., Chengming Z., Yu J., Du P., Li L. Analytical model of magnetic field of a permanent magnet synchronous motor with a trapezoidal halbach permanent magnet array, IEEE Transactions on magnetic, 2019, vol. 55 (7), pp. 1-5.
11. Benyoucef D., Taleb R., Helaimi M. Effect of the permanent magnets locations on the voltage by permanent magnet generator. Revue des Energies Renouvelables, 2018, vol. 21 (4), pp. 675-680.
12. Ishikawa T., Watanabe T., Kurita N. Effect of cleaning level on topology optimization of permanent magnet synchronous generator. IEEE Journal of Industry Applications, 2017, vol. 6 (6), pp. 416-421.
13. Вольдек, А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек. – Ленинград : Энергия, 1978. – 832 с. – Текст : непосредственный.

14. Finite Element Method Magnetics // www.femm.info : сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://www.femm.info/> (дата обращения: 10.07.2023).

References

1. But D.A. *Beskontaktnye elektricheskie mashiny* [Contactless electric machines]. Moscow, Higher education Publ., 1990, 416 p. (In Russian).
2. Gavrilov R.S., Mustafaev Yu.N. *Upravlenie sinkhronnymi mashinami s postoiannymi magnitami* [Control of synchronous machines with permanent magnets]. Saint Petersburg, Baltic State Technical University Publ., 2019, 78 p. (In Russian).
3. Kirillov I.V., Apal'kov R.G., Borisoglebskii N.A., Ivanov A.S. Comparative analysis of rotor systems of synchronous permanent magnet machines. *The scientific heritage*, 2021, no. 71, pp. 26-30 (In Russian).
4. Tatevosian A.A. Scientific bases of designing optimal designs of low-speed synchronous generators with permanent magnets for wind power plant. *Omskii nauchnyi vestnik – Omsk Scientific Bulletin*, 2021, no. 1 (175), pp. 32-38 (In Russian).
5. Kharlamov V.V., Moskalev Yu.V., Serkova L.E. Analysis of permanent magnet placement schemes on the rotor of a four-pole electric machine. *Dinamika sistem, mekhanizmov I mashin – Dynamics of systems, mechanisms and machines*, 2019, vol. 7, no. 2, pp. 73-79 (In Russian).
6. Kharlamov V.V., Moskalev Yu.V., Miliutin A.Yu., Popov A.P. Optimization of the size of the uneven air gap of a synchronous machine with permanent magnets on the rotor. *Omskii nauchnyi vestnik – Omsk Scientific Bulletin*, 2023, no. 2 (186), pp. 112-118 (In Russian).
7. Krause P.C., Wasynczuk O., Sudhoff S.D. Analysis of electric machinery and drive systems. USA : IEEE Press, 2002, 613 p.
8. Smirnov A.Yu. Features of the design and analysis of high-speed synchronous machines with permanent magnets on the rotor. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R. E. Alekseeva – Proceedings of the Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev*, 2013, no. 4 (101), pp. 231-235 (In Russian).
9. Effect of the load angle on radial and tangential magnetic forces in permanent magnet synchronous machine. Available at: https://www.researchgate.net/publication/310828395_Effect_of_the_load_angle_on_radial_and_tangential_magnetic_forces_in_Permanent_Magnet_Synchronous_Machines / (accessed: 12.07.2023).
10. Zhang X., Chengming Z., Yu J., Du P., Li L. Analytical model of magnetic field of a permanent magnet synchronous motor with a trapezoidal halbach permanent magnet array, *IEEE Transactions on magnetic*, 2019, vol. 55 (7), pp. 1-5.
11. Benyoucef D., Taleb R., Helaimi M. Effect of the permanent magnets locations on the voltage by permanent magnet generator. *Revue des Energies Renouvelables*, 2018, vol. 21 (4), pp. 675-680.
12. Ishikawa T., Watanabe T., Kurita N. Effect of cleaning level on topology optimization of permanent magnet synchronous generator. *IEEE Journal of Industry Applications*, 2017, vol. 6 (6), pp. 416-421.
13. Vol'dek A.I. *Elektricheskie mashiny* [Electric machines]. Leningrad, Energiia Publ., 1978, 832 p. (In Russian).
14. Finite Element Method Magnetic. Available at: <http://www.femm.info/> (accessed: 10.07.2023).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Харламов Виктор Васильевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: hvv-omgups@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kharlamov Viktor Vasilyevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor of Sciences in Engineering, professor, head of the department «Electric machines and electrical engineering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: hvv-omgups@mail.ru

Электротехнические комплексы и системы

Москалев Юрий Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат техн. наук, доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: yuriyvm@mail.ru

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

Милютин Алексей Юрьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: alex_soft_94_94@mail.ru

Milyutin Alexey Yurevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Postgraduate student of the department «Electric machines and electrical engineering» OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: alex_soft_94_94@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Харламов, В. В. Оптимизация полюсных наконечников ротора синхронной машины с постоянными магнитами / В. В. Харламов, Ю. В. Москалев, А. Ю. Милютин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 4 (56). – С. 113 – 121.

Kharlamov V.V., Moskalev Yu.V., Milyutin A.Yu. Optimization of rotor pole tips synchronous machine with permanent magnets. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 4 (56), pp. 113-121 (In Russian).

УДК 621.314.212:620.111.3

А. А. Кузнецов, М. А. Волчанина, А. В. Горлов

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

СРАВНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ И ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ РАЗРЯДОВ В МАСЛЕ В ЗАДАЧАХ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Аннотация. Статья посвящена исследованию параметров электрических, акустических и визуальных сигналов, регистрируемых на экспериментальной установке, моделирующей различные дефекты силовых трансформаторов. Рассматриваются акустические сигналы, у которых амплитуда, форма, период следования различные в разные моменты времени. Данные акустические сигналы являются нестационарными.

В статье выполнен сравнительный анализ акустических сигналов и визуальных изображений высоковольтных разрядов в трансформаторном масле. Акустические сигналы в работе получены при помощи установки СЦАД-16, а визуальные изображения, соответствующие различным режимам работы трансформатора, регистрировались при помощи быстродействующей видеокамеры с высоким разрешением.

Приводится описание имитатора с расширенным набором дефектов силовых трансформаторов, встречающихся во время эксплуатации. В работе исследованы электроды различной формы, имитирующие возможные дефекты силовых трансформаторов во время эксплуатации. В качестве возможных дефектов выступают: межвитковые замыкания и пробой на корпус бака силового трансформатора.

Произведен анализ электрических параметров различных дефектов в режимах «начальный», «стабильный» и «сильный», соответствующие различным уровням напряжения на электродах. Выполнен анализ соответствующих визуальных изображений, включающих в себя размер электрических разрядов, наличие и количественные параметры пузырьков выделяемых газов.

Полученные результаты позволяют идентифицировать характерные дефекты силовых трансформаторов при их эксплуатации. Сравнение дефектных сигналов силовых трансформаторов с сигналами имитатора с расширенным набором дефектов позволяет повысить достоверность диагностирования технического состояния силовых трансформаторов.

В дальнейшем в рамках данной тематики планируется совершенствование имитатора с расширенным набором дефектов с целью расширения имитируемых дефектов силовых трансформаторов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00477, <https://rscf.ru/project/23-29-00477/>.

Ключевые слова: дефекты изоляции, визуальные изображения, частичные разряды, акустическая диагностика, имитатор дефектов.

Andrey A. Kuznetsov, Maria A. Volchanina, Anton V. Gorlov

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

COMPARISON OF ACOUSTIC SIGNALS AND VIDEO IMAGES OF HIGH-VOLTAGE DISCHARGES IN OIL FOR DIAGNOSIS TASKS OF POWER TRANSFORMERS

Abstract. The article is devoted to the study of the parameters of electrical, acoustic and visual signals recorded on an experimental setup that simulates various defects in power transformers. We consider acoustic signals whose amplitude, shape, and repetition period are different at different times. These acoustic signals are non-stationary.

The article presents a comparative analysis of acoustic signals and visual images of high-voltage discharges in transformer oil. Acoustic signals in operation were obtained using a digital acoustic diagnostics system, and visual images corresponding to various operating modes of the transformer were recorded using a high-speed, high-resolution video camera.

The article provides a description of a simulator with an extended set of power transformer defects encountered during operation. In this work, electrodes of various shapes are studied, simulating possible defects in power transformers during operation. The work examined electrodes of various shapes that simulate possible defects in power transformers during operation. Possible defects include: interturn short circuits and breakdown on the body of the power transformer tank.

The electrical parameters of various defects were analyzed in the "low", "stable" and "powerful" modes, corresponding to different voltage levels on the electrodes. The analysis of the corresponding visual images, including the size of the electric plasma, the presence and quantitative parameters of the bubbles of the emitted gases, is performed.

The results obtained will allow us to identify characteristic defects of power transformers during their operation. Comparison of defective signals from power transformers with signals from a simulator with an expanded set of defects will increase the reliability of diagnosing the technical condition of power transformers.

In the future, within the framework of this topic, it is planned to improve the simulator with an expanded set of defects in order to expand the simulated defects of power transformers.

The study was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation within the framework of the scientific project № 23-29-00477, <https://rscf.ru/project/23-29-00477/>.

Keywords: insulation defects, visual images, partial discharges, acoustic diagnostics, defects simulator.

В настоящее время существует большое количество методов диагностирования силовых трансформаторов. Повышение достоверности диагностирования является актуальным с позиций реализации одной из функций цифровых подстанций. В работе рассматривается один из способов повышения достоверности на основе применения имитатора различных дефектов, возникающих в реальных трансформаторах. Сравнение реальных сигналов, зарегистрированных на силовых трансформаторах, с сигналами, зарегистрированными на имитаторе дефектов, позволит распознать вид дефекта и степень его развития.

Устройства для мониторинга силовых трансформаторов на настоящее время основаны на различных физических принципах, включая электромагнитные и акустические преобразователи частичных разрядов, вибрационные, электрические, тепловые и ряд других [1, 2]. Диагностирование силовых трансформаторов в условиях железнодорожного транспорта подтвердило использование переносных акустических средств контроля, основанных на регистрации параметров частичных разрядов.

При этом на бак силового трансформатора устанавливаются акустические датчики, которые соединяются с входами блока контроля интенсивности частичных разрядов. Данные полученные на выходе блока контроля частичных разрядов, поступают на вход блока расчетных моделей, который производит обработку данных диагностирования с учетом изменения температуры обмоток силового трансформатора. Данные блока расчетных моделей

передаются на вход блока визуализации контролируемых параметров силового трансформатора.

Для компенсации температурных погрешностей, вызванных сезонными изменениями температуры, изменениями вязкости и коэффициента затухания при распространении акустических волн и, как следствие, уменьшением амплитуды, частотных характеристик, формы сигнала, дополнительно введен блок имитатора дефектов, содержащий регулируемый блок питания постоянного тока, электронный коммутатор, генератор тактовых импульсов, повышающий трансформатор, маслонаполненный бак, электрический разрядник, блок контроля температуры имитатора дефектов, блок поддержания температуры в маслонаполненном баке, акустические датчики, установленные на корпус маслонаполненного бака имитатора дефектов [3, 4].

Недостатком существующих устройств диагностирования [2] является ограниченное количество дефектов, воспроизводимых имитатором, и, как следствие, отсутствие возможности распознавания типа дефекта при мониторинге силового трансформатора. Поэтому расширение количества дефектов, воспроизводимых имитатором, и повышение достоверности распознавания вида дефекта силового трансформатора путем дальнейшего сопоставления параметров акустических сигналов, соответствующих определенному виду дефекта, возникающему при мониторинге силовых трансформаторов, являются актуальными задачами.

На рисунке 1 изображена схема устройства для мониторинга силовых трансформаторов с применением имитатора с расширенным набором дефектов.

