

научно-технический

ISSN 2220-4245
журнал

ИЗВЕСТИЯ

№ 2(54)

2023

Транссиба



РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

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

EDITORIAL BOARD

1. Ovcharenko Sergey Mikhailovich – chief editor, the rector of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
2. Galiev Ilkham Islamovich – deputy chief editor, the president of OSTU, D. Sc., professor, the honored worker of science and engineering of the Russian Federation (Omsk, Russia).
3. Shantarenko Sergey Georgievich – deputy chief editor, vice-rector by scientific work of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
4. Alekseev Viktor Mikhailovich – professor of the department of Information Control and Protection of RUT, D. Sc., professor (Moscow, Russia).
5. Bessonenko Sergey Anatolevich – head of the department «Track Maintenance Management» of STU, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
6. Vedruchenko Victor Rodionovich – professor of the department «Heat-power engineering» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
7. Glinka Tadeusz – Ph. D., professor of Silesian University of Technology (Gliwice, Poland).
8. Goryunov Vladimir Nikolaevich – head of the department «Power supply of industrial enterprises» of 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 sciences» of OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
11. Isakov Alexander Leonidovich – head of the department «Railway and Highway Surveying and Design Engineering» of STU, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
12. Kim Konstantin Konstantinovich – head of the department «Electrical Engineering and Heat Power Engineering» of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, D. Sc., professor (St. Petersburg, Russia).
13. Komyakov Aleksandr Anatolevich – professor of the department «Theoretical electrical engineering» of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
14. Kosarev Alexander Borisovich – senior deputy of general director of JSC «VNIIZhT» (Railway Research Institute), D. Sc., professor (Moscow, Russia).
15. Kuznetsov Andrey Albertovich – head of the department «Theoretical electrical engineering» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
16. Lebedev Vitaliy Matveyevich – professor of the department «Heat-power engineering» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
17. Nikitin Aleksandr Borisovich – head of the department «Automation and telemechanics on railways» of PGUPS, D. Sc., professor (St. Petersburg, Russia).
18. Livshits Aleksandr Valerievich – head of the department «Automation of Production Processes» of ISTU, D. Sc., professor (Irkutsk, Russia).
19. Liu Jiankun – Ph. D., professor of Sun Yat-sen University, the associate dean of the School of Civil Engineering (Zhuhai, China).
20. Paramonov Aleksandr Mikhailovich – professor of the department «Heat-power engineering» of OmSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
21. Sidorov Oleg Alexeevich – professor of the department «Power supply of railway transport» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
22. Smerdin Aleksandr Nikolaevich – vice-rector by innovation development of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
23. Solonenko Vladimir Gelyevich – professor of the department «Rolling stock» of ALT, D. Sc., professor (Almaty, Kazakhstan).
24. Fayzibaev Sherzod Sabirovich – professor of the department «Wagons and wagon facilities» of VTU, D. Sc., professor (Tashkent, Uzbekistan).
25. Kharlamov Viktor Vasilyevich – head of the department «Electrical machines and common electrotechnics» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).

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

СОДЕРЖАНИЕ

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

- Саидивалиев Ш. У., Сатторов С. Б., Бозоров Р. Ш. Анализ движения порожнего вагона по продольному профилю сортировочной горки..... 2
- Фроленков С. А. Совершенствование алгоритма определения положения проводов контактной подвески в плане пути с помощью цифровой обработки изображений..... 9
- Комяков А. А., Шкулов А. И., Бартель Л. А. Имитационное моделирование динамических процессов в системе тягового электроснабжения..... 16
- Харитонов А. В. Динамическая модель скоростного электропоезда и ее верификация... 29
- Чунин С. В., Оганьян Э. С., Гаджиметов Г. И., Балашов М. Ю., Тимаков М. В. Исследование усталостной прочности пружин рессорного подвешивания скоростных грузовых вагонов..... 42
- Евсеев Д. Г., Лагутин С. В., Шинкарук А. С. Оценка технического состояния пассажирского вагона и рекомендации по определению его остаточного ресурса..... 49

Управление процессами перевозок

- Лунев С. А., Грипечко С. В., Дремин В. В. Повышение эффективности функционирования обратной тяговой рельсовой сети..... 58
- Гончарова Н. Ю., Большаков Р. С., Давыдова Н. В. Организация пассажирских перевозок смешанного типа. Мультимодальные туристические перевозки..... 68

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

- Коссов В. С., Краснов О. Г., Ноздрачев Г. С., Богданов О. К. Влияние характеристик скреплений на подуклонку рельсов..... 79

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

- Тихонов Ю. Б. Повышение безопасности работы козловых кранов на железнодорожных станциях и сортировочных горках..... 89
- Король Р. Г., Акельев А. С. Моделирование пропускной способности пограничных переходов транспортного коридора «Приморье-1» в условиях увеличения грузопотока... 97

Электротехника

- Местников Н. П., Васильев П. Ф., Манусов В. З., Корякин А. К., Альзаккар А. М-Н. Исследование эффекта внедрения системы концентрации солнечного излучения для фотоэлектрических электростанций в условиях Северо-Востока России..... 106
- Есаулов А. В., Тигунцев С. Г. Определение места повреждения в тяговой сети системы 25 кВ..... 120

Электротехнические комплексы и системы

- Малышев А. В. Экспериментальное исследование и компьютерное моделирование системы векторного управления электродвигателем с аксиальным магнитным потоком... 127
- Савина Н. В., Казакул А. А. Повышение надежности функционирования распределительных электрических сетей путем выделения энергетических кластеров и адаптивного управления схемно-режимной ситуацией..... 136

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

Ш. У. Саидивалиев, С. Б. Сатторов, Р. Ш. Бозоров

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

АНАЛИЗ ДВИЖЕНИЯ ПОРОЖНЕГО ВАГОНА ПО ПРОДОЛЬНОМУ ПРОФИЛЮ СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ

Аннотация. Сортировочные горки – это основной элемент железнодорожных станций, предназначенный для распределения вагонов по правильным путям и направлению движения. Одной из главных проблем, связанных с сортировочными горками, является скопление вагонов на путях, что может приводить к задержкам в перевозках, потере времени и дополнительным расходам. Общим подходом к улучшению работы сортировочных горок является постоянное развитие и модернизация технологий и методов управления, а также постоянные мониторинг и контроль за работой сортировочных горок. Ветер может оказывать влияние на движущиеся вагоны, спускающиеся по сортировочной горке, и вызывать некоторые проблемы: тормозить движение или даже изменять направление передвижения вагона. В статье приведены формулы для определения ускорения движения при равнозамедленном движении вагона в зонах торможения и силовых воздействий на участках тормозных позиций сортировочной горки. Для примера выполнен расчет ускорения движения вагона на участке первой тормозной позиции горки. По величине ускорения при заданной скорости входа вагона в зону торможения определено время затормаживания, по истечении которого практически происходит полная остановка вагона. При этом вначале следует определить время затормаживания, а затем по его величине – длину пути прохождения вагоном участка торможения. Результаты примеров расчета дали возможность отметить, что при одном и том же значении начальной скорости полученные авторами формулы дают результаты, приемлемые для выполнения инженерных расчетов. В настоящее время в существующих методиках по определению высоты сортировочной горки высота рассчитывается исходя из наиболее сложных условий – температура зимняя и ветер встречный, выбирается четырехосный порожний крытый вагон. На основе основного закона динамики (принципа Даламбера) применительно к слабым звеньям и использования аналитических формул в статье проведен расчет кинематических параметров движения вагонов в зоне торможения участка первой тормозной позиции сортировочной горки. Рассмотрена сортировочная горка высотой 3,08 м, для четырехосного порожнего крытого вагона зимняя температура – 10 °С, скорость встречного ветра – 5 м/с. При расчете высоты сортировочной горки необходимо принимать в качестве плохого бегуна, технические характеристики четырехосного порожнего полувагона, так как необходимо учитывать воздействие встречного ветра внутрь полувагона, что может препятствовать нормальному спуску вагона по горке. Рекомендуется изучение воздействия встречного ветра на четырехосный порожний полувагон.

Ключевые слова: железная дорога, станция, сортировочная горка, вагон, рациональный режим, стрелочный перевод, сочетание мощностей тормозных позиций.

Shukhrat U. Saidivaliev, Samandar B. Sattorov, Ramazon Sh. Bozorov

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

ANALYSIS OF THE MOVEMENT OF AN EMPTY CAR ON THE LONGITUDINAL PROFILE OF THE HILL

Abstract. Humps are the main element of railway stations, designed to distribute wagons along the correct tracks and direction of movement. One of the main problems associated with marshalling yards is the accumulation of wagons on the tracks, which can lead to delays in transportation, loss of time and additional costs. The general approach to improving the operation of humps is the continuous development and modernization of technologies and management methods, as well as the constant monitoring and control of humps. Wind can affect moving cars going down the hump and cause some problems. The wind can exert force on the surface of the car, slow down the movement, or even change the direction of the car. The article presents formulas for determining the acceleration of movement with uniformly slow movement of the car in the zones of braking and force effects on the sections of the braking position of the marshalling yard are presented in the generally accepted notation and in the usual sense. For example, the acceleration of the movement of the car to the section of the first brake position of the slide was calculated. Based on the magnitude of the acceleration at a given speed of the entry of the car into the braking zone, the deceleration time is determined, after which the car almost comes to a complete stop. In this case, at first it is necessary to determine the braking time, and then, by its value – the length of the path through which the car passes through the braking section. The results of the calculation examples made it possible to note that for the same values of the initial velocity, the formulas obtained by us give results acceptable for performing engineering calculations. At present, in the existing methods for determining the height of a

hump, the height is calculated based on the most difficult conditions - winter temperature and head wind, and a four-axle empty covered wagon is selected for a poor runner. Based on the basic law of dynamics (D'Alembert's principle) as applied to weak links and the use of analytical formulas in the article, the calculation of the kinematic parameters of the movement of cars in the braking zone of the section of the first braking position of the hump is carried out. A sorting hump 3,08 m high is considered, for a four-axle empty covered wagon the winter temperature is 10 °C, the headwind speed is 5 m/s. When calculating the height of the marshalling yard, it is necessary to take the technical characteristics of a four-axle empty gondola car as a poor runner, since the headwind also acts inside the gondola car and prevents the car from rolling down the hill. It is recommended to study the effect of a headwind on a four-axle empty gondola car.

Keywords: railway, station, marshalling yard, wagon, rational mode, railroad switch, combination of capacities of brake positions.

Анализируя содержание опубликованных дискуссий, посвященных проблеме проектирования сортировочных горок [1, 5, 7, 9], можно сделать вывод о том, что до настоящего времени динамика вагона, движущегося по профилю сортировочной горки, изучалась недостаточно. По этой причине следует отметить идеи о важности контроля и регулирования скорости скатывания вагона по профилю сортировочной горки. Это требует изучения двух состояний: движения четырехосного порожнего крытого вагона и полувагона по профилю сортировочной горки [1, 3, 5, 7].

В настоящее время в существующих методиках В. Н. Образцова, И. П. Старшова, В. М. Рудановского, Х. Т. Туранова и других признанных ученых высота сортировочной горки рассчитывается исходя из наиболее сложных условий – зимняя температура и встречный ветер, а для плохого бегуна выбирается четырехосный порожний крытый вагон. Причина выбора указанного вагона заключалась в том, что площадь поперечного сечения закрытого вагона больше, чем у других вагонов (таблица) [2, 4, 6, 8].

Значения коэффициентов удельного сопротивления S_x и S_{xy} от окружающей среды

Тип вагона	Количество осей	$S, \text{ м}^2$	Угол между конечным вектором и относительной скоростью в направлении спуска отцепки, град.						
			0	10	20	30	50	70	90
Значения коэффициентов S_x / S_{xy}									
Крытый вагон	4	9,7	$\frac{1,12}{0,22}$	$\frac{1,46}{0,38}$	$\frac{1,64}{0,56}$	$\frac{1,58}{0,67}$	$\frac{0,92}{0,85}$	$\frac{0,29}{0,29}$	$\frac{0,10}{0,10}$
Полувагон	4	8,5	$\frac{1,36}{0,50}$	$\frac{1,68}{0,69}$	$\frac{1,83}{0,82}$	$\frac{1,76}{0,88}$	$\frac{1,11}{0,80}$	$\frac{0,43}{0,43}$	$\frac{0,10}{0,10}$
Полувагон	8	10,7	$\frac{1,56}{0,75}$	$\frac{1,95}{0,97}$	$\frac{2,09}{1,13}$	$\frac{2,03}{1,16}$	$\frac{1,15}{0,88}$	$\frac{0,40}{0,40}$	$\frac{0,15}{0,15}$
Значение коэффициента C_x									
Платформа	4	4,1	1,51	2,02	2,30	2,23	1,30	0,40	0,10
Цистерна	4	9,8	0,59	0,82	0,96	0,96	0,56	0,19	0,05
Цистерна	8	10,3	0,81	1,08	1,22	1,10	0,65	0,19	0,05
Хоппер	4	9,9	0,92	1,18	1,38	1,46	1,21	0,68	0,25

Из данных таблицы видно, что направление ветра на одиночный четырехосный порожний вагон, спускающийся с сортировочной горки, действует под разными углами. Увеличение угла ветра действует на большую часть поверхности вагона, что соответственно увеличивает и сопротивление ветра. Согласно нормам и правилам строительства железных дорог (СНиП 1520, разд. 5) для определения высоты сортировочной горки следует принимать порожний четырехосный крытый вагон и плохого бегуна. Кузов цистерны имеет большую площадь поверхности, цилиндрическую форму и большую обтекаемость, которая срезает силу встречного ветра. Вагон-хоппер является специализированным вагоном, доля таких вагонов по сравнению с универсальными вагонами намного меньше. Поэтому эти типы вагонов не учитываются при определении высоты сортировочной горки так же, как и восьмиосные вагоны. При выборе плохого бегуна учитывается не только поверхность его кузова, но и коэффициент относительного сопротивления на окружающую среду.

На вагон, движущийся по наклонной плоскости, действуют следующие силы (рисунок 1):

Q – сила тяжести;
 W – сила сопротивления;
 F – главная движущая сила;
 P – сила, оказывающая нормальное давление на наклонную плоскость.

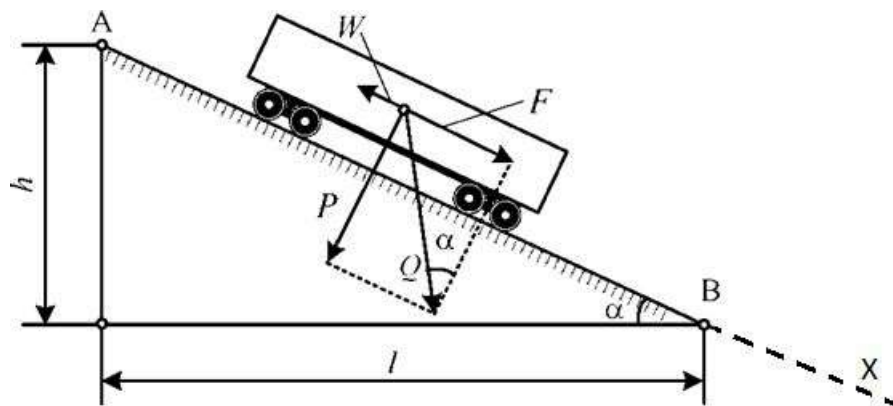


Рисунок 1 – Силы, действующие на вагон, спускающийся с горки

Как видно из рисунка 1,

$$P = Q \cos \alpha; \quad (1)$$

$$F = Q \sin \alpha. \quad (2)$$

на горках уклон α на практике не превышает 5° и можно считать, что

$$\sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha = \frac{h}{l} = i \cdot 10^{-3}, \quad (3)$$

где i – значение уклона, ‰.

Сила сопротивления W пропорциональна весу вагона:

$$W = Q \omega 10^{-3}, \quad (4)$$

где $\omega = \omega_o$ – полное удельное сопротивление движению вагона, кгс/тс (Н/кН) или ‰.

Силы сопротивления:

непрерывные (основное ω_o , сопротивление от среды и ветра $\omega_{\text{ош}}$, сопротивление, возникающее от снега и росы $\omega_{\text{qш}}$);

периодические (сопротивления, возникающие по стрелкам $\omega_{\text{ст}}$, кривым $\omega_{\text{напр}}$, на тормозных позициях $\omega_{\text{тр}}$ в рабочем состоянии).