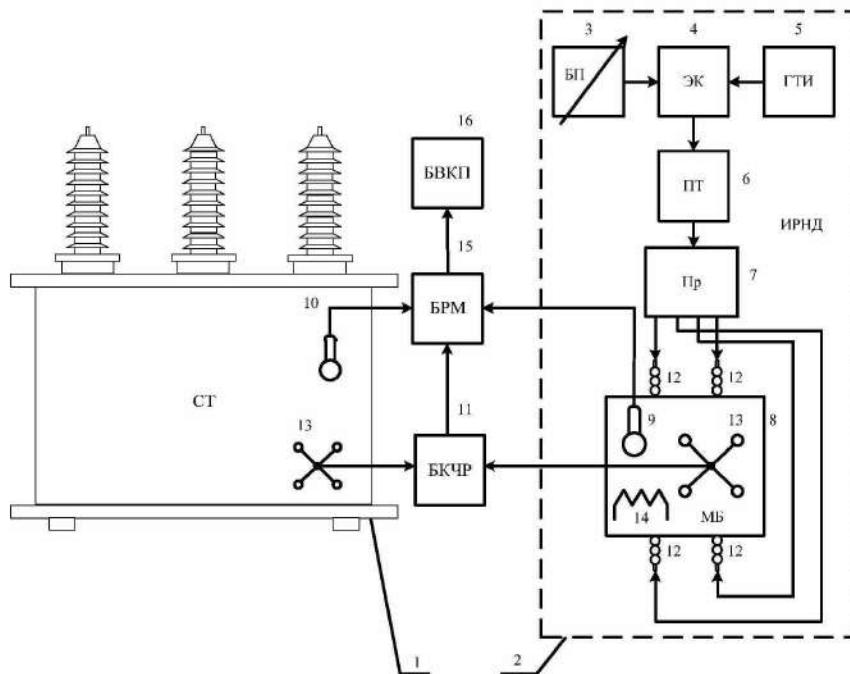


Рисунок 1 – Схема устройства для мониторинга силовых трансформаторов с применением имитатора с расширенным набором дефектов

Устройство для мониторинга силовых трансформаторов с применением имитатора с расширенным набором дефектов (см. рисунок 1) содержит силовой трансформатор (СТ) 1, блок имитатора с расширенным набором дефектов (ИРНД) 2, состоящий из регулируемого блока питания постоянного тока (БП) 3, электронного коммутатора (ЭК) 4, генератора тактовых импульсов (ГТИ) 5, повышающего трансформатора (ПТ) 6, переключателя (Пр) 7, маслонаполненного бака (МБ) 8, изоляторов 12, блока контроля температуры имитатора дефектов 9, блока поддержания температуры в маслонаполненном баке 14, блока измерения температуры обмоток СТ 10, блока контроля интенсивности частичных разрядов (БКИР) 11;

акустических датчиков 13, блока расчетных моделей (БРМ) 15, блока визуализации контролируемых параметров трансформатора (БВКП) 16.

На рисунке 2 показана схема расположения электродов в маслонаполненном баке (вид сверху).

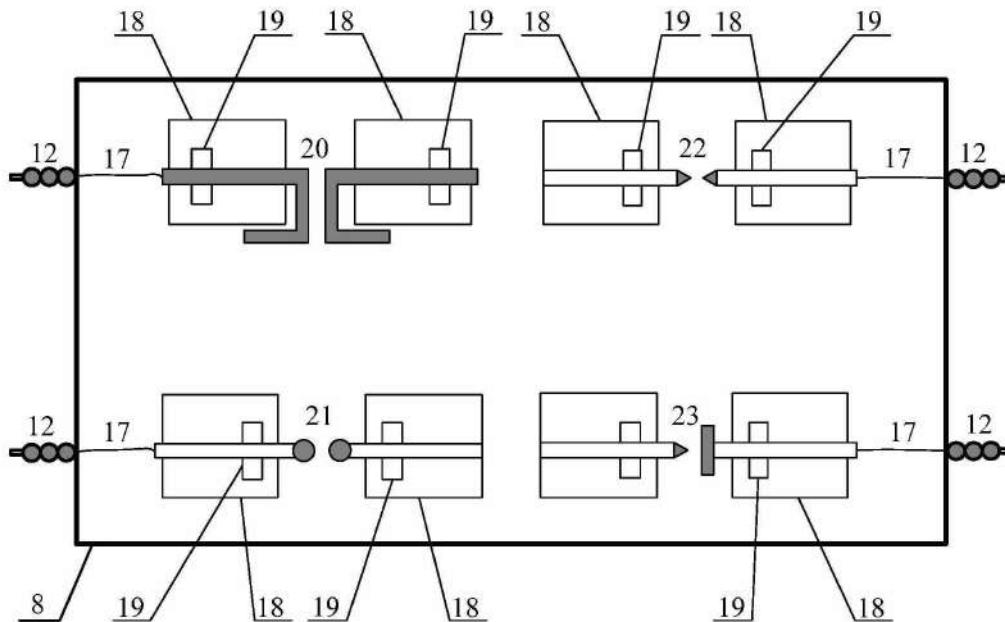


Рисунок 2 – Схема расположения электродов в маслонаполненном баке (вид сверху)

На маслонаполненном баке 8 расположены изоляторы 12, акустические датчики 13, соединительные провода 17, изолирующие основания 18 стержней 19 для крепления электродов различной формы 20, 21, 22, 23, имитирующих различные дефекты изоляции, трансформаторного масла 24.

Электроды различной формы позволяют имитировать различные дефекты изоляции: разрядные явления между элементами металлических конструкций трансформатора и дефектами изоляции токоведущих частей, разряды в изолированных проводниках с нарушением изоляции. В статье более подробно рассмотрены электроды, представленные элементами типа «шар – шар» и «проводники с нарушенной изоляцией». Набор электродов может быть расширен для исследования других видов дефектов [5].

Имитатор с расширенным набором дефектов основан на воспроизведении электрических разрядов различной мощности при изменении управляющего напряжения между электродами различной формы. Дефекты изоляции, сопровождающиеся разрядными явлениями, различаются по параметрам зарегистрированных акустических сигналов.

На рисунке 3 приведена осциллограмма нестационарного акустического сигнала, полученного с использованием электродов вида «шар – шар». На рисунке 4 приведена осциллограмма нестационарного акустического сигнала, полученного с использованием электродов с «нарушенной изоляцией». Осциллограммы приведены по убыванию мощности разрядов при одинаковых условиях воздействия на соответствующие электроды. По вертикальной оси отложены амплитуды сигналов в единицах АЦП, по горизонтальной – время в микросекундах [6].

За время измерений, равное 30 с, было зарегистрировано 892 и 1467 акустических сигналов, превышающих заданное пороговое значение. При этом амплитуды, форма и периодичность следования таких сигналов отличались друг от друга, поэтому далее такие сигналы будем называть нестационарными. В спектре сигналов, представленных на рисунках 4 и 5, регистрируются преобладающие частоты, далее именуемые доминантными частотами, которые являются признаками сигналов, относящихся к рассматриваемым видам дефектов.

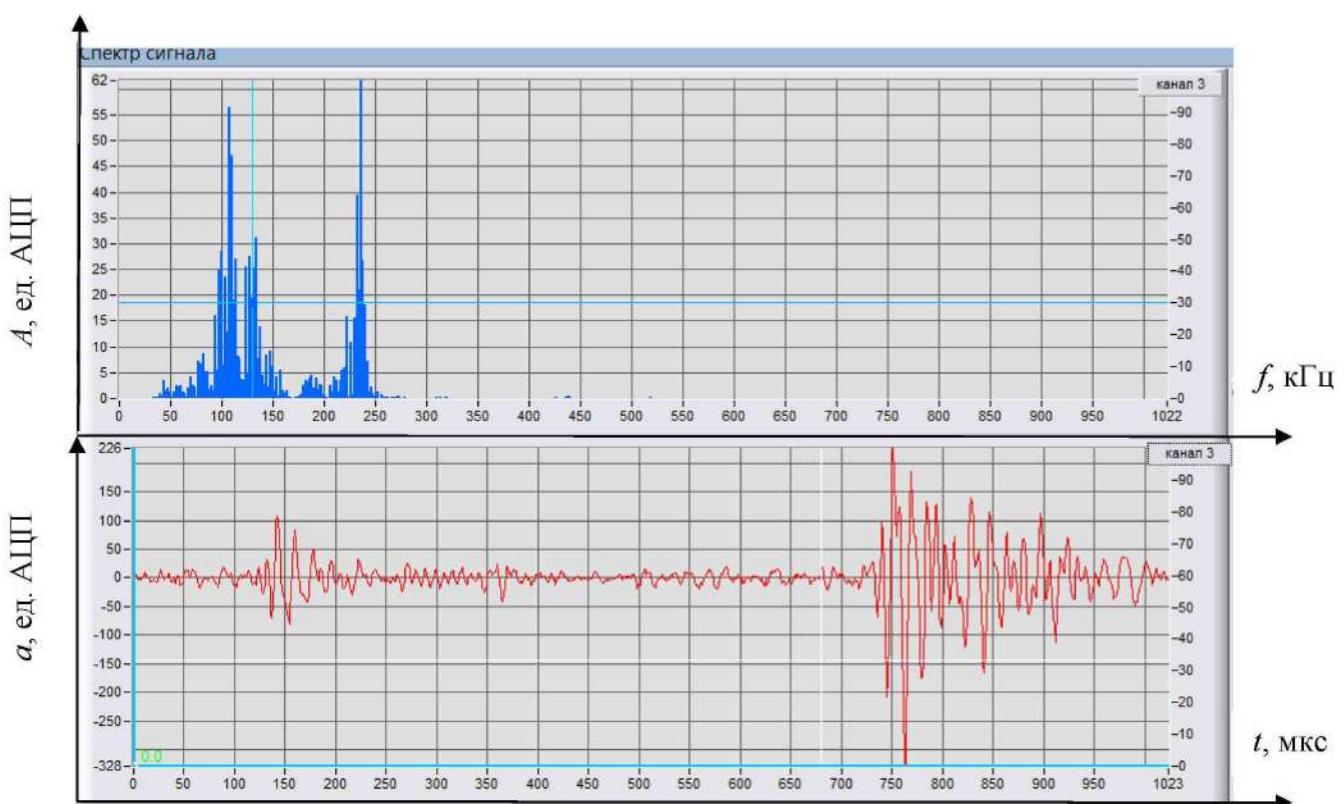


Рисунок 3 – Осциллография нестационарного акустического сигнала, полученного с использованием электродов вида «шар – шар»

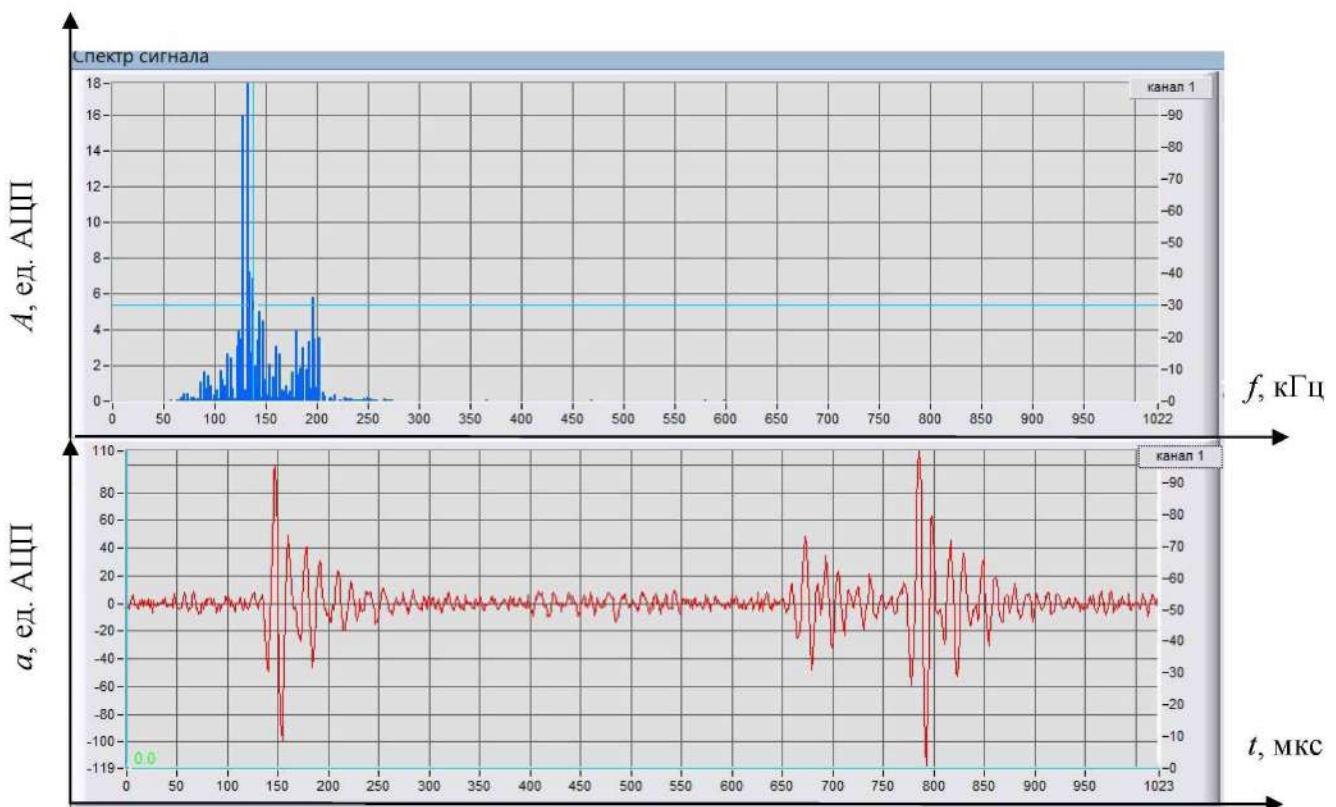


Рисунок 4 – Осциллография нестационарного акустического сигнала, полученного с использованием электродов вида «нарушенная изоляция»

При реализации дифференциального метода измерений на первом этапе регистрируют импульсы частичных разрядов при помощи акустических датчиков на силовом трансформаторе. При наличии частичных разрядов производится сравнение и выравнивание температуры масла в ИРНД по отношению к температуре в СТ при помощи блока контроля температуры маслонаполненного бака, блока измерения температуры обмоток СТ и блока поддержания температуры в маслонаполненном баке [7, 8].