Отсюда общая сила сопротивления может быть рассчитана по следующей формуле:

$$W = \omega_o + \omega_{\text{ср}} + \omega_{\text{кр}} + \omega_{\text{ст}} + \omega_{\text{напр}} + \omega_{\text{тр}}. \quad (5)$$

Удельное сопротивление от окружающей среды (температура воздуха и ветер) $\omega_{\text{ош}}$, кгс/тс, определяется по следующим формулам:

для одного вагона (одиночный отцеп) –

$$\pm \omega_{\text{ср}} = \frac{17,8 \cdot S_x \cdot S}{(273 + t^0) q} \cdot V_{\text{нт}}^2, \quad (6)$$

для многогруппных отцепов –

$$\pm \omega_{\text{ср}} = 17,8 \cdot \frac{S_x \cdot S + \sum_{j=1}^n S_{xxj} \cdot S_j}{(273 + t^0) \sum_{j=1}^n q_j} \cdot V_{\text{нт}}^2, \quad (7)$$

где S_x – относительный коэффициент сопротивления со стороны окружающей среды для одиночного вагона или первого вагона отцепа;

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

S_{xxj} – коэффициент относительного сопротивления со стороны окружающей среды для вагонов отцепы, кроме первого вагона;

S, S_j – площадь поперечного сечения (миделя) отдельного вагона или первого вагона отцепы и остальных вагонов отцепы соответственно, m^2 ;

$\sum_{j=1}^n q_j$ – масса вагона или отцепы, состоящего из n вагонов, m ;

t^0 – температура воздуха, $^{\circ}C$;

V_{nt} – относительная (конечная) скорость вагона (отцепы) с учетом направления ветра, m/c ;

S_x и S_{xxj} принимаются по таблице исходя из параметров вагона.

Относительная скорость V_{nt} и угол α определяются по следующим формулам:

$$V_{nt}^2 = V^2 + V_B^2 \pm 2V \cdot V_B \cos \beta; \quad (8)$$

$$\alpha = \arcsin \frac{V_B \sin \beta}{V_{nt}}, \quad (9)$$

где V – средняя скорость движения вагона на рассматриваемом участке, m/c ;

V_w – скорость ветра (при встречном ветре принимается знак «+», а при попутном ветре – знак «-»), m/c ;

β – угол между направлением ветра и направлением движения вагона (перелома), град.

Если угол β не превышает 30° ,

$$V_{nt} = V \pm V_B, \quad (10)$$

и можно принять

$$\alpha = \frac{\beta}{2}. \quad (11)$$

Если встречная скорость ветра больше скорости спуска V , то знак V_{nt} отрицательный, и в этом случае величина ω_{osh} принимается со знаком «-» [1, 3, 8, 10].

Для рассмотрения выбирается горка средней мощности высотой 3,08 м, рассчитанная для четырехосного порожнего крытого вагона с условиями: зимняя температура $-10^{\circ}C$, скорость встречного ветра – 5 m/c . Именно с этой расчетной высоты горки определяется спуск четырехосного порожнего полувагона на трудный путь.

Встречный ветер на четырехосный порожний полувагон, движущийся по профилю сортировочной горки, имеет эффект, показанный на рисунке 2.

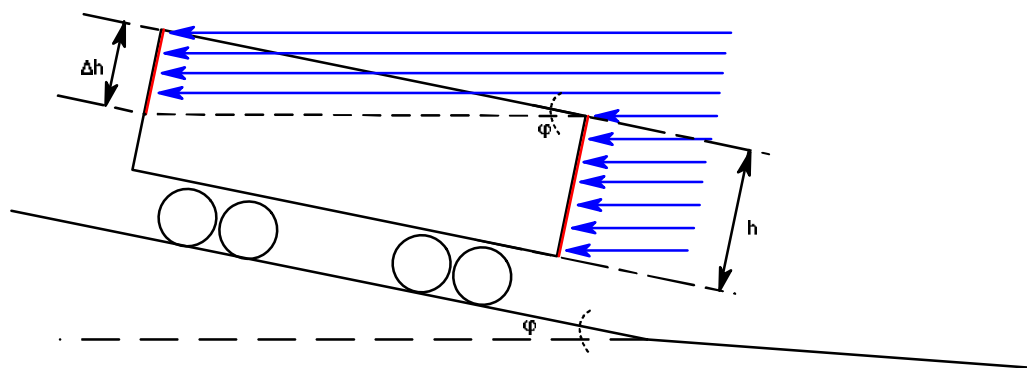


Рисунок 2 – Эффект встречного ветра на четырехосный порожний полувагон

На движущийся по профилю сортировочной горки четырехосный порожний полувагон (см. рисунок 2) встречный ветер оказывает следующее влияние: на торцевую поперечную поверхность полувагона и на внутреннюю заднюю перегородку.

Обозначим через $\Delta S, m^2$, площадь поперечного сечения задней перегородки полувагона, на которую воздействует ветер (рисунок 3).

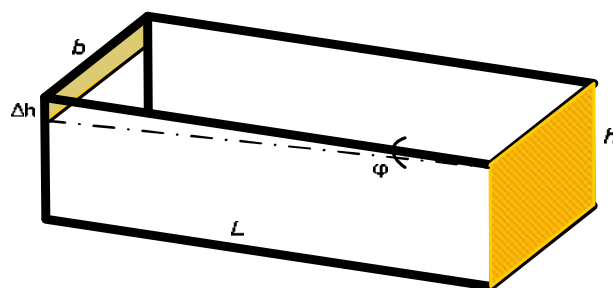


Рисунок 3 – Поперечные площади порожнего полувагона, на которые воздействует встречный ветер

На основе рисунка 3 делаем вывод о том, что встречный ветер на поверхность порожнего полувагона действует следующим образом:

Поперечная площадь торца полувагона принимается из таблицы:

$$\Delta S = L \cdot b \cdot \sin \varphi \approx L \cdot b \cdot \varphi. \quad (12)$$

Далее через горку высотой 3,08 м, определенную для четырехосного порожнего крытого вагона, рассчитываем и анализируем кинетические энергетические высоты четырехосного порожнего полувагона. Результаты приведены на рисунке 4.

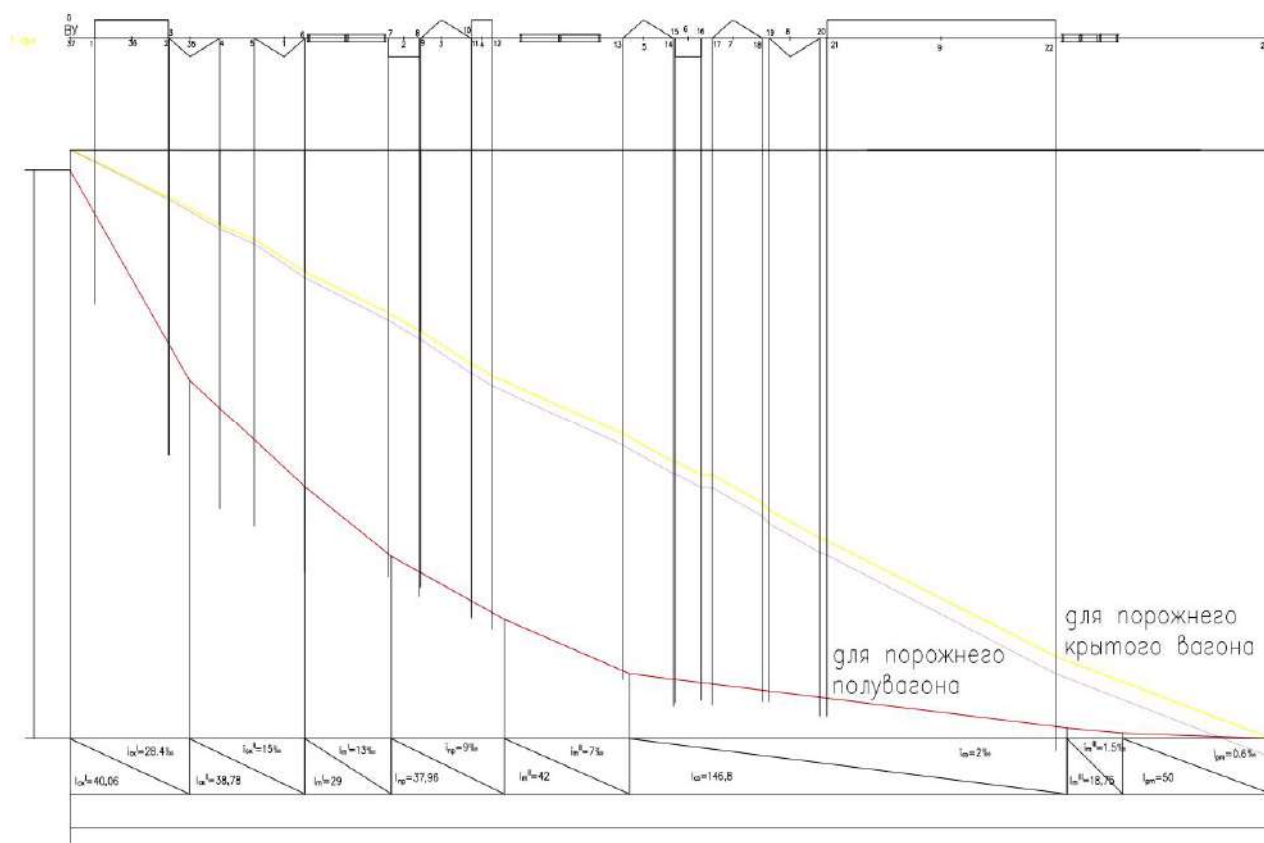


Рисунок 4 – Построение кинетических энергетических высот для четырехосного порожнего крытого вагона и полувагона

Как видно из рисунка 4, высота сортировочной горки, определенная исходя из параметров порожнего крытого вагона, низка, и порожний полувагон не доходит до расчетной точки трудного пути, так как кинетическая энергетическая высота порожнего полувагона графически пересекает продольный профиль горки.

Из рисунка 5 видно, что на одиночный четырехосный порожний полувагон, движущийся по сортировочной горке, действуют юго-восточный (ЮВ), восточный (В), северо-восточный

(СВ) встречные ветры. Действие встречного ветра на порожний полувагон существенно влияет на движение вагона.

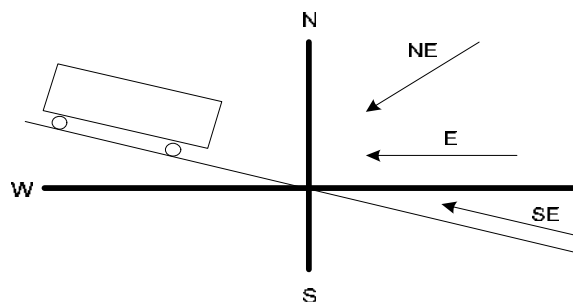


Рисунок 5 – Действие встречного ветра на движущийся полувагон на горке

На основании изложенного можно заключить, что при расчете высоты сортировочной горки необходимо принимать в качестве плохого бегуна технические характеристики четырехосного порожнего полувагона, потому что встречный ветер действует и внутри порожнего полувагона и препятствует нормальному спуску вагона по горке. Рекомендуется дальнейшее изучение воздействия встречного ветра на четырехосный порожний полувагон.

Список литературы

1. Об отсутствии теоретической базы формулы для определения высоты первого профильного участка сортировочной горки / Ш. У. Саидивалиев, Ш. Б. Джаббаров и [др.]. – Текст : непосредственный // Инновации. Наука. Образование. – 2021. – № 34. – С. 1467–1481.
2. О неточности формулы воздушного сопротивления при движении вагона по профилю сортировочной горки / Х. Т. Туранов, А. А. Гордиенко, Ш. У. Саидивалиев, Ш. Б. Джаббаров. – Текст : непосредственный // Транспорт: наука, техника, управление. – 2020. – № 9. – С. 34–39.
3. Саидивалиев, Ш. У. Новая методика расчета времени и скорости вагона при его движении на участке первой тормозной позиции сортировочной горки при воздействии встречного ветра / Ш. У. Саидивалиев, Р. Ш. Бозоров, Э. С. Шерматов. – Текст : непосредственный // Вопросы устойчивого развития общества. – 2021. – № 6. – С. 575–586.
4. Saidivaliev Sh.U., Bozorov R. Sh., Shermatov E. S. A new method of calculating time and speed of a carriage during its movement on the section of the first brake position of a marshaling hump when exposed headwind, *STUDENT*, 2021, no. 9.
5. О вычислении профильной высоты головного участка сортировочной горки / Х. Т. Туранов, А. А. Гордиенко, Ш. У. Саидивалиев, Ш. Б. Джаббаров. – Текст : непосредственный // Бюллетень транспортной информации. – 2019. – № 12 (294). – С. 15–20.
6. Туранов, Х. Т. Определение кинематических параметров движения вагона на участках тормозных позиций сортировочной горки / Х. Т. Туранов, Ш. У. Саидивалиев. – Текст : непосредственный // Современные проблемы транспортного комплекса России. – 2019. – Т. 9. – № 1. – С. 21–26. – <https://doi.org/10.18503/2222-9396-2019-9-1-21-26>.
7. Критический анализ теоретических положений движения вагона с сортировочной горки / Х. Т. Туранов, Д. И. Илесалиев, Ш. Б. Джаббаров, Ш. У. Саидивалиев. – Текст : непосредственный // Транспорт: наука, техника, управление. – 2021. – № 3. – С. 47–53.
8. Кобулов, Ж. Р. К вопросу о комплексном решении задач совершенствования сроков доставки грузов на железнодорожном транспорте / Ж. Р. Кобулов, Ж. С. Баротов, М. С. Ташматова. – Текст : непосредственный // Universum: технические науки. – 2021. – № 5 (86). – С. 13–19.

9. Kobulov J.R., Muxamedova Z.G., Barotov J.S. Regulation of departure time of freight wagons from stations and optimization of delivery time of freight wagons from stations. *Science Research Development Barcelona*, 2019, 04 (1), pp. 303-307.

10. Kobulov J.R., Barotov J.S. The method to measure time spent on wagons' technological operations at stations. *International Journal of Advanced Research in Science*, no. 6 (11), pp. 11587-11594.

References

1. Saidivaliev Sh.U., Jabbarov Sh.B., Adilov N.B., Khozhiev N.K., Bozorov R.Sh. On the absence of a theoretical basis for the formula for determining the height of the first profile section of the sorting hump. *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie. – Innovations. The science. Education*, 2021, no. 34, pp. 1467-1481 (In Russian).

2. Turanov Kh.T., Gordienko A.A., Saidivaliev Sh.U., Jabbarov Sh.B. On the inaccuracy of the formula for air resistance when a car moves along the profile of a marshalling yard. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie – Transport: science, technology, management*, 2020, no. 9, pp. 34-39 (In Russian).

3. Saidivaliev Sh.U., Bozorov R.Sh., Shermatov E.S. A new method for calculating the time and speed of a wagon during the ego of movement on the site of the first brake position of a marshalling hump under the influence of a headwind. *Voprosy ustoychivogo razvitiia obshchestva – Issues of sustainable development of society*, 2021, no. 6, pp. 575-586 (In Russian).

4. Saidivaliev Sh.U., Bozorov R. Sh., Shermatov E. S. A new method of calculating time and speed of a carriage during its movement on the section of the first brake position of a marshaling hump when exposed headwind, *STUDENT*, 2021, no. 9.

5. Turanov Kh.T., Gordienko A.A., Saidivaliev Sh.U., Jabborov Sh.B. On the calculation of the profile height of the head section of a marshalling yard. *Biulleten' transportnoi informatsii – Transport information bulletin*, 2019, no. 12 (294), pp. 15-20 (In Russian).

6. Turanov Kh.T., Saidvaliev Sh.U. Determination of the kinematic parameters of the movement of the car on the sections of the brake positions of the marshalling yard. *Sovremennye problemy transportnogo kompleksa Rossii – Modern problems of the transport complex of Russia*, 2019, vol. 9, no. 1, pp. 21-26, <https://doi.org/10.18503/2222-9396-2019-9-1-21-26> (In Russian).

7. Turanov Kh.T., Ilesaliev D.I., Jabbarov Sh.B., Saidivaliev Sh.U. Critical analysis of the theoretical provisions of the movement of the car from the marshalling yard. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie – Transport: science, technology, management*, 2021, no. 3, pp. 47-53 (In Russian).

8. Kobulov J.R., Barotov Zh.S., Tashmatova M.S. On the issue of a comprehensive solution to the problems of improving the timing of delivery of goods on railway transport. *Universum: tekhnicheskie nauki – Universum: technical sciences*, 2021, no. 5 (86), pp.13-19 (In Russian).

9. Kobulov J.R., Muxamedova Z.G., Barotov J.S. Regulation of departure time of freight wagons from stations and optimization of delivery time of freight wagons from stations. *Science Research Development Barcelona*, 2019, 04 (1), pp. 303-307.

10. Kobulov J.R., Barotov J.S. The method to measure time spent on wagons' technological operations at stations. *International Journal of Advanced Research in Science*, no. 6 (11), pp. 11587-11594.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Саидивалиев Шухрат Умарходжаевич

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТУ).

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

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

Тел.: +998 (97) 462-21-29.

E-mail: shuxratxoja@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Saidivaliev Shukhrat Umarxodjaevich

Tashkent State Transport University (TSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Transport cargo system», TSTU.

Phone: +998 (97) 462-21-29.

E-mail: shuxratxoja@mail.ru

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Сатторов Самандар Бахтиерович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТУ).

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

Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Транспортно-грузовые системы», ТГТУ.

Тел.: +998 (77) 073-51-57.

E-mail: satorovsamandar100@gmail.com

Бозоров Рамазон Шамилович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТУ).

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

Докторант кафедры «Транспортно-грузовые системы», ТГТУ.

Тел.: +998 (91) 251-33-77.