На втором этапе производится последовательный выбор необходимых электродов 20, 21, 22, 23 при помощи переключателя (Пр) 7, далее выполняются измерения импульсов частичных разрядов на имитаторе с расширенным набором дефектов 2. Процесс измерения импульсов частичных разрядов на имитаторе с расширенным набором дефектов выполняется следующим образом: генератор управляющих импульсов (ГУИ) вырабатывает импульсы низкого напряжения, которые подаются на электронный коммутатор, предназначенный для прерывания тока в цепи первичной обмотки повышающего трансформатора. Высокое напряжение с частотой, вырабатываемой ГТИ, от вторичной обмотки повышающего трансформатора подается на высоковольтный умножитель, на выходе которого формируется постоянное напряжение, подводимое к одному из электродов 20, 21, 22, 23. Акустические датчики регистрируют сигналы на корпусе ИРНД и передают их в блок контроля интенсивности частичных разрядов. Из БКЧР зарегистрированные акустические сигналы от диагностируемого СТ и ИРНД поступают в блок расчетных моделей. В БРМ осуществляется сравнение параметров акустических сигналов от СТ и ИРНД. При их соответствии переходят к определению вида дефекта изоляции и рекомендациям по его устранению и недопущению выхода из работоспособного состояния СТ. При несоответствии параметров акустических сигналов от СТ и ИРНД производят переключение вида электродов 20, 21, 22, 23 при помощи Пр и процедура повторяется. Полученные результаты диагностирования выводятся при помощи блока визуализации контролируемых параметров 16.

Имитатор с расширенным набором дефектов высоковольтных трансформаторов состоит из высоковольтного источника испытательного напряжения и разрядников различной формы, имитирующих дефекты различного вида. На рисунке 5 приведен внешний вид установки, реализующей имитатор с расширенным набором дефектов [9 – 11].

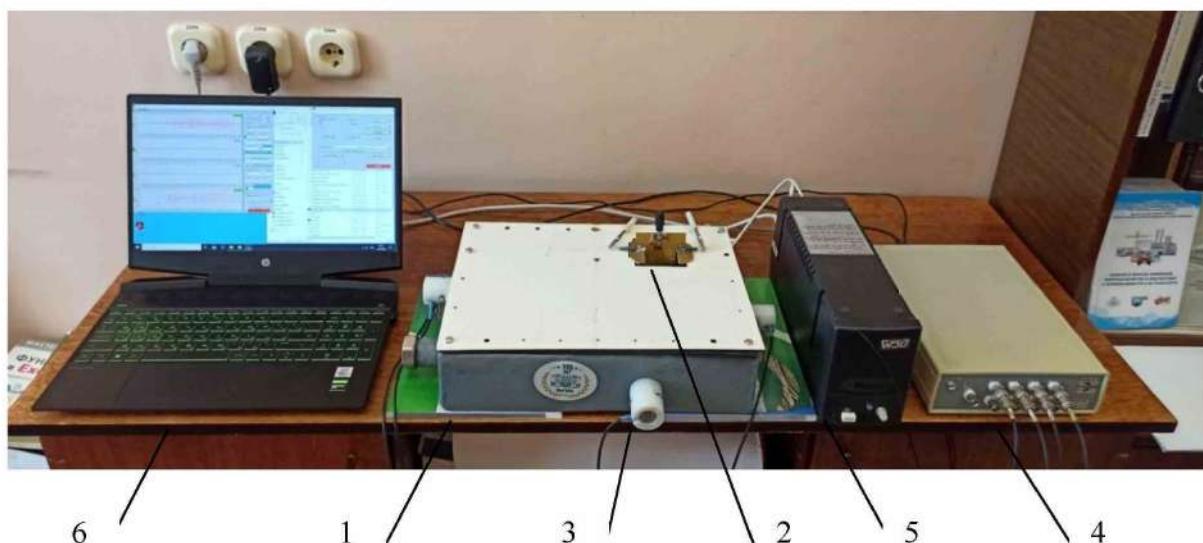


Рисунок 5 – Внешний вид установки, реализующей имитатор с расширенным набором дефектов

На рисунке 6 показаны следующие составные элементы ИРНД: масляный бак 1; держатель сменных электродов 2; акустические преобразователи 3; система акустическая СЦАД-16 4; высоковольтный источник испытательного напряжения (ВИН) 5; управляющий компьютер 6.

Электротехнические комплексы и системы

Функциональная схема высоковольтного источника испытательного напряжения приведена на рисунке 6.

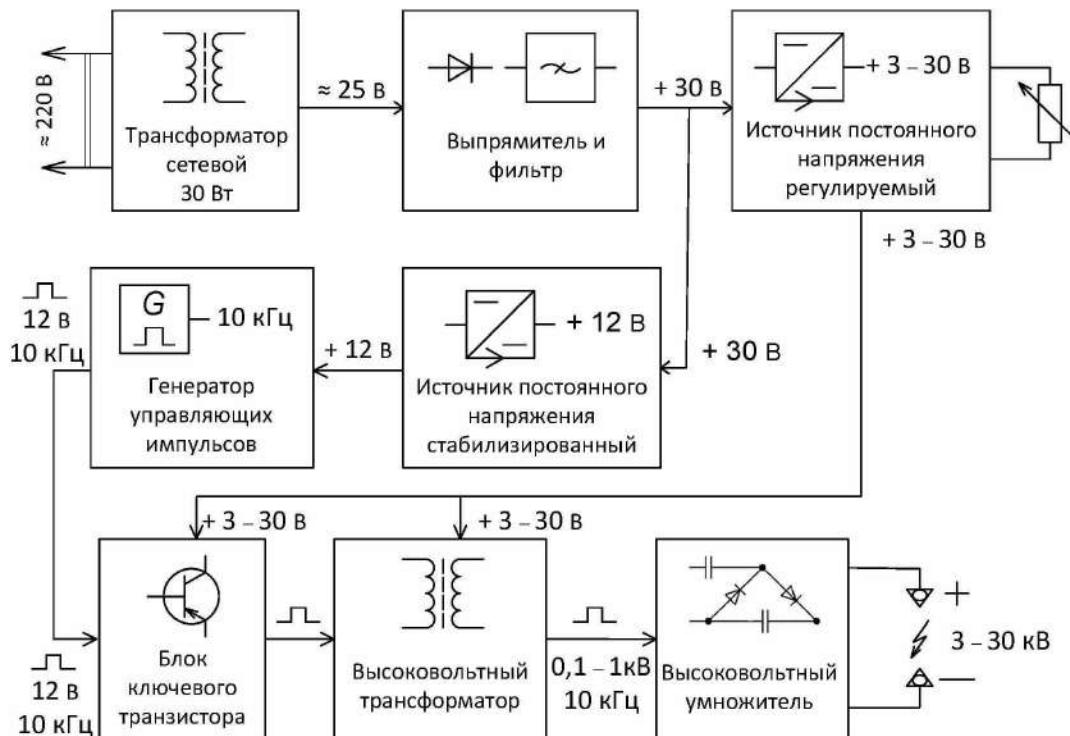


Рисунок 6 – Функциональная схема высоковольтного источника испытательного напряжения

На рисунке 7 приведена схема расположения сменных электродов в прозрачном корпусе с трансформаторным маслом в составе имитатора с расширенным набором дефектов.

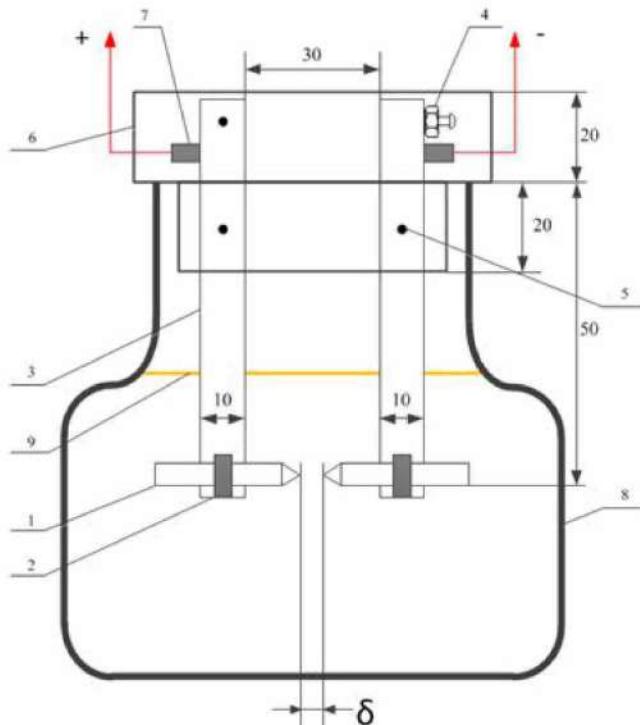


Рисунок 7 – Схема расположения сменных электродов в прозрачном корпусе с маслом: 1 – сменные электроды; 2 – зажим быстрого крепления; 3 – планка токопроводящая; 4 – регулировочный винт; 5 – ось подвижной планки; 6 – ограничитель; 7 – клемма высокого напряжения; 8 – прозрачный корпус; 9 – уровень масла

Электротехнические комплексы и системы

Функциональная схема высоковольтного источника испытательного напряжения содержит последовательное соединение следующих блоков. Сетевой трансформатор, выпрямитель и фильтр, предназначены для формирования постоянного напряжения питания последующих блоков.

Блок регулируемого источника постоянного напряжения и блок стабилизированного источника постоянного напряжения предназначены для питания генератора управляющих импульсов.

Генератор управляющих импульсов предназначен для генерации импульсов, под воздействием которых мощный ключевой транзистор коммутирует ток в первичной обмотке высоковольтного трансформатора.

На вторичной обмотке высоковольтного трансформатора в зависимости от напряжения регулируемого источника постоянного напряжения формируются импульсы высокого напряжения. Данные импульсы при помощи высоковольтного умножителя преобразуются в постоянное напряжение, поступающее на электроды высоковольтного разрядника имитатора дефектов.

Сменные электроды различной формы погружаются в прозрачный корпус, наполненный трансформаторным маслом, как показано на рисунке 7. На клеммы имитатора с высоковольтного источника подается напряжение. Через токопроводящие планки напряжение подается на сменные электроды, между которыми возникает разряд (искра). Частоту и силу разряда можно регулировать с помощью источника испытательного напряжения. Зазор δ можно регулировать при помощи регулировочного винта в диапазоне от 0,5 до 5 мм.

Электроды выполняют роль электрических разрядников. Они способны функционировать в различных средах – в трансформаторном масле или в воздухе. При выборе определенного электрода происходит имитация определенного вида дефекта изоляции.

При воздействии постоянного пробивного напряжения на электродах различной формы образуются разрядные явления, по форме близкие к разрядам в силовом трансформаторе. Трансформаторное масло, являющееся диэлектриком, стремится погасить электрический разряд, однако при воздействии высокого пробивного напряжения разряды повторяются. В силу случайного характера разрядов импульсы имеют различные амплитуду и форму.

Для контроля высокого выходного напряжения в процессе испытаний электродов различной формы на высоковольтном источнике предусмотрен разъем для контроля задающего напряжения низкого уровня. В процессе испытаний электродов различной формы зарегистрированы уровни низкого напряжения, соответствующие «начальному», «стабильному» и «высокому» значениям электрического разряда. Значения задающих и управляющих напряжений источника для электролов различной формы представлены в таблицах 1 и 2, а в таблице 3 приведено соответствие задающего и высокого выходного напряжений. Как показано на рисунке 8, зависимость является линейной в широком диапазоне, поэтому в некоторых режимах для определения высоких значений задающих и выходных напряжений применялась экстраполяция данных выражением, представленным на рисунке 8.

Таблица 1 – Режимы электрических разрядов. Электрод типа «шар – шар» при зазоре $\delta = 1$ мм

№ п/п	Режим разряда	Задающее напряжение источника, В
1	Начальный	8,8
2	Стабильный	13,2
3	Высокий	18,2

Таблица 2 – Режимы электрических разрядов. Электроды с «нарушенной изоляцией» при зазоре $\delta = 1$ мм

№ п/п	Режим разряда	Управляющее напряжение источника, В
1	Начальный	8,8
2	Стабильный	10,3
3	Высокий	12,2

Электротехнические комплексы и системы

Таблица 3 – Соответствие задающего и высокого выходного напряжений

№ п/п	Напряжение	
	первичное, В	вторичное, кВ
1	7,7	1,29
2	7,9	2,8
3	8,2	3,5
4	8,8	5,46
5	9,5	6,1
6	9,9	7,0
7	10,7	8,0
8	11,6	9,0
9	12,2	10,0
10	14,5	11,0

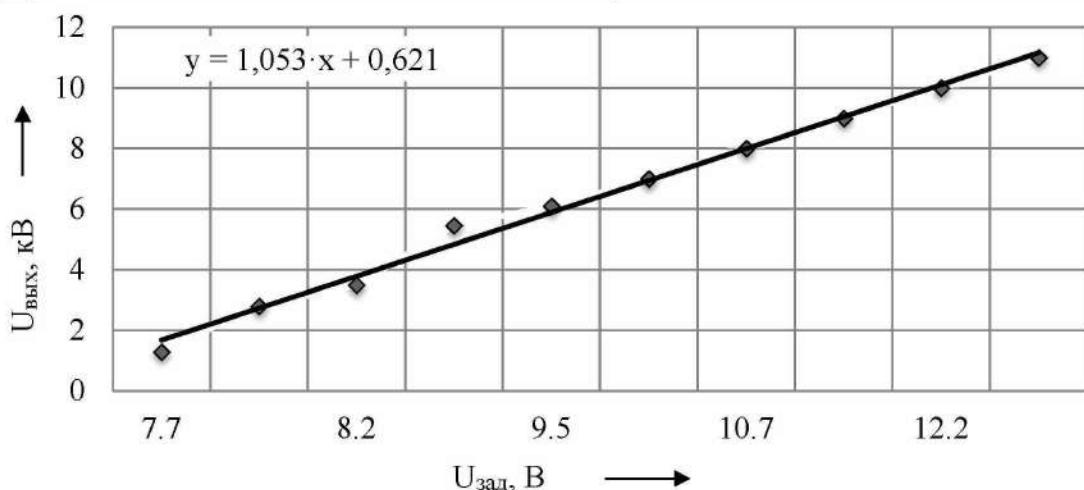


Рисунок 8 – Взаимозависимость задающего и выходного напряжений высоковольтного источника

На рисунках 9, *а* – *г* приведены изображения разрядов в процессе работы имитатора с использованием электродов типа «шар – шар». Рисунки приведены в порядке возрастания интенсивности разрядных процессов между электродами типа «шар – шар» с различными значениями выходного напряжения ВИНа, соответствующими «исходному» (*а*), «начальному» (*б*), «среднему» (*в*) и «высокому» (*г*) состояниям. На рисунках 9, *в*, *г* видно выделение газов в трансформаторном масле в виде пузырьков в непосредственной близости от электрического разряда.

На рисунках 10, *а* – *г* приведены изображения разрядов в процессе работы имитатора с использованием электродов типа «нарушенная изоляция». Рисунки приведены в порядке возрастания интенсивности разрядов процессов между электродами типа «нарушенная изоляция» с различными значениями выходного напряжения ВИНа, соответствующими «исходному» (*а*), «начальному» (*б*), «среднему» (*в*) и «высокому» (*г*) состояниям. На рисунках 10, *в*, *г* видно выделение газов в трансформаторное масло.

Испытания электродов различной формы производились в трансформаторном масле. Регистрировались визуальные изображения, соответствующие режимам «начальный», «стабильный» и «сильный», а также соответствующие им напряжения на высоковольтном источнике. Регистрация изображений осуществлялась быстродействующей видеокамерой с частотой 100 кадров в секунду и высоким разрешением – 1920×1080 ppd. В таблицах 4 и 5 приведены размеры электродов, размер электрического разряда, размер и количество пузырьков выделяющихся газов. Область выделенных пузырьков выражалась в процентах от общей площади изображения. Использование быстродействующей видеокамеры позволило

Электротехнические комплексы и системы

сопоставить моменты времени с наиболее яркими разрядами, их количество, а также время появления пузырьков газа. В те же моменты времени выбирались характерные акустические сигналы, зарегистрированные системой акустического контроля типа СЦАД-16.

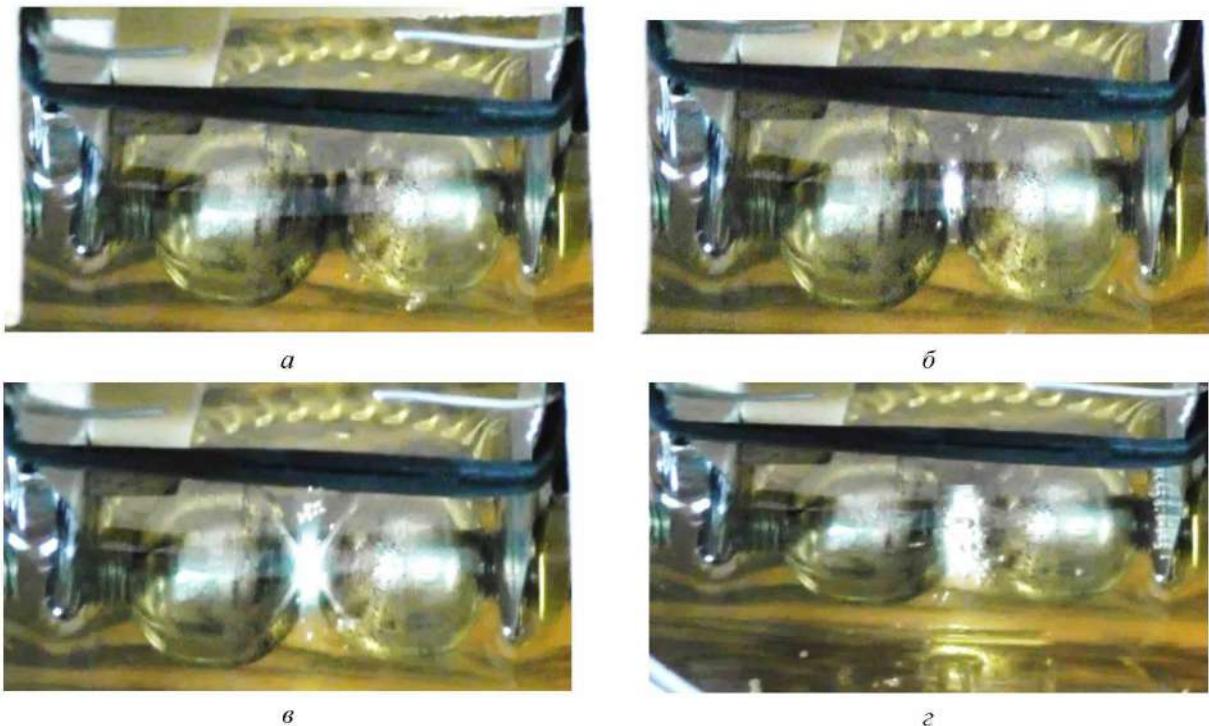


Рисунок 9 – Изображения разрядов на имитаторе с использованием электродов типа «шар – шар»,
 $U_{зад} = 5 \dots 20$ В

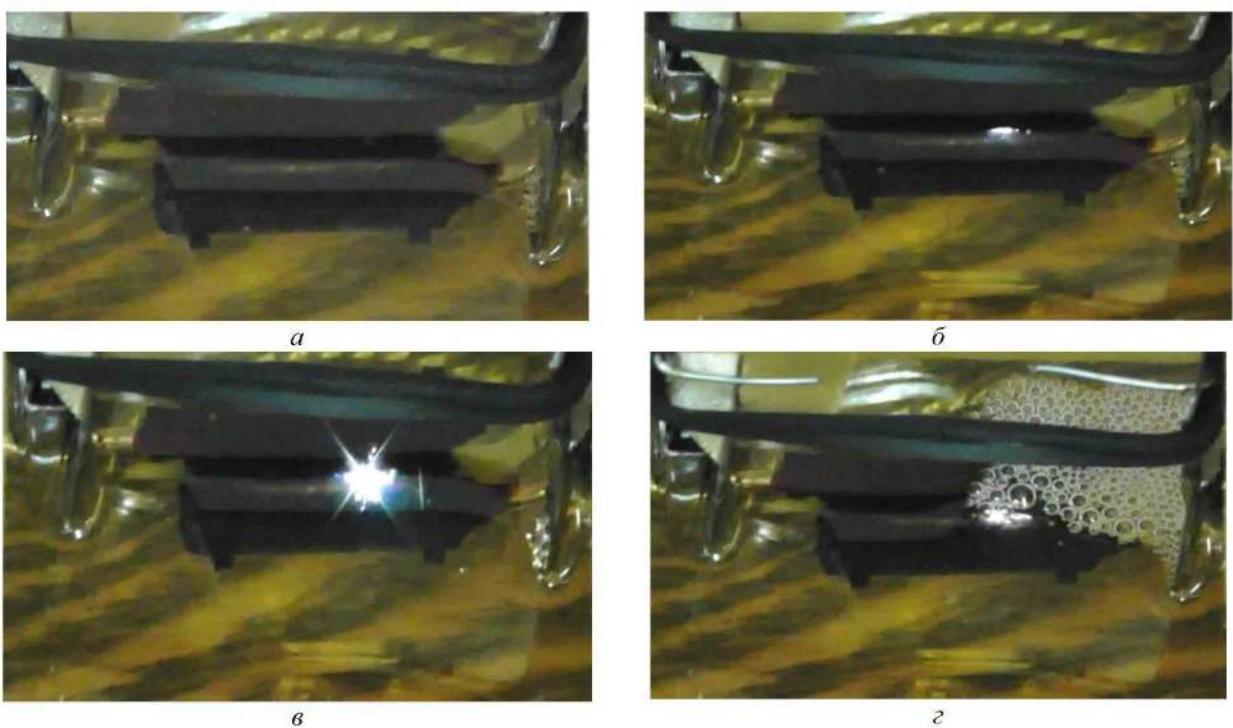


Рисунок 10 – Изображения разрядов на имитаторе с использованием электродов типа «нарушенная изоляция»,
 $U_{зад} = 5 \dots 20$ В

Электротехнические комплексы и системы

Таблица 4 – Обработка визуальных изображений разрядов на имитаторе с использованием электродов типа «шар – шар»

Режим разряда	Размер электродов, мм	Размер электрической плазмы, мм	Размер пузырьков, мм	Область пузырьков, %
Без разряда	D = 16	–	–	–
Начальный		x = 1; y = 4,5	d = 0,2	1,5
Стабильный		x = 2; y = 7	d = 0,2... 0,5	5,7
Высокий		x = 3,5; y = 9	d = 0,3... 1,2	13,5

Таблица 5 – Обработка визуальных изображений разрядов на имитаторе с использованием электродов типа «нарушенная изоляция»

Режим разряда	Размер электродов, мм	Размер электрической плазмы, мм	Размер пузырьков, мм	Область пузырьков, %
Без разряда	x = 22; y = 7	–	–	–
Начальный		x = 3; y = 1	d = 0,4	0,3
Стабильный		x = 4; y = 3	d = 0,5	1
Высокий		x = 4; y = 2	d = 0,5... 2,5	50

Электрические разряды на электродах с различной формой при одинаковом расстоянии $\delta = 1$ мм возникали при различном испытательном напряжении, как показано в таблицах 1 и 2. Численные значения управляющего напряжения для электродов различной формы в режимах «начальный», «стабильный» и «сильный» приведены в таблице 6. В таблице 6 представлены численные значения задающего напряжения, регистрируемого на высоковольтном источнике. Высокое напряжение, подаваемое на электроды различной формы, контролировалось путем измерения задающего напряжения и определялось по данным таблицы 3.

На основании изложенного сформулированы следующие выводы.

1. Выполнен сравнительный анализ акустических сигналов и визуальных изображений высоковольтных разрядов в трансформаторном масле. Акустические сигналы получены при помощи установки СЦАД-16, а визуальные изображения, соответствующие различным режимам работы трансформатора, регистрировались при помощи быстродействующей видеокамеры с высоким разрешением.

2. Разработан имитатор с расширенным набором дефектов силовых трансформаторов, встречающихся во время эксплуатации. Исследованы два вида электродов с различной формой, имитирующие характерные дефекты силовых трансформаторов во время эксплуатации.

3. Зарегистрированы электрические параметры различных дефектов в режимах «начальный», «стабильный» и «высокий», соответствующие различным уровням напряжения на электродах. Произведен анализ визуальных изображений, включающих в себя размер электрических разрядов, наличие и количественные параметры пузырьков газов, выделяемых в трансформаторное масло.

4. Полученные результаты могут быть использованы при идентификации характерных дефектов силовых трансформаторов по результатам акустического контроля во время эксплуатации. Сравнение параметров дефектов силовых трансформаторов с сигналами имитатора с расширенным набором дефектов повышают достоверность диагностирования технического состояния силовых трансформаторов во время эксплуатации.

Электротехнические комплексы и системы

Дальнейшие исследования будут направлены на совершенствование высоковольтного источника испытательных напряжений и изучение других дефектов силовых трансформаторов, возникающих при их эксплуатации.