E-mail: ramazon-bozorov@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Саидивалиев, Ш. У. Анализ движения порожнего вагона по продольному профилю сортировочной горки / Ш. У. Саидивалиев, С. Б. Сатторов, Р. Ш. Бозоров. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 2 (54). – С. 2 – 9.

Sattorov Samandar Baxtiyorovich

Tashkent State Transport University (TSTU).

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

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

Phone: +998 (77) 073-51-57.

E-mail: satorovsamandar100@gmail.com

Bozorov Ramazon Shamilovich

Tashkent State Transport University (TSTU).

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

Doctoral student of the department «Transport cargo system», TSTU.

Phone: +998 (91) 251-33-77.

E-mail: ramazon-bozorov@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Saidivaliev Sh.U., Sattorov S.B., Bozorov R.Sh. Analysis of the movement of an empty car on the longitudinal profile of the hill. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 2 (54), pp. 2-9 (In Russian).

УДК 621.331:621.332

С. А. Фроленков

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

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ПРОВОДОВ КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКИ В ПЛАНЕ ПУТИ С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Аннотация. Статья содержит результаты исследования, посвященного совершенствованию технологии диагностики контактной сети на основе цифровой обработки изображения. В качестве основного инструмента предложен способ обработки видеоизображения алгоритмами на основе искусственной нейронной сети. В работе проведен анализ развития бесконтактной диагностики железнодорожной инфраструктуры на основе сквозных цифровых технологий, разработанного алгоритма и технологии распознавания видеоизображения; описаны перспективы развития предлагаемой технологии. Предлагаемый способ бесконтактной диагностики контактной сети электрифицированных железных дорог позволит повысить точность диагностики, сократить время между последующими измерениями и позволит создать цифровую диагностику контактной сети в рамках цифровой железной дороги. В рамках исследования разработаны алгоритм и технология распознавания видеоизображения и определения геометрических параметров контактного провода. Работа алгоритма основана на цифровой обработке видеоизображения процесса взаимодействия токоприемника (пантографа) и контактной подвески. Практическим результатом работы стало программное обеспечение, позволяющее идентифицировать отклонение контакта между токоприемником и контактными проводами от середины токоприемника. Предлагаемая технология позволяет пересмотреть подход к диагностике контактной сети, отказавшись от диагностических комплексов (диагностических вагонов-лабораторий) в пользу диагностических модулей. Коммерческий успех такой технологии обеспечат три фактора: рыночная стоимость диагностических модулей, не превышающая 500 – 700 тыс. руб., что вполне достижимо при увеличении закупаемых модулей; увеличение частоты измерения до одного – двух раз в сутки при установке модулей на подвижном составе, осуществляющем движение по графику (пассажирские поезда); сокращение затрат за счет отказа от использования диагностических вагонов-лабораторий как капиталоемкой части системы диагностики.

Ключевые слова: железная дорога, система тягового электроснабжения, контактная сеть, диагностика, алгоритм, датчик, распознавание объектов, цифровая обработка видеоизображения.

Sergey A. Frolenkov

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

IMPROVEMENT OF THE ALGORITHM FOR DETERMINING THE POSITION OF THE CONTACT SUSPENSION WIRES IN TERMS OF THE PATH USING DIGITAL IMAGE PROCESSING

Abstract. The article contains the results of a study devoted to improving the technology of diagnostics of the contact network based on digital image processing. As the main tool, a method for processing video images by algorithms based on an artificial neural network is proposed. The paper analyzes the development of contactless diagnostics of railway infrastructure based on end-to-end digital technologies, developed algorithm and video image recognition technology; describes the prospects for the development of the proposed technology. The proposed method of contactless diagnostics of the contact network of electrified railways will improve the accuracy of diagnostics, reduce the time between subsequent measurements and will allow creating digital diagnostics of the contact network within the digital railway. As part of the research, an algorithm and technology for video image recognition and determination of geometric parameters of the contact wire were developed. The algorithm is based on digital processing of the video image of the interaction of the pantograph and the contact suspension. The practical result of the work was software that allows you to identify the deviation of the contact between the current collector and the contact wires from the middle of the current collector. The proposed technology makes it possible to revise the approach to the diagnosis of the contact network, abandoning diagnostic complexes (diagnostic laboratory cars) in favor of diagnostic modules. The commercial success of such a technology will be ensured by three factors: the market value of diagnostic modules, not exceeding 500 – 700 thousand rubles, which is quite achievable with an increase in the purchased modules; increasing the measurement frequency to one or two times a day when installing modules on rolling stock moving according to schedule (passenger trains); reducing costs by eliminating the use of diagnostic laboratory cars as a capital-intensive part of the diagnostic system.

Keywords: railway, traction power supply system, contact network, geometry, dimensions, diagnostics, algorithm, sensor, deserted technologies, image transformation, digital technologies.

Контактная сеть электрифицированных железных дорог относится к объектам повышенного внимания. Это обусловлено тем, что указанный элемент железнодорожной инфраструктуры не имеет резерва, а также работает в неблагоприятных условиях: динамическое воздействие подвижного состава, ветровые и гололедные нагрузки, повышенные электрические нагрузки. Последний фактор особенно актуален в условиях, когда стратегическая задача железнодорожного транспорта по увеличению пропускной и провозной способности решается за счет увеличения массы грузовых поездов и сокращения интервалов попутного следования.

В настоящее время положение проводов контактной подвески относительно оси пути измеряется в ходе экспериментальных поездок вагонами-лабораториями производства ООО «МСД Холдинг» и «Инфотранс». Измерение производится при помощи разновысотных контактных датчиков. Недостатком такого способа измерения является высокая чувствительность к парусности самого вагона. При изучении видеокартинки возникают сложности – засвечивание матрицы в солнечную погоду [1].

Сказанное выше повышает актуальность работы по развитию методов, технологий и технических средств диагностики контактной сети. Основными факторами направления научно-технического развития являются расширение использования безлюдных технологий, сокращение эксплуатационных затрат, повышение достоверности оценки технического состояния, повышение возможности раннего выявления и прогнозирование аварийной ситуации. К числу указанных факторов следует отнести бесконтактную диагностику элементов контактной сети, а также возможность работы на высоких скоростях подвижного состава, а следовательно, сократить время диагностики состояния устройств контактной сети.

В стратегии научно-технического развития инфраструктуры железнодорожного транспорта можно выделить два основных фактора: развитие безлюдных и малолюдных технологий, переход от планово-предупредительного ремонта к ремонту по фактическому

состоянию на основе применения бортовой системы диагностики с функцией прогноза остаточного ресурса оборудования. Первый фактор обусловлен необходимостью снижения ошибок из-за человеческого фактора, повышением качества технической эксплуатации элементов железнодорожной инфраструктуры. Второй фактор определяет необходимость постоянного контроля состояния объектов и предсказание появления аварийного и предотказного состояния.

Ответом на удовлетворение потребностей владельцев железнодорожной инфраструктуры является применение продуктов цифровой революции, эффективность использования которых доказана в других отраслях промышленности. Развитие бесконтактной диагностики железнодорожной инфраструктуры на основе сквозных цифровых технологий следует рассматривать с точки зрения двух составляющих: технологии и технические средства измерения параметров; технологии обработки результатов измерения.

Решение задачи развития методов, технологий и технических средств диагностики контактной сети возможно на основе цифровой обработки изображений с применением алгоритмов, включающих в себя нейронные сети и искусственный интеллект [2 – 4]. Такие технологии хорошо зарекомендовали себя в таких областях, как безопасность (распознавание нарушений), медицина (выявление признаков заболевания), строительство и сервис (нарушение технологического процесса), углеводородная энергетика (предупреждение несанкционированного доступа к объекту) и др. В сфере транспорта и промышленности данные технологии эффективно применялись в области контроля за перемещением работников в опасных зонах. Очевидно, что возможности применения цифровой обработки изображений на основе алгоритмов, включающих в себя нейронные сети и искусственный интеллект, не ограничиваются перечисленными примерами и могут быть шире, что определяет актуальность настоящего исследования.

Целью исследования является разработка технологии диагностики контактной сети на основе цифровой обработки изображений. Для достижения этой цели необходимо решить следующие основные задачи: провести анализ развития бесконтактной диагностики железнодорожной инфраструктуры на основе сквозных цифровых технологий; разработать алгоритм и технологии распознавания видеоизображения; описать перспективы развития предлагаемой технологии.

Методологической основой исследования стали результаты научных исследований, посвященных вопросам совершенствования диагностики контактной сети на основе цифровых решений, а также результаты научных исследований, посвященных цифровой обработке изображений [5, 6]. В исследовании использовались результаты научных исследований отечественных и зарубежных ученых в области проблем, рассматриваемых в отношении совершенствования системы тягового электроснабжения, рассмотрен опыт европейских и азиатских стран [7, 8]. Исследование является развитием тематики научной школы «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Самарского государственного университета путей сообщения в области совершенствования системы тягового электроснабжения [9], в том числе исследований, выполненных с участием автора [10]. В ходе решения поставленных задач нашли применение такие методы: аналитический метод, метод математического моделирования, теория вероятностей и математическая статистика, метод классификации на основе создания и обучения искусственной нейронной сети и др.