Список литературы

1. Патент № 2370784 Российской Федерации, МПК G01R 31/34 (2006.01). Способ определения места локализации и вида дефектов в активной части электрической машины, находящейся в рабочем режиме : № 2008108297/28 : заявлено 05.03.2008 : опубликовано 20.10.2009 / Аксенов Ю. П., Прошлецов А. П. – 8 с. : ил. – Текст : непосредственный.
2. Патент № 2779269 Российской Федерации, МПК G01R 31/62 (2020.01). Устройство для мониторинга силовых трансформаторов : № 2021132617 : заявлено 08.11.2021 : опубликовано 05.09.2022 / Волчанина М. А., Горлов А. В., Еркебаев А. Ж., Кузнецов А. А.; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения». – 14 с. : ил. – Текст : непосредственный.
3. Kuznetsov A.A., Harlamov V.V., Volchanina M.A., Gorlov A.V. Increasing the reliability of diagnosing power transformers by using a defect simulator. *Networked control systems for connected and automated vehicles*, 2023, pp. 351-357.
4. Волчанина, М. А. Повышение достоверности диагностирования силовых трансформаторов в условиях сезонных изменений температуры / М. А. Волчанина, А. А. Кузнецов, А. В. Горлов. – Текст : непосредственный // Электротехнические системы и комплексы. – 2021. – № 4 (53). – С. 33–38.
5. Strachan S.M., Rudd S., McArthur S.D.J., Judd M.D., Meijer S., Gulski E. Knowledge-based diagnosis of partial discharges in power transformers. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2008, no. 15 (1), pp. 259-268.
6. Акустико-эмиссионный контроль железнодорожных конструкций / А. Н. Серьезнов, Л. Н. Степанова, В. В. Ивлиев [и др.]. – Новосибирск : Наука, 2011. – 272 с. – Текст : непосредственный.
7. Markalous S.M., Tenbohlen S., Feser K. Detection and location of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signals. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2008, no. 15 (6), pp. 1576-1583.
8. Ibrahim B.M.Taha, Dessouky Sobhy S., Ghaly Ramy N.R., Ghoneim Sherif S.M. Enhanced partial discharge location determination for trans-former insulating oils considering allocations and uncertainties of acoustic measurements. *Alexandria Engineering Journal*, 2020, no. 6 (59), pp. 4759-4769.
9. Измерение параметров акустических сигналов имитатора дефектов силовых трансформаторов / В. Т. Черемисин, А. А. Кузнецов, М. А. Волчанина, А. В. Горлов. – Текст : непосредственный // Транспортные системы и технологии. – 2020. – Т. 6. – № 4. – С. 161–171.
10. Русов, В. А. Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования / В. А. Русов. – Екатеринбург : Уральский государственный университет путей сообщения, 2011. – 370 с. – Текст : непосредственный.
11. Исследование высоковольтных разрядов в масле на имитаторе с различным набором дефектов / А. В. Горлов, М. А. Волчанина, А. В. Пономарев, А. А. Кузнецов. – Текст : непосредственный // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 1. – С. 83–94.

References

1. Aksenov Ju.P., Proshlecov A.P. Patent RU 2370784 C1, 20.10.2009.
2. Volchanina M.A., Gorlov A.V., Erkebaev A. Zh., Kuznetsov A. A. Patent RU 2779269 C1, 05.09.2022.

3. Kuznetsov A.A., Harlamov V.V., Volchanina M.A., Gorlov A.V. Increasing the reliability of diagnosing power transformers by using a defect simulator. *Networked control systems for connected and automated vehicles*, 2023, pp. 351-357.
4. Volchanina M.A., Kuznetsov A. A., Gorlov A.V. Improving the reliability of diagnosing power transformers in conditions of seasonal temperature changes. *Elektrotehnicheskie sistemy i kompleksy – Electrical engineering systems and complexes*, 2021, no. 4 (53), pp. 33-38 (In Russian).
5. Strachan S.M., Rudd S., McArthur S.D.J., Judd M.D., Meijer S., Gulski E. Knowledge-based diagnosis of partial discharges in power transformers. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2008, no. 15 (1), pp. 259-268.
6. Ser'eznov A.N., Stepanova L.N., Ivliev V.V., Kabanov S.I., Beher S.A. *Akustiko-emissionnyj kontrol' zhelezno-dorozhnyh konstrukcij* [Acoustic emission control of railway structures]. Novosibirsk, Science Publ., 2011, 272 p. (In Russian).
7. Markalous S.M., Tenbohlen S., Feser K. Detection and location of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signals. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2008, no. 15 (6), pp. 1576-1583.
8. Ibrahim B.M.Taha, Dessouky Sobhy S., Ghaly Ramy N.R., Ghoneim Sherif S.M. Enhanced partial discharge location determination for trans-former insulating oils considering allocations and uncertainties of acoustic measurements. *Alexandria Engineering Journal*, 2020, no. 6 (59), pp. 4759-4769.
9. Cheremisin V.T., Kuznetsov A.A., Volchanina M.A., Gorlov A.V. Measurement of the parameters of acoustic signals of the power transformer defect simulator. *Transportnye sistemy i tekhnologii – Transport systems and technologies*, 2020, vol. 6, no. 4, pp. 161-171 (In Russian).
10. Rusov V.A. *Izmerenie chasticchnyh razryadov v izolyacii vysokovol'tnogo oborudovaniya* [Measurement of partial discharges in the insulation of high-voltage equipment]. Ekaterinburg, USURT Publ., 2011, 370 p. (In Russian).
11. Gorlov A.V., Volchanina M.A., Ponomarev A.V., Kuznetsov A.A. Study of high-voltage discharges in oil using a simulator with a different set of defects. *Innovacionnye transportnye sistemy i tekhnologii – Innovative transport systems and technologies*, 2023, vol. 9, no. 1, pp. 83-94 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Андрей Альбертович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.
Тел.: +7 (904) 321-50-90.
E-mail: kuznetsovaa.omgups@gmail.com

Волчанина Мария Андреевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, преподаватель кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.
Тел.: +7 (983) 116-10-84.
E-mail: kuznetcova994@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuznetsov Andrey Albertovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor of Sciences in Engineering, professor, head of the department «Theoretical electrical engineering», OSTU.

Phone: +7 (904) 321-50-90.

E-mail: kuznetsovaa.omgups@gmail.com

Volchanina Maria Andreevna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, teacher of the department «Automation and control systems», OSTU.

Phone: +7 (983) 116-10-84.

E-mail: kuznetcova994@gmail.com

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

Горлов Антон Вячеславович

Омский государственный университет путей
сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (923) 692-07-69.

E-mail: anton.gorlov@mail.ru

Gorlov Anton Vyacheslavovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Postgraduate student of the department «Theoretical
electrical engineering», OSTU.

Phone: +7 (923) 692-07-69.

E-mail: anton.gorlov@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Кузнецов, А. А. Сравнение акустических сигналов и видеоизображений высоковольтных разрядов в масле в задачах диагностирования силовых трансформаторов / А. А. Кузнецов, М. А. Волчанина, А. В. Горлов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 4 (56). – С. 121 – 134.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kuznetsov A.A., Volchanina M.A., Gorlov A.V. Comparison of acoustic signals and video images of high-voltage discharges in oil for diagnosis tasks of power transformers. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 4 (56), pp. 121-134 (In Russian).

УДК: 629.4

И. К. Лакин

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

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТЬЮ ЛОКОМОТИВОВ ПРОИЗВОДСТВА КОМПАНИИ «ТРАНСМАШХОЛДИНГ»

Аннотация. В статье рассматривается современная практика управления надежностью отечественных локомотивов производства компании «Трансмашхолдинг» (ТМХ). В мировой практике за последние 100 лет разработан комплекс методов управления качеством продукции, многие из которых доведены до уровня международных стандартов. Примером могут служить международные стандарты серии ISO9000, межгосударственные стандарты управления надежностью серии ГОСТ 27 «Надежность в технике», принципы вариативного управления Эдварда Дэминга, методы Toyota Production System и Lean Production и многие другие. Разработан и стандартизирован ряд методов вероятностно-статистического управления качеством и надежностью продукции. Однако их практическое использование сдерживают такие факторы, как низкая квалификация руководителей и специалистов, давление традиций, психологические проблемы перехода на новые технологии. Для преодоления указанных проблем предложена автоматизированная модель управления надежностью локомотивов, в которую инкапсулированы передовые методы управления, реализована технология работы «правильно или никак» (рока-уoke): в компании создается комплексная автоматизированная безбумажная технология управления техническим обслуживанием и ремонтом локомотивов (ТОиР), в которой предусмотрены сбор и обработка диагностической информации от бортовых микропроцессорных систем управления локомотивами с формированием планово-предупредительного и дополнительного объемов ремонта. По каждой ремонтной операции выписывается наряд с прикреплением к нему ресурсной спецификации, по которой можно получить материалы на складе. По результатам работы АСУ ТОиР выявляются отказы оборудования локомотивов, производится первичное расследование причин возникновения отказов, определяется ответственная сторона. На этапе вторичного расследования определяется причина отказа. Если к известной или новой проблеме прикреплено более 10 отказов, то проблема считается системной: определяется коренная причина группы отказов, разрабатываются техническое решение, план мероприятий для устранения причины отказов, анализируется эффективность мероприятий. Все этапы работы модели автоматизированы на базе единой базы данных единого сервера с подключением к нему компьютеров автоматизированных рабочих мест. При этом наряду с методами управления инкапсулированы математические методы управления. Модель внедрена в АСУ ТМХ в локомотивном дивизионе. Ведутся работы для создания аналогичных АСУ для вагонов метрополитена, электропоездов и вагонов локомотивной тяги.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, локомотивы, автоматизированное управление надежностью.

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

Igor K. Lakin

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

AUTOMATED RELIABILITY MANAGEMENT OF LOCOMOTIVES MANUFACTURED BY TRANSMASHHOLDING COMPANY

Abstract. The article subject is the modern practice of reliability management of domestic locomotives manufactured by Transmashholding (TMH). In the world practice over the past 100 years, a number of product quality management methods have been developed, many of which have been brought to the level of international standards. Examples are the international standards of the ISO9000 series, the interstate standards of reliability management of the GOST 27 series «Reliability in Engineering», the principles of variable control by Edward Deming, Toyota Production System and Lean Production methods, and many others. A number of methods of probabilistic and statistical management of product quality and reliability have been developed and standardized. But their practical use in Russia is constrained by a number of factors: low qualifications of managers and specialists, the pressure of traditions, psychological problems of new technologies transition. To overcome the problems, an automated model of locomotive reliability management is proposed, in which advanced management methods are encapsulated, the «right or no way» (poka-yoke) technology is implemented: the company is creating a comprehensive automated paperless technology for managing maintenance and repair of locomotives (MRO), which provides for the collection and processing of diagnostic information from on-board microprocessor systems management of locomotives with the formation of a planned preventive and additional volume of repairs. For each repair operation, an order is issued with a resource specification attached to it, only according to which materials can be obtained in the warehouse. According to the results of the MRO automated control system, failures of locomotive equipment are detected, an initial investigation of the causes of failures is carried out, the responsible party. At the stage of the secondary investigation, the refusal is attached to a known or newly fixed problem. If more than 10 failures are attached to the problem, then the problem is considered systemic: the root cause of the group of failures is determined, a technical solution is developed, an action plan is developed to eliminate the cause of failures, and the effectiveness of measures is analyzed. All stages of the model are automated on the basis of a single database of a single server with computers of automated workstations connected to it. At the same time, along with control methods, mathematical control methods are encapsulated. The model is implemented in the automated control system of the TMH locomotive division. Activity is underway to create similar automated control systems for subway cars, electric trains and locomotive traction cars.

Keywords: railway transport, locomotives, automated reliability management.

В мировой практике за последнее столетие разработан комплекс методов управления качеством продукции, первые из которых были предложены Фредериком Тейлором, Генри Ганттом, Уолтером Шухартом и многими другими [1]. Определенный итог развития методов уже в послевоенный период подвел Эдвард Деминг, создав теорию управления качеством продукции предприятий (Вариабельность предприятий). В настоящее время наиболее важные методы доведены до уровня международных стандартов, главными из которых являются стандарты серии ISO9000, межгосударственные стандарты управления надежностью серии ГОСТ 27 «Надежность в технике», IRIS и др. Не потеряли своей актуальности методы Toyota Production System, Lean Production и многие другие. Разработан и стандартизирован комплекс методов вероятностно-статистического управления качеством и надежностью продукции. В ОАО «РЖД» разработаны стандарты на отдельные методы: цикл PDCA, мозговой штурм, карты Шухарта, пирамиды Гейнриха, фишбоны, Z-графики и многие другие методы.

Современные методы управления в России в целом и на железнодорожном транспорте в частности сталкиваются с проблемами их практического использования из-за влияния нескольких факторов: отсутствие знаний о передовых методах, низкая квалификация руководителей и специалистов, психологическое давление традиций, когда принцип «мы всегда так делали» мешает перейти на новые технологии. Сказывается и недостаточная мотивация руководителей и специалистов.

В группе компаний ТМХ в 2012 г. сформулирована и утверждена Концепция автоматизированной системы управления надежностью локомотивов (АСУНТ) [2], в которой предлагалось инкапсулировать основные методы управления качеством и надежностью локомотивов в автоматизированную систему управления (АСУ). С того времени ведется планомерная работа по внедрению АСУНТ, которая началась с разработки диагностических

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

алгоритмов по данным бортовых микропроцессорных систем управления (МСУ) [3] с выявлением предотказных состояний оборудования и нарушений режимов эксплуатации [4–6]. Разработана технология использования диагностических данных в ТОиР [7–10]. Далее описаны основные элементы модели АСУНТ, ее преимущества, проблемы внедрения и перспективы развития.

Модель управления. На рисунке 1 приведена схема внедренной и развиваемой технологической модели АСУНТ. Модель объединяет в себе несколько АСУ и условно состоит из трёх уровней: эксплуатация, техническое обслуживание и ремонт (АСУ ТОиР), управление инцидентами (отказами) и управление проблемами.

Базовый уровень – это АСУ технологических процессов технического обслуживания и ремонта локомотивов АСУ ТОиР «Сетевой график» (АСУ СГ), в которой реализуется управление всеми процессами ТОиР: мониторинг эксплуатации локомотивов, бортовое и деповское диагностирование с выявлением предотказных состояний, формирование диагностической карты, плана цикловых и сверхцикловых работ, назначение работ исполнителям, заказ материалов, запасных частей на складе, контроль исполнения работ, начисление зарплаты, выдача локомотивов на линию.

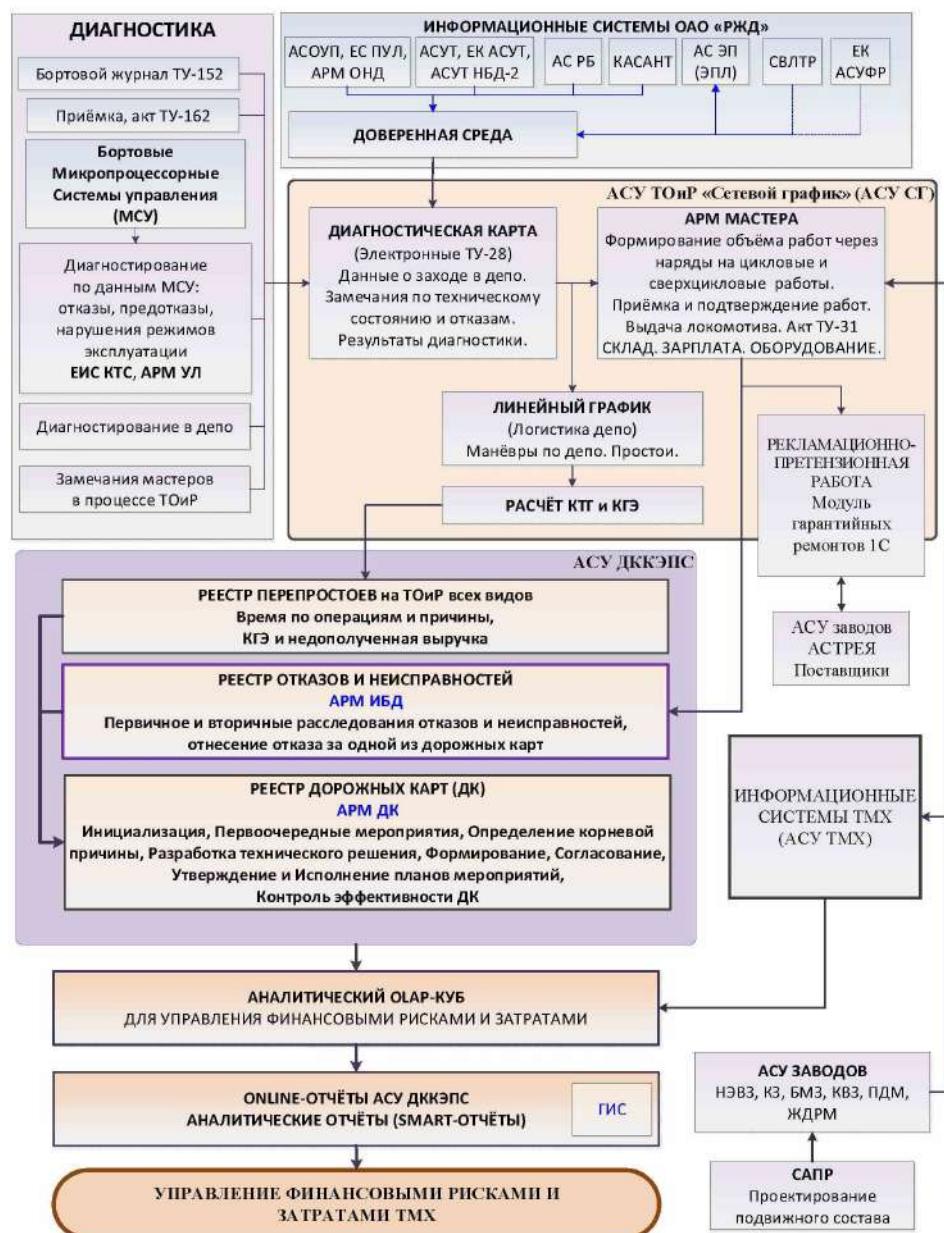


Рисунок 1 – Модель управления надежностью локомотивов ТМХ

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

Средний уровень управления – это управление инцидентами: расследование отказов со сбором исходной информации, определение причины отказов, ответственной стороны и проблемы, к которой относится рассматриваемый отказ. Верхний уровень управления – это управление проблемами: определение коренной причины группы отказов, разработка технического решения для устранения проблемы, плана первоочередных и корректирующих мероприятий для устранения проблемы с указанием стоимости работ, утверждение планов мероприятий и бюджета, выполнение планов и контроль эффективности.

В реализации предложенной модели задействованы определенные информационные системы. Со стороны ОАО «РЖД» это автоматизированные системы оперативного управления перевозками АСОУП для получения информации о пробегах и состоянии локомотивов, управления локомотивным хозяйством АСУТ для взаимодействия с АСОУП, электронный паспорт локомотива АС ЭП для учета технического состояния локомотивов и их оборудования, КАСАНТ для учета отказов перевозочного процесса по категориям.

Для анализа диагностических данных бортовых микропроцессорных систем управления всех типов разработано автоматизированное рабочее место (АРМ) «Умный локомотив». Данные о нарушениях режимов эксплуатации используются для определения ответственной за отказ стороны. Данные о предотказных состояниях используются в процессе ТОиР.

Сам ТОиР реализован с использованием АСУ ТОиР «Сетевой график», в котором согласно планово-предупредительным циклам работ и выявленным замечаниям по техническому состоянию локомотивов назначаются работы, получаются материалы на складе, закрываются наряды слесарям с последующим сдельным закрытием зарплаты. Реализован безбумажный процесс управления ТОиР. При необходимости наличия бумажных документов (например, на складе) их распечатка производится после их безбумажной обработки.

Первичное расследование отказов происходит при неплановом заходе локомотива в депо, при выявлении отказа или предотказа на плановом ремонте, а также при регистрации отказа перевозочного процесса по вине локомотива в КАСАНТ. В основе расследования – принципы 8D, 5W и др. Формирование протоколов и актов автоматизировано. Первичное расследование заканчивается выявлением ответственной за отказ стороны.

Вторичное расследование заключается в определении проблемы, к которой относится расследуемый отказ. Имеется возможность вернуть расследование отказа на доработку или автоматизированно привязать расследование к соответствующей проблеме в АРМ «Дорожные карты». В результате в каждой карточке управления проблемами накапливается статистика отказов (рисунок 2).

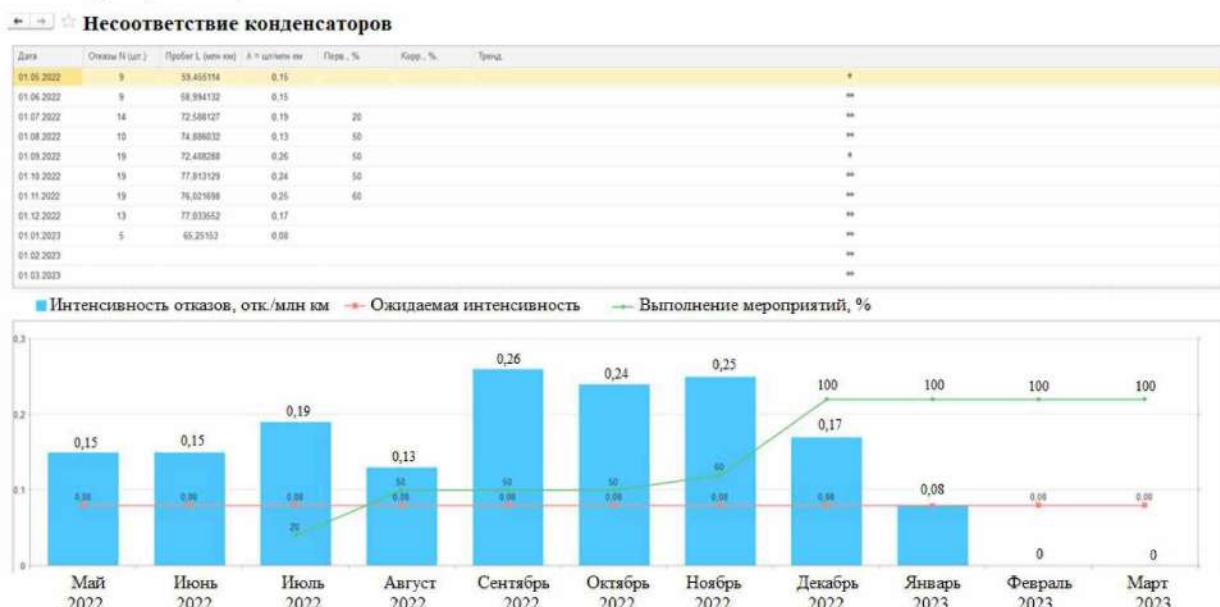


Рисунок 2 – Пример экранной формы динамического графика интенсивности отказов по проблеме в АСУНТ

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

Ежемесячно автоматически рассчитывается общий пробег локомотива и его оборудования по каждой проблеме и рассчитывается интенсивность отказов на один миллион километров (учитывается кратность оборудования, например, тяговых двигателей). В тот же динамический график выводится статус реализации первоочередных и корректирующих мероприятий. Эффективность дорожной карты определяется автоматически. Таким образом, имеются информационные системы для всех этапов управления надежностью локомотивов.

Online-отчеты. Опыт внедрения АСУНТ показал, что пользовательский интерфейс программ со временем становится достаточно сложным и неудобным для тех, кто не работает с программой постоянно. К этой группе относятся прежде всего руководители всех уровней управления. Для наглядного мониторинга всего процесса управления надежностью локомотивов созданы по технологии MS Power BI online-отчеты (интерактивные дашборды), в основе работы с которыми лежат OLAP-кубы с исходной сводной информацией, которая скачивается из рабочих баз данных каждые несколько минут. Online-отчеты разбиты на группы и охватывают все этапы управления надежностью: ТОиР, управление инцидентами и проблемами.

На рисунке 3 показан online-отчет о числе зафиксированных отказов по видам оборудования. Имеется набор фильтров, позволяющих получить информацию в любом срезе: по датам, по регионам, по сериям локомотивов, по контрактам сервисного обслуживания и др. Предусмотрена возможность анализа отказов по видам оборудования как в числе отказов, так и во времени простоя на неплановом ТОиР. Отдельным отчетом предусмотрена возможность контролировать работу с проблемами, работа с которыми начинается при прикреплении к проблеме 10 и более отказов или по желанию пользователя.

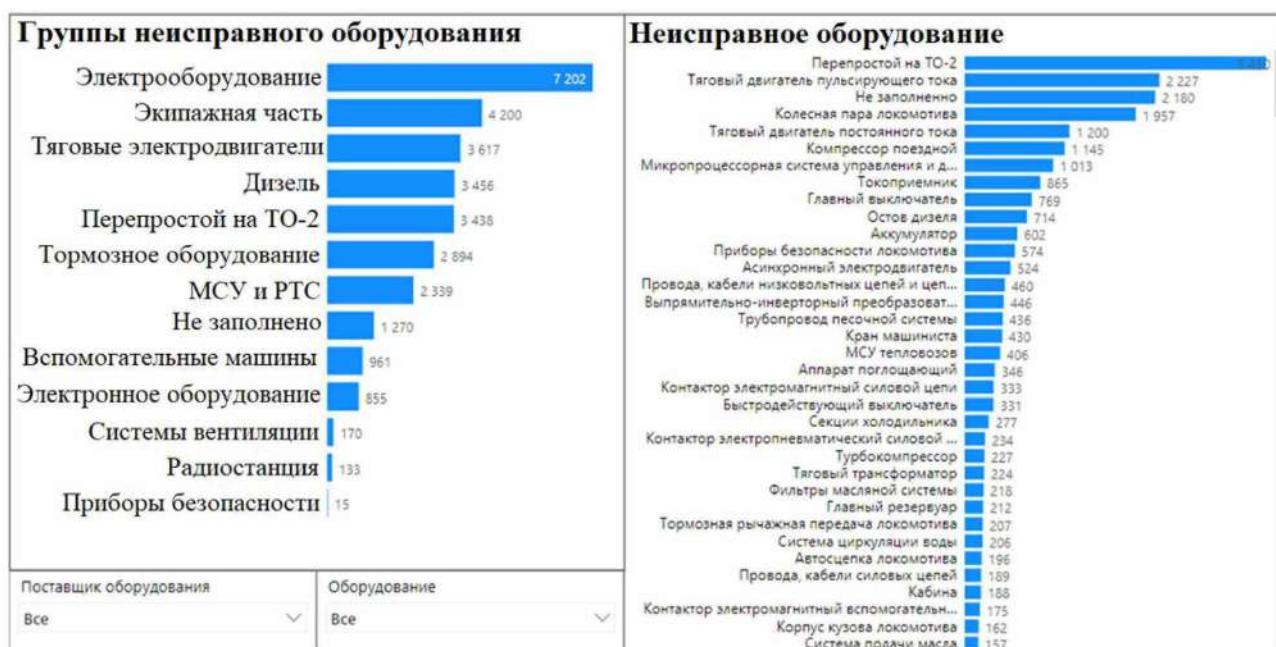


Рисунок 3 – Пример online-отчета в АСУНТ

Система online-отчетов полностью себя оправдала. Более того, позволила существенно сократить ручной непроизводительный труд по подготовке презентаций к докладам и совещаниям, исключила разнотечения информации.