Средства измерения включают в себя как технические приборы для измерения параметров, так и носители этих устройств. В качестве последних исследователи и разработчики в последние три десятилетия рассматривали как мобильные (переносные) средства диагностического оборудования, так и размещение диагностического оборудования на подвижном составе. Данный вариант, в свою очередь, можно разделить по типу носителя на специальный подвижной состав и подвижной состав, используемый для перевозки грузов и пассажиров. В качестве регистрирующего оборудования используются видео- и фотокамеры и оптоэлектронные сканеры.

Обработка зарегистрированных данных получила дополнительный импульс развития за счет использования цифровых средств обработки. Нейротехнологии и искусственный интеллект позволяют обработать изображение, при этом скорость и качество обработки в последнее время существенно выросли. Искусственная нейронная сеть позволяет обрабатывать сигнал видео- и фотоизображений и определять геометрические параметры проводов контактной подвески и положение поддерживающих устройств.

Рассматривая этапы развития средств диагностики, можно выделить два основных направления дальнейшего развития систем диагностики контактной сети. Первое направление предполагает применение специального диагностического оборудования, использующего современные средства измерения и технологии обработки данных. Недостатком этого направления является ограничение возможности диагностики – не чаще одного раза в неделю на магистральных участках и не чаще одного – двух раз в месяц на второстепенных линиях. Второе направление предполагает использование автономных необслуживаемых устройств диагностики оборудования, устанавливаемых на подвижном составе, работающем в графике, с автоматической обработкой данных и передачей полученных сведений в центр управления. Второй вариант представляется наиболее перспективным, поскольку существующие в настоящее время ограничения его использования (сложность конструкции и надежность работы) купируются развитием современных средств измерения и методов обработки данных. Мобильные переносные средства измерения рассматриваются как тупиковое направление развития систем диагностики, поскольку ограничены человеческим фактором, что противоречит Энергетической стратегии холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года.

В рамках исследования разработаны алгоритм и технология распознавания видеоизображения и определения геометрических параметров контактного провода. Работа алгоритма основана на цифровой обработке видеоизображения процесса взаимодействия токоприемника (пантографа) и контактной подвески. Практическим результатом работы стала разработка программного обеспечения, позволяющего идентифицировать отклонение контакта между токоприемником и контактными проводами от середины токоприемника. При обнаружении отклонения, выходящего за предустановленные границы, начинают расти показания счетчика отклонений и фиксируется место отклонения.

Работа алгоритма строится на искусственной нейронной сети. Для обнаружения (распознавания) пантографа, проводов и контакта между ними используются алгоритмы Canny Edge Detection и Hough transform, а также решение системы линейных уравнений. Технологический стек: программа может работать на операционных системах Windows, Linux (Ubuntu). Для работы программы в системе должен быть установлен Python версии 3.8 и выше. Для работы программы необходимы следующие библиотеки: *streamlit*, *numpy* и *opencv-python*. Для использования программы требуется браузер *Chrome*, *Edge*, *Yandex*. На рисунках 1, 2 представлены интерфейс программы для распознавания изображения контактной сети с целью диагностики ее параметров, размещенный на облачном сервере, а также визуализация процесса работы программы.

Алгоритм позволяет успешно работать с контактной подвеской как с одним контактными проводом, так и с двумя контактными проводами. Алгоритм апробирован на магистральных участках железной дороги с различным положением видеокамеры и различными помехами видеоизображения. Погрешность измерения не превышает 3 %, что удовлетворительно для бесконтактного способа измерения. Окончательное решение о нарушении принимает работник, эксплуатирующий систему диагностики. На рисунке 2 наглядно продемонстрирована работа программы. Алгоритм распознал положение двух контактных проводов (выделен на контактном проводе), а также положение лыжи токоприемника (выделена граница на полозе). Вертикальными линиями отмечены границы допустимого отклонения и выход за них. Все параметры регулируются и могут быть настроены пользователем самостоятельно (см. рисунок 1).

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

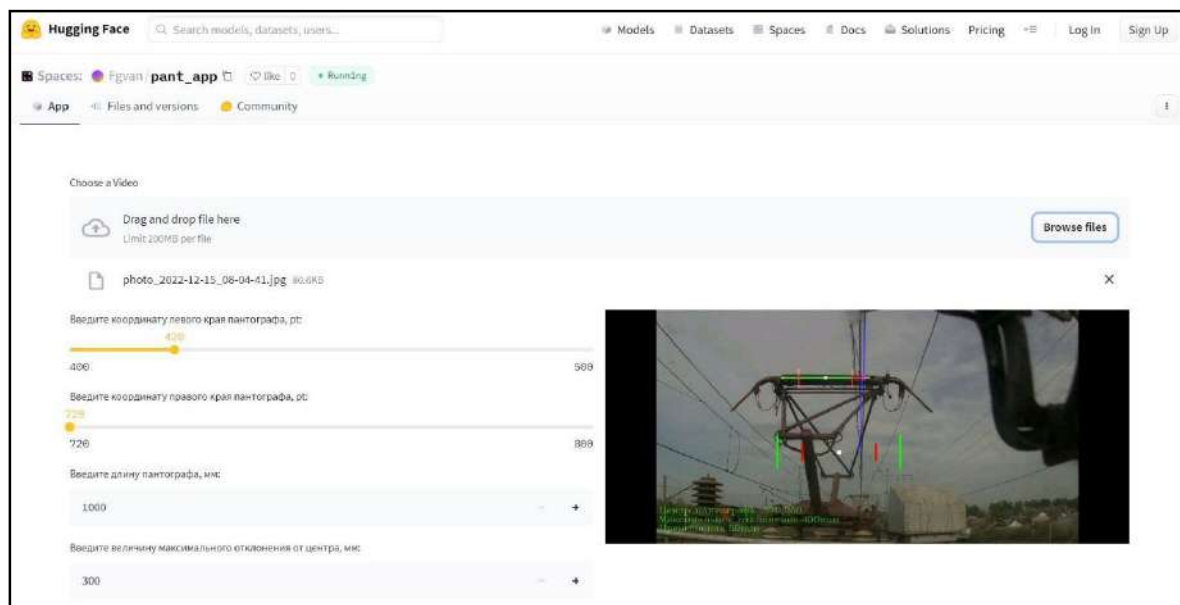


Рисунок 1 – Интерфейс программы для распознавания изображения контактной сети с целью диагностики ее параметров



Рисунок 2 – Визуализация процесса работы программы

Предлагаемая технология имеет три варианта работы в зависимости от количества камер и наличия токоприемника в кадре.

Первый вариант – одна камера и токоприемник, постоянно находящийся в кадре, при этом положение камеры и токоприемника фиксировано на протяжении всего времени диагностики (см. рисунок 2). Точность измерения – в пределах 3 %. Стоимость установки не превышает стоимости существующей технологии диагностического вагона-лаборатории. Возможность применения – только в составе диагностического вагона-лаборатории.

Второй вариант – две камеры и токоприемник, временно находящийся в кадре. Вариант предусматривает два режима: режим настройки (используется поднятый токоприемник) и режим диагностики (токоприемник опущен). При этом положение камер и токоприемника фиксируется только в режиме настройки. Точность измерения – в пределах 5 %. Стоимость

установки незначительно превышает стоимость существующей технологии диагностического вагона-лаборатории. Возможность применения – только в составе диагностического вагона-лаборатории.

Третий вариант – две или четыре камеры, токоприемник не требуется. Положение контактного провода (проводов) определяется с помощью триангуляции. Вариант готов к работе с момента запуска. Точность измерения – в пределах 5 % (для двух видеокамер) и 3 % (для четырех видеокамер). Стоимость установки существенно ниже стоимости существующей технологии диагностического вагона-лаборатории: не требуются вышка и измерительный токоприемник. Возможность применения – на любом подвижном составе, оператор не требуется.

Из трех описанных вариантов последний представляется наиболее перспективным, поскольку позволяет существенно сократить затраты на диагностику и повысить качество диагностики за счет увеличения частоты измерений. Практической реализацией предлагаемого решения является диагностический модуль, устанавливаемый на крышу подвижного состава, включающий в себя измерительное оборудование, оборудование контроля положения диагностического оборудования относительно пройденного пути, а также оборудования связи с диспетчерским центром и передачи полученных данных. Диагностический модуль должен быть оборудован питанием 220 В от электросети подвижного состава и устройством автономного питания на случай пропадания питания.