Инкапсуляция математических методов. Отдельно следует остановиться на использовании математических методов при управлении надежностью. К сожалению, это слабое место на железнодорожном транспорте в силу ряда причин, в том числе из-за уровня образования инженеров. Проблему предлагается решать через инкапсуляцию математических методов в программное обеспечение АСУ.

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

На рисунке 4 приведен пример уже реализованной инкапсуляции для выявления и предотвращения так называемых случаев «средней температуры по больнице». Предлагается использовать данные проверять на унимодальность через соответствие одному из законов распределения случайной величины, что корректно согласно закону больших чисел. В приведенном примере проверяется на унимодальность интенсивность отказов по критерию согласия Колмогорова – Смирнова. Вероятность соответствия в примере оказалась равной 0,851, что считается для практики управления надежностью локомотива хорошей степенью унимодальности – данными можно пользоваться без дополнительной фильтрации.

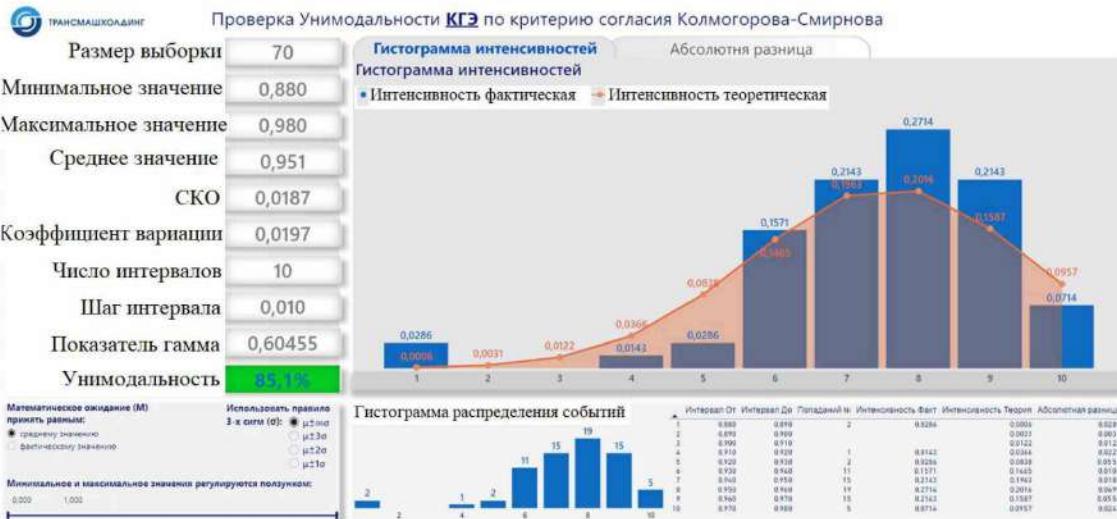


Рисунок 4 – Пример smart-отчета при инкапсуляции математических методов в АСУНТ

Проблемы реализации модели. При внедрении АСУНТ возникало много проблем. Часть из них являлись типовыми «детскими болезнями» АСУ, которые возникли еще на этапе внедрения АСУ локомотивного хозяйства АСУТ. Главная – это психологически трудный отказ от уже установившихся ручных технологий работы с бумажными документами, ручными базами данных в среде MS Office: Excel, Word, Power Point и др. Эти безусловно великолепные средства автоматизации офисного труда стали проблемой. Как в конце 90-х гг. ХХ в. при внедрении АРМов наряда в локомотивных депо (АРМ ТЧБ) начинать приходилось с физического уничтожения досок нарядов, так и теперь приходится бороться с многочисленными местными базами данных.

Вторая большая проблема – это взаимодействие различных подсистем АСУНТ, которые создавались в разное время разными разработчиками для различных целей. Даже внутри ОАО «РЖД» есть нестыковки отдельных АСУ. Тем более возникают проблемы взаимодействия АСУ ОАО «РЖД» и АСУ сервисных компаний, локомотивостроительных и локомотиворемонтных заводов. В процессе внедрения АСУНТ возникла острая необходимость автоматизации взаимодействия с поставщиками оборудования, число которых при современной узкой специализации заводов стало очень много. Проблема усложняется наличием собственных принципов обеспечения информационной безопасности.

Третья проблема – классификаторы и нормативно-справочная информация (НСИ). В каждой АСУ создавались свои НСИ с учетом специфики решаемых задач. При объединении АСУ в единую систему возникают трудно преодолимые проблемы. Оказалось оптимальным создание переходных таблиц или использование сразу двух и более НСИ.

Очередная проблема – нарушения технологии выполнения работ. АСУ предполагает соблюдение технологии (правильно или никак), включение функций встроенного качества, блокирующих неправильные действия. На практике имеют место многочисленные отступления. Блокирование таких действий приведет к риску остановки процесса. Выходом оказалась реализация «обходных решений», при которых работа не приостанавливается, а

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

нарушение фиксируется в специальной инсайдерской базе данных для дальнейшего рассмотрения и устранения, что и предусмотрено принципом постоянного улучшения Эдварда Деминга (цикл PDCA). Понимание несовершенства существующих технологических процессов как естественных этапов становления модели очень важно.

К проблемам можно отнести также неумение пользоваться компьютером, особенно в провинциальных депо. Проблема постепенно уходит, хотя еще оказывает существенное влияние на эффективность использования цифровых технологий.

Хронология и перспективы научного развития модели. Разработка АСУНТ с самого начала рассматривалась как научно-практическое направление работ [2 – 10]. Именно поэтому в процессе разработки АСУНТ авторами подготовлены и защищены пять кандидатских [4 – 6] и одна докторская [7] диссертации. Получены три патента на способ ТОиР [9, 10]. При этом отдельные направления исследований объединялись в единую АСУНТ по современным принципам построения киберфизических производственных систем четвертого поколения. Комплексно использовался ранее накопленный опыт [1].

Разработка АСУНТ в группе компаний ТМХ начата в 2012 г. с создания и утверждения Концепции [2], в которой описаны основные принятые в мире и подходящие для ТОиР методы управления качеством и надежностью, сформулированы основные направления работ по АСУНТ. Создание АСУНТ началось с разработки методов объективного контроля технического состояния локомотивов по данным бортовых микропроцессорных систем управления. В сервисных локомотивных депо сверх штата создаются группы диагностики для считывания и анализа данных МСУ. Роль групп диагностики в становлении сервисной системы ТОиР трудно переоценить. Впервые в отечественной практике разработана технология организации ТОиР с использованием данных МСУ. Результатом научно-исследовательских работ стала защита двух кандидатских диссертаций: по диагностированию с МСУ электровозов и МСУ тепловозов. По результатам исследований и становления работы групп диагностики сервисных локомотивных депо (СЛД) разработана технология использования диагностических данных МСУ в процессе ТОиР. На разработанную систему диагностирования получены три патента.

При внедрении системы диагностирования по данным МСУ в СЛД первоначально использовались программы расшифровки данных МСУ разработки компаний ЛЭС (Новочеркасск), ВНИКТИ (Коломна), НИИТКД (Омск), ДЦВ Красноярской железной дороги (Красноярск). Программы по техническим заданиям и за счет средств ТМХ-Сервис были существенно доработаны до уровня автоматизированного рабочего места диагностика. В компании «АВП Технология» разработана единая система мониторинга надежности локомотивов (ЕСМТ), которая позволила автоматизировать работу групп диагностики. В 2015 г. по итогам работы групп диагностики в ЛокоТех принято решение о разработке единой информационной для всех серий локомотивов системы расшифровки данных МСУ – АРМ «Умный локомотив» (АРМ УЛ). В настоящее время АРМ УЛ – основная система расшифровки данных МСУ, используемая в процессе ТОиР как неотъемлемый ее элемент. А ЕСМТ переводится в среду АСУ СГ.

С самого начала работы групп диагностики выявлено большое число нарушений режимов эксплуатации (НРЭ) локомотивов. Еще в 2012 г. первой группой диагностики выявлено первое НРЭ: запуск дизеля тепловоза серии 2ТЭ10МК без прокачки масла. ТМХ признал это направление работ очень важным. Большим успехом ТМХ стало согласование и утверждение Распоряжения ОАО «РЖД» № ЦТ-47/р от 01.03.2016 «Порядок оценки качества эксплуатации и ремонта локомотивов, предполагающий взаимный контроль и повышение прозрачности отнесения виновности за допущенные отказы», которым утвержден классификатор НРЭ. По мере накопления опыта классификатор дорабатывается. В настоящее время диагностические данные МСУ – один из главных автоматизированных источников информации о техническом состоянии и режимах эксплуатации локомотивов и их оборудования.

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

Опыт внедрения АСУНТ показал, что управление надежностью локомотивов крайне затруднено при отсутствии данных о технологических процессах ТОиР локомотивов в СЛД. С 2014 г. начата разработка АСУ ТОиР, получившей название «Сетевой график» (АСУ СГ). Проведены комплексные исследования в СЛД «Тюмень», «Тында-Северная», «Боготол-Сибирский», «Амурское», «Волхов», «Дальневосточное», «Братское» и др., в результате чего разработана уникальная функциональность АСУ СГ, которая реализована в период 2015 – 2018 гг. на платформе пакета программ 1С УПП. Методические подходы, реализованные в АСУ СГ, полностью себя оправдали. На базе СЛД «Братское» ведутся дальнейшие работы по комплексной реализации процесса ТОиР с автоматизацией всех основных технологических процессов, включая бортовые и деповские стационарные и переносные автоматизированные системы технического диагностирования, автоматизированную приемку локомотива на ТОиР. По результатам обобщения накопленного опыта (мирового, отечественного, ЛокоТех и НИИТКД) защищена докторская диссертация.

С 2020 г. в ТМХ продолжена работа над АСУНТ второго и третьего уровней: управление инцидентами (разбор каждого отказа) и управления проблемами (определение и устранение причин отказов). Создана система online-отчетов по технологии MS Power BI.

По опыту локомотивного дивизиона в 2022 г. аналогичная разработка на базе пакета программ 1С ERP начата для вагонов метро, вагонов локомотивной тяги и электропоездов. В 2022 г. в ТМХ стартовал проект Цифровой трансформации ТМХ, где АСУНТ рассматривается как элемент АСУ ТМХ.

Отдельно решается задача интеграции АСУНТ с информационными системами ОАО «РЖД». Уже ведутся работы по синхронизации данных ТОиР ТМХ и электронного паспорта локомотива АС ЭП разработки ПКБ ЦТ, что позволит комплексно управлять жизненным циклом всех видов номерного оборудования локомотивов. В настоящее время информация в АС ЭП вводится вручную.

Важное направление работ – интеграция с системой учета отказов перевозочного процесса в ОАО «РЖД» КАСАНТ. Совместные эксплуатационного и сервисного локомотивных депо протоколы разбора причин отказов с определением виновной стороны и передачей данных в КАСАНТ по-прежнему выполняются вручную. Необходимо создать электронный протокол разбора под электронную подпись причастных, отказаться от устаревших технологий. В ТМХ накоплен положительный опыт перехода на реально электронные протоколы, когда пользователь отвечает на обязательные и дополнительные вопросы, а сам протокол в его привычном виде формируется автоматически.

Одна из перспектив развития АСУНТ – «Интернет вещей»: подключение в АСУ внешних информационных систем: технического диагностирования, промышленного зрения, систем осмотра оборудования и др.

Безусловно, приоритетным направлением является дальнейшая инкапсуляция в АСУНТ математических методов управления: повсеместная проверка данных на унимодальность, вычисление трендов, факторный анализ, расчет неснижаемого запаса и логистики с использованием теории массового обслуживания и многое другое, что сейчас можно называть искусственным интеллектом.

В ТМХ создана и продолжает развиваться автоматизированная система управления надежностью локомотивов АСУНТ, в которой инкапсулируются передовые научно-практические методы управления качеством и надежностью продукции, управления жизненным циклом сложных систем на этапах проектирования, производства, эксплуатации и сервисного технического обслуживания и ремонта.

АСУНТ разрабатывается как киберфизическая производственная система, что позволяет объединять в едином информационном пространстве отдельные АСУ и даже автоматизированные рабочие места, разрабатываемые как на стороне эксплуатирующих подвижной состав организаций (РЖД, Федеральная пассажирская компания, Московский метрополитен, Пригородные компании и др.), так и сервисных компаний (ЛокоТех, СТМ-Сервис, МВМ-Сервис и др.), локомотиворемонтных заводов (ЖДРМ) и заводов-изготовителей (НЭВЗ, БМЗ, КЗ, ДМЗ, ТВЗ, МВМ, Уральские локомотивы и др.).

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

Построение АСУНТ как киберфизической производственной системы позволяет участвовать в научно-практическом развитии системы различным коллективам ученых и специалистов. Уже сейчас над системой работают группы авторов из ТМХ, ПИИТА, АФМ-Серверс, АВП Технология, ЛокоТеха, ВНИКТИ, РУТА, ПГУПСа, ОмГУПСа, ИрГУПСа и других организаций.

Список литературы

1. Лакин, И. К. История создания систем менеджмента качества (СМК) и особенности их внедрения на железнодорожном транспорте / И. К. Лакин, В. Н. Супрун. – Красноярск : Красноярский филиал ИрГУПСа, 2006. – 92 с. – Текст : непосредственный.
2. Автоматизированная система управления надежностью локомотивов (АСУНТ). Концепция ТМХ-Сервис / К. В. Липа, В. И. Гриненко, С. Л. Лянгасов [и др.]. – Москва : ООО «ТМХ-Сервис», 2012. – 160 с. – Текст : непосредственный.
3. Мониторинг технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов. Теория и практика / К. В. Липа, А. А. Белинский, В. Н. Пустовой, С. Л. Лянгасов. [и др.] – Москва : ООО «Локомотивные Технологии», 2015. – 212 с. – Текст : непосредственный.
4. Лакин, И. И. Мониторинг технического состояния локомотивов по данным бортовых аппаратно-программных комплексов : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Лакин Игорь Игоревич ; Московский гос. ун-т путей сообщения Императора Николая II. – Москва, 2016. – 195 с. – Текст : непосредственный.
5. Аболмасов, А. А. Управление техническим состоянием тягового подвижного состава в условиях сервисного обслуживания : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Аболмасов Алексей Александрович ; Московский гос. ун-т путей сообщения Императора Николая II. – Москва, 2017. – 180 с. – Текст : непосредственный.
6. Пустовой, И. В. Разработка информационно-динамической модели управления сервисным техническим обслуживанием и ремонтом локомотивов : специальность 05.02.22 «Организация производства (транспорт)» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Пустовой Илья Владимирович ; Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург, 2018. – 181 с. – Текст : непосредственный.
7. Семенов, А. П. Модель управления жизненным циклом локомотивов с использованием современных методов технического диагностирования : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Семенов Александр Павлович ; Российский ун-т транспорта. – Москва, 2022. – 379 с. – Текст : непосредственный.
8. Лакин, И. К. Разработка теории и программно-технических средств комплексной автоматизированной справочно-информационной и управляющей системы локомотивного депо : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Лакин Игорь Капитонович ; Московский гос. ун-т путей сообщения. – Москва, 1997. – 377 с. – Текст : непосредственный.
9. Патент № 2593729, Российская Федерация, МПК В 61 L 27/00; G 06 F 11/36; G 05 B 19/048; G 05 B 23/02. Способ контроля режимов эксплуатации локомотивов : заявлено 22.01.2015 : опубликовано 10.08.2016 / Липа К. В., Гриненко А. В., Лянгасов С. Л., Лакин И. К., Аболмасов А. А., Баркунова А. А., Мельников В. А. ; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «ТМХ-Сервис» (RU). – 2 с. – Текст : непосредственный.
10. Патент № 2569216 Российской Федерации, МПК В 61 K 11/00. Способ управления обслуживанием и ремонтом тягового подвижного состава железнодорожного транспорта и система для его осуществления : № 2569216 : заявлено 24.10.2013 : опубликовано 20.11.2015 / Липа К. В., Гриненко А. В., Лянгасов С. Л., Лакин И. К., Аболмасов А. А., Мельников В. А. ; заявитель и патентообладатель ООО «ТМХ-Сервис». – 2 с. – Текст : непосредственный.

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

References

1. Lakin I.K., Suprun V.N. *Istoriia sozdaniia sistem menedzhmenta kachestva (SMK) i osobennosti ikh vnedreniia na zhelezodorozhnom transporte* [The history of the quality management systems (QMS) creation and the specifics of their railway transport implementation]. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk branch of ISTU Publ., 2006, 92 p. (In Russian).
2. Lipa K.V., Grinenko V.I., Lyangasov S.L., Lakin I.K. et al. *Avtomatizirovannaya sistema upravleniya nadezhnost'iu lokomotivov (ASUNT)*. *Konseptsiiia TMKh-Servis* [Automated Locomotive Reliability Management System (ASUNT). TMX-Service Concept]. Moscow, TMX-Service Publ., 2012, 160 p. (In Russian).
3. Lipa K.V., Grinenko V.I., Lyangasov S.L., Lakin I.K. et al. *Monitoring tekhnicheskogo sostoianiiia i rezhimov ekspluatatsii lokomotivov. Teoriia i praktika* [Monitoring of the technical condition and operating modes of locomotives. Theory and practice]. Moscow, TMX-Service Publ., 2015, 212 p. (In Russian).
4. Lakin I.I. *Monitoring tekhnicheskogo sostoianiiia lokomotivov po dannym bortovykh apparatno-programmnykh kompleksov* (Monitoring of the technical condition of locomotives according to onboard hardware and software systems). Doctor's thesis, Moscow, MIIT, 2016, 195 p. (In Russian).
5. Abolmasov A.A. *Upravlenie tekhnicheskim sostoianiem tiagovogo podvizhnogo sostava v usloviakh servisnogo obsluzhivaniia* (Management of the technical condition of traction rolling stock in service conditions). Doctor's thesis, Moscow, Russian University Of Transport, 2017, 180 p. (In Russian).
6. Pustovoy I.V. *Razrabotka informatsionno-dinamicheskoi modeli upravleniya servisnym tekhnicheskim obsluzhivaniem i remontom lokomotivov* (Development of an information-dynamic management model for maintenance and repair of locomotives). Doctor's thesis, Ekaterinburg, USURT, 2018, 181 p. (In Russian).
7. Semenov A.P. *Model' upravleniya zhiznennym tsikлом lokomotivov s ispol'zovaniem sovremennykh metodov tekhnicheskogo diagnostirovaniia* (Development of an information-dynamic management model for maintenance and repair of locomotives). Doctor of Sciences in Engineering thesis, Moscow, Russian University Of Transport, 2022, 379 p. (In Russian).
8. Lakin I.K. *Razrabotka teorii i programmnno-tehnicheskikh sredstv kompleksnoi avtomatizirovannoi spravochno-informatsionnoi i upravliaiushchei sistemy lokomotivnogo depo* (Development of the theory and software and hardware of a complex automated reference, information and control system of a locomotive depot). Doctor of Sciences in Engineering thesis, Moscow, MIIT, 1997, 377 p. (In Russian).
9. Lipa K.V., Grinenko V.I., Lyangasov S.L., Lakin I.K., Abolmasov A.A., Barkunova A.A., Melnikov V.A. Patent RU № 2593729, 14.06.2016.
10. Lipa K.V., Grinenko V.I., Lyangasov S.L., Lakin I.K., Abolmasov A.A., Barkunova A.A., Melnikov V.A. Patent RU № 2569216, 26.10.2016.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Лакин Игорь Капитонович

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)).

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

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

Тел.: +7-985-340-01-21.

E-mail: ik.lakin@tmholding.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Лакин, И. К. Анализ результатов разработки и внедрения системы автоматизированного управления надежностью локомотивов производства компании «Трансмашхолдинг» / И. К. Лакин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 4 (56). – С. 134 – 143.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Lakin Igor Kapitonovich

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

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

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

Phone: +7-985-340-01-21.

E-mail: ik.lakin@tmholding.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Lakin I.K. Automated reliability management of locomotives manufactured by Transmashholding company. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 4 (56), pp. 134-143 (In Russian).

Уважаемые коллеги!

Редакция научно-технического журнала «Известия Транссиба» приглашает Вас публиковать результаты научных исследований по тематическим направлениям журнала, соответствующим научным специальностям Номенклатуры научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени, утвержденной приказом Минобрнауки России от 24 февраля 2021 г. № 118:

- 2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация;
- 2.9.4. Управление процессами перевозок;
- 2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог;
- 2.9.1. Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте;
- 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника;
- 2.4.5. Энергетические системы и комплексы;
- 2.4.3. Электроэнергетика;
- 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы;
- 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Материалы просим высылать ответственному секретарю редакционного совета журнала Иванченко Владимиру Ивановичу по электронной почте: izvestia_transsiba@mail.ru.

Правила представления материалов научных статей в научно-технический журнал «Известия Транссиба»

В редакцию журнала представляются:

1. Текст статьи на бумаге формата А4.
2. Текст статьи в электронном виде (на любом носителе или по e-mail), имя файла определяется по фамилии первого автора: фамилия.doc или фамилия.docx.
3. Экспертное заключение о возможности публикации статьи в открытой печати (по форме, принятой в организации авторов).
4. Отчет о проверке на заимствование 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 указываются тематический раздел журнала, в который подается статья, и научная специальность, которой эта статья соответствует.

Текст статьи включает в себя УДК, ФИО авторов, аффилиацию авторов (место работы или учебы), заглавие статьи, аннотацию, ключевые слова на русском и английском языках, текст статьи, список литературы в русском и латинском алфавитах, сведения об авторах и библиографическое описание статьи на русском и английском языках.

Текст статьи оформляется в соответствии с установленным образцом.

Сведения об авторах включают в себя фамилию, имя, отчество, учченую степень, ученое звание, место работы с указанием почтового адреса, должность, контактные телефоны, e-mail для обратной связи.

Требования к аннотации статьи:

аннотация должна быть кратким точным изложением содержания статьи, включающим в себя основные фактические сведения и выводы описываемой работы;

текст аннотации должен быть лаконичен и четок, свободен от второстепенной информации, должен отличаться убедительностью формулировок;

сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте аннотации;

объем аннотации на русском и английском языках должен содержать от 200 до 250 слов;

аннотация на русском и английском языках должна включать в себя следующие аспекты содержания статьи: предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы;

дополнительно англоязычная аннотация должна быть: оригинальной (не быть калькой русскоязычной аннотации); содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье); «англоязычной» (написанной качественным английским языком); необходимо использовать активный, а не пассивный залог.

Требования к рукописи статьи:

рукопись статьи должна содержать УДК (в левом верхнем углу, обычный, 12 пт), инициалы и фамилию на русском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на русском языке (по центру, 10 пт), название статьи на русском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), инициалы и фамилию на английском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на английском языке (по центру, 10 пт), название статьи на английском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт);

текст статьи должен быть набран в редакторе Word, размер страницы – формат А4 (210 × 297 мм);

размер полей – 20 мм (все четыре поля), размер и тип шрифта основного текста – Times New Roman, 12 пт;

размеры символов в формулах (выполняются только в редакторе MathType): обычный – 12 пт, крупный индекс – 7, мелкий – 5, крупный символ – 15, мелкий – 12 пт; начертание и размер символов в расшифровке формул по тексту должны в точности совпадать с начертанием и размером символов в самой формуле; при записи формул следует использовать значок градуса (°), а не цифру «ноль» (⁰); следует использовать знак умножения (×), а не букву «х»; в качестве знаков препинания между словами используются тире (–), а не дефисы (–).

буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавитов, математические символы, такие как cos, sin, max, min, – прямым шрифтом;

текст в таблицах, 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 всегда должны находиться на одной и той же строке;

каждый рисунок дополнительного должен быть представлен в отдельном (исходном) файле в редактируемом виде;

рисунки и таблицы должны иметь только книжную ориентацию;

после текста статьи следует список использованной литературы на русском языке и в латинском алфавите;

ссылки на литературу в тексте статьи указываются арабскими цифрами в квадратных скобках;

список использованной литературы на русском языке имеет заголовок *Список литературы* и оформляется по требованиям ГОСТ Р 7.0.100–2018;

список использованной литературы в латинском алфавите имеет заголовок *References* и оформляется в соответствии с установленным образцом;

при публикации научной статьи на русском или английском языке обязательным является наличие ключевых слов и аннотации на русском и английском языках.

Материалы статей, опубликованных ранее или переданных в другие издания, не принимаются.

Число авторов статьи не должно превышать трех человек, в ином случае необходимо отдельное согласование с редакцией. Рекомендуемый объем статьи – не менее пяти и не более 10 страниц без учета аннотации и списка литературы. В ином случае вопрос по объему статьи также необходимо согласовывать с редакцией. Иллюстрации, схемы и таблицы, включаемые в текст статьи, учитываются в общем объеме текста.

Авторы должны избегать повторения одних и тех же данных в таблицах, на графиках и в тексте статьи.

В случае представления двух или более статей одновременно необходимо указывать желательную очередность их публикации в разных выпусках журнала.

В случае возвращения статьи автору для устранения замечаний или для ее сокращения датой представления считается день получения редакцией окончательного текста.

Принятые к публикации материалы статей не возвращаются авторам.

Материалы, оформленные с нарушением указанных выше требований, не принимаются к публикации и не возвращаются.

Редакционный совет оставляет за собой право литературного редактирования статьи без согласования с авторами.

По всем вопросам, связанным с подготовкой, представлением и публикацией материалов статей, необходимо обращаться в редакцию журнала.

Научное издание

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

№ 4 (56) 2023

Научно-технический журнал «Известия Транссиба» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзором) 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 18.12.2023.

Формат 60 × 90/8.

Тираж 250 экз.

Дата выпуска: 22.12.2023.