Предлагаемая технология позволяет пересмотреть подход к диагностике контактной сети, отказавшись от диагностических комплексов (диагностических вагонов-лабораторий) в пользу диагностических модулей. Коммерческий успех такой технологии обеспечат три фактора. Рыночная стоимость диагностических модулей, не превышающая 500–700 тыс. руб., что вполне достижимо при увеличении закупаемых модулей; увеличение частоты измерения до одного – двух раз в сутки при установке модулей на подвижном составе, осуществляющем движение по графику (пассажирские поезда); сокращение затрат за счет отказа от использования диагностических вагонов-лабораторий как капиталоемкой части системы диагностики.

Список литературы

1. Петухова, В. А. Анализ методов и средств неразрушающего контроля контактной сети в ОАО «РЖД» / В. А. Петухова, Е. Г. Донских. – Текст : непосредственный // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте : материалы всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омский государственный университет путей сообщения. – Омск, 2022. – С. 229–234.
2. Вьюхин, В. А. Реализация нейронной сети Хопфилда на примере распознавания образов / В. А. Вьюхин, А. И. Газейкина. – Текст : непосредственный // Актуальные вопросы преподавания математики, информатики и информационных технологий. – 2017. – № 2. – С. 157–163.
3. Еремеев, Е. А. Распознавание образов в экспертных системах принятия решений / Е. А. Еремеев. – Текст : непосредственный // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2019. – Т. 19. – № 4. – С. 704–713.
4. Харин, Ю. С. Робастное статистическое распознавание образов: теория и применения / Ю. С. Харин. – Текст : непосредственный // Вестник Белорусского государственного университета. Серия 1: Физика. Математика. Информатика. – 1998. – № 1. – С. 3–12.
5. Локтев, А. А. Алгоритм распознавания объектов / А. А. Локтев, А. Н. Алфимцев, Д. А. Локтев. – Текст : непосредственный // Вестник Московского государственного строительного университета. – 2012. – № 5. – С. 194–201.
6. Бондур, В. Г. Современные подходы к обработке больших потоков гиперспектральной и многоспектральной аэрокосмической информации / В. Г. Бондур. – Текст : непосредственный // Исследование Земли из космоса. – 2014. – № 1. – С. 4–17.

7. Снижение затрат на содержание региональных линий в Японии. – Текст : непосредственный // Железные дороги мира. – 2018. – № 1. – С. 72–75.

8. Железные дороги Германии: проблемы и решения. – Текст : непосредственный // Железные дороги мира. – 2022. – № 11. – С. 25–29.

9. Гаранин, М. А. Распознавание проводов контактной сети по измерениям бесконтактных лазерных сканеров / М. А. Гаранин, А. Г. Бахрах, С. А. Митрофанов. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы проектирования и эксплуатации контактных подвесок и токоприемников электрического транспорта : материалы всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Омск, 25–26 мая 2011 года / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2011. – С. 189–196.

10. Гаранин, М. А. Методика бесконтактной диагностики проводов контактной сети электрифицированных железных дорог / М. А. Гаранин, С. А. Фроленков. – Текст : непосредственный // Вестник транспорта Поволжья. – 2020. – № 6 (84). – С. 7–14.

References

1. Petukhova V.A. [Analysis of methods and means of non-destructive testing of the contact network in JSC «Russian Railways»]. *Pribory i metody izmerenij, kontrolya kachestva i diagnostiki v promyshlennosti i na transporte : materialy V vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* [Instruments and methods of measurement, quality control and diagnostics in industry and transport : Materials of the V All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation]. Omsk, 2022, pp. 229-234 (In Russian).

2. V'yuhin V.A. Implementation of the Hopfield neural network on the example of pattern recognition. *Aktual'nye voprosy prepodavaniya matematiki, informatiki i informacionnyh technologij – Current issues of teaching mathematics, computer science and information technology*, 2017, no. 2, pp. 157-163 (In Russian).

3. Ereemeev E.A. Pattern recognition in expert decision-making systems. *Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki – Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 704-713 (In Russian).

4. Harin Yu.S. Robust statistical pattern recognition: theory and applications. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1: Fizika. Matematika. Informatika – Bulletin of the Belarusian State University. Series 1: Physics. Mathematics. Computer science*, 1998, no. 1, pp. 3-12 (In Russian).

5. Loktev A.A., Alfimcev A.N., Loktev D.A. Object recognition algorithm. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta – Bulletin of the Moscow state university of civil engineering*, 2012, no. 5, pp. 194-201 (In Russian).

6. Bondur V.G. Modern approaches to processing large streams of hyperspectral and multispectral aerospace information. *Issledovanie Zemli iz kosmosa – Exploring the Earth from space*, 2014, no. 1, pp. 4-17 (In Russian).

7. Reducing the cost of maintaining regional lines in Japan. *Zheleznye dorogi mira – Railways of the world*, 2018, no. 1, pp. 72-75 (In Russian).

8. German railways: problems and solutions. *Zheleznye dorogi mira – Railways of the world*, 2022, no. 11, pp. 25-29 (In Russian).

9. Garanin M.A. [Recognition of contact network wires by measurements of contactless laser scanners] *Aktual'nye problemy proektirovaniya i ekspluatatsii kontaktnyh podvesok i tokopriemnikov elektricheskogo transporta : vserossijskaya nauchno-prakticheskaya konferenciya s mezhdunarodnym uchastiem* [Actual problems of design and operation of contact suspensions and current collectors of electric transport : All-Russian scientific and practical conference with international participation]. Omsk, 2011, pp. 189-196 (In Russian).

10. Garanin M.A. The method of contactless diagnostics of wires of the contact network of electrified railways. *Vestnik transporta Povolzh'ya – Bulletin of transport of the Volga region*, 2020, no. 6 (84), pp. 7-14 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Фроленков Сергей Андреевич

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС).

Свободы ул., д. 2 в, г. Самара, 443066, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», СамГУПС.

Тел.: +7 (927) 656-09-96.

E-mail: f9276560996@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Frolenkov Sergey Andreevich

Samara State Transport University (SSTU).

2v, Svobody st., Samara, 443066, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department «The supply of rail transport», SSTU.

Phone: +7 (927) 656-09-96.

E-mail: f9276560996@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Фроленков, С. А. Совершенствование алгоритма определения положения проводов контактной подвески в плане пути с помощью цифровой обработки изображений / С. А. Фроленков. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 2 (54). – С. 9 – 16.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Frolenkov S.A. Improvement of the algorithm for determining the position of the contact suspension wires in terms of the path using digital image processing. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 2 (54), pp. 9-16 (In Russian).

УДК 621.331

А. А. Комяков, А. И. Шкулов, Л. А. Бартель

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

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы имитационного моделирования динамических процессов в системе тягового электроснабжения. В качестве инструмента для разработки модели выбрана среда *SimInTech*. Для модели составлены схема обмена данными внутри программного комплекса, разработан алгоритм динамического расчета расстояний от подстанций до электроподвижного состава, позволяющий произвести расчет сопротивлений элементов системы тягового электроснабжения, представлены основные блоки модели и дано описание к ним. Разработана модель расчетного участка для одной из межподстанционных зон Западно-Сибирской железной дороги, позволяющая анализировать динамические процессы в системе тягового электроснабжения с учетом движения поездов. Произведено моделирование работы участка в *SimInTech*, приведены графики мгновенных и среднеквадратических значений тока и напряжения присоединений контактной сети подстанций, показана возможность анализа показателей качества электроэнергии при работе модели. Полученные результаты верифицированы путем сравнения с результатами моделирования в программном комплексе «КОРТЭС». Получено, что расход по присоединениям контактной сети с учетом потерь электроэнергии в *SimInTech* составил 4036,7 кВт·ч, а в «КОРТЭС» – 4085,3 кВт·ч, расхождение составило 1,18 %. Таким образом, доказана работоспособность модели. Сделаны выводы о работе программного комплекса и рассмотрены перспективы дальнейших исследований в рамках решения прикладных задач по повышению энергоэффективности и пропускной способности участков железных дорог.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, имитационное моделирование, тяговая нагрузка, динамические процессы.

Alexander A. Komyakov, Andrey I. Shkulov, Lyubov A. Bartel

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

SIMULATION MODELING OF DYNAMIC PROCESSES IN THE TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM

Abstract. The article deals with the issues of simulation modeling of dynamic processes in the traction power supply system. As a tool for the development of the model, the development environment for algorithms, mathematical models, and control interfaces of the *SimInTech* software package was chosen. A model of a single-track design section of the

inter-substation zone based on a real stretch from Karasuk 3 station to Aksenikha station (Zapadno-Sibi the Russian railway), for the calculation of the traction power supply system, which allows analyzing dynamic processes taking into account the movement of trains. For the model, the following are compiled: a data exchange scheme within the software package, an algorithm for dynamic calculation of distances from substations to EPS, which allows calculating the resistances of the elements of the STE with decoding and explanations, the main blocks of the model are presented and a description is given to them. The simulation of the trip was carried out and the results obtained were verified using the example of an operating section of electrified railways modeled in the KORTES software package. Graphs of instantaneous and RMS values of current and voltage of one of the simulated substations are given. According to the simulation results, we see that the consumption of the feeders of the contact network, taking into account the loss of electricity, amounted to 4036.7 kWh, and the simulation results in «KORTES» show 4085.3 kWh error was 1.18 percent. Conclusions are drawn about the work of the software package and plans for further development are considered.

Keywords: traction power supply system, simulation modeling, traction load, dynamic processes.

В соответствии с Транспортной стратегией РФ до 2035 г. [1] ключевым инфраструктурным вызовом в части железнодорожного транспорта является недостаточная пропускная способность железнодорожных линий. Особенно остро эта проблема проявляется на Восточном полигоне, где имеют место ограничения пропускной и провозной способности, в том числе по условиям устройств электроснабжения. Для принятия решения о выборе способов ликвидации «узких мест» железнодорожной энергетической инфраструктуры с учетом удовлетворения будущего спроса на перевозки в большинстве случаев используется методология, основанная на совместном имитационном моделировании работы системы тягового электроснабжения (СТЭ) и электроподвижного состава (ЭПС). При этом указанные расчеты должны выполняться с учетом безусловного выполнения критериев энергоэффективности перевозочного процесса, что также является одним из ключевых направлений развития ОАО «РЖД» [2]. На текущий момент существует множество вариантов для решения изложенных выше проблем и задач: ряд программных комплексов «Fazanord-качество» [3], «Fazanord» [4], «КОРТЭС», MatLAB Simulink, AnyLogic, ExtendSim, «eTraX» [5], алгоритмов, патентов, полезных моделей [6 – 13].

Наиболее распространенным в практике расчетов системы тягового электроснабжения в России является «Комплекс расчетов тягового электроснабжения» (КОРТЭС). Наряду с преимуществами, связанными с относительной простотой и надежностью, КОРТЭС имеет ряд недостатков, к числу которых можно отнести:

1) неправильный учет уровня напряжения на токоприемнике ЭПС из-за того, что тяговый расчет выполняется отдельно от электрического, что приводит к значительным погрешностям расчета;

2) отсутствие возможности оценки качества электроэнергии;

3) невозможность достоверного учета перетоков мощности по межподстанционным зонам;

4) невозможность отслеживания мгновенных значений токов и напряжений;

5) невозможность оценки влияния режимов работы тяговой сети на нетяговых железнодорожных потребителей;

6) сложность моделирования активных устройств системы тягового электроснабжения, таких как управляемые устройства компенсации реактивной мощности, бустерные трансформаторы, накопители электроэнергии.

Таким образом, существует необходимость совершенствования методов имитационного моделирования СТЭ. В настоящем исследовании поставлена цель – разработать имитационную модель системы тягового электроснабжения, позволяющую анализировать динамические процессы с учетом движения поездов по межподстанционной зоне. Для достижения указанной цели поставлены следующие задачи:

1) разработать алгоритм, позволяющий учитывать движение поездов по межподстанционной зоне при имитационном моделировании;

2) разработать имитационные модели СТЭ, ЭПС и тяговой сети и оценить их работоспособность;

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

3) верифицировать модель на примере действующего участка электрифицированных железных дорог.

В качестве рабочей среды для имитационного моделирования выбран программный комплекс SimInTech. Он предназначен для анализа и исследования динамических процессов в различных объектах [14].

Разработана схема обмена данными при имитационном моделировании СТЭ в программе SimInTech (рисунок 1).

Блок формирования файла данных о движении поездов получает данные из первичного тягового расчета и графика движения поездов. Данные включают в себя время, координаты поездов, сопротивления и индуктивности электровозов в каждый момент времени, зависящий от шага дискретизации и сигналов включения или отключения блоков «ЭПС». Схематическое расположение ЭПС на межподстанционной зоне приведено на рисунке 2. В середине межподстанционной зоны предусмотрен пост секционирования.

На представленной схеме $x_0, x_1, x_2 \dots$ – длины соответствующих участков межподстанционной зоны, которые определяются координатой электроподвижного состава ЭПС1, ЭПС2, ЭПС3 в каждый конкретный момент времени. Направление движения в схеме – из точки А в точку В. Когда ЭПС пересекает координату поста секционирования, его параметры автоматически присваиваются соответствующему ЭПС с тем же порядковым номером и дополнительным индексом «ф».

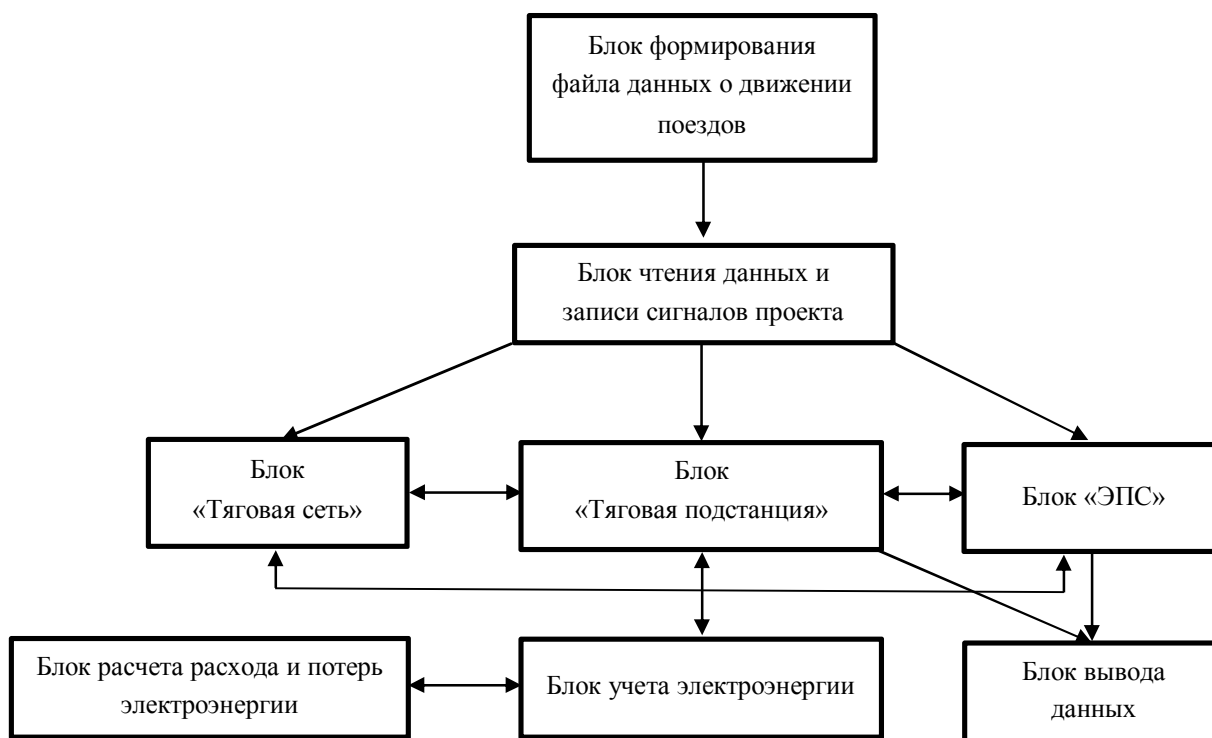


Рисунок 1 – Схема обмена данными при имитационном моделировании системы тягового электроснабжения в SimInTech

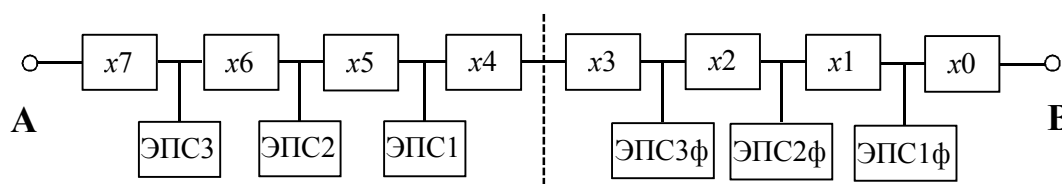


Рисунок 2 – Схематическое расположение ЭПС на межподстанционной зоне для одного пути двухпутного участка

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Для расчета значений x_0 , x_1 , x_2 и т. д. разработан алгоритм, представленный на рисунке 3. Он предусматривает одновременное нахождение до трех поездов на одном пути двухпутного участка.

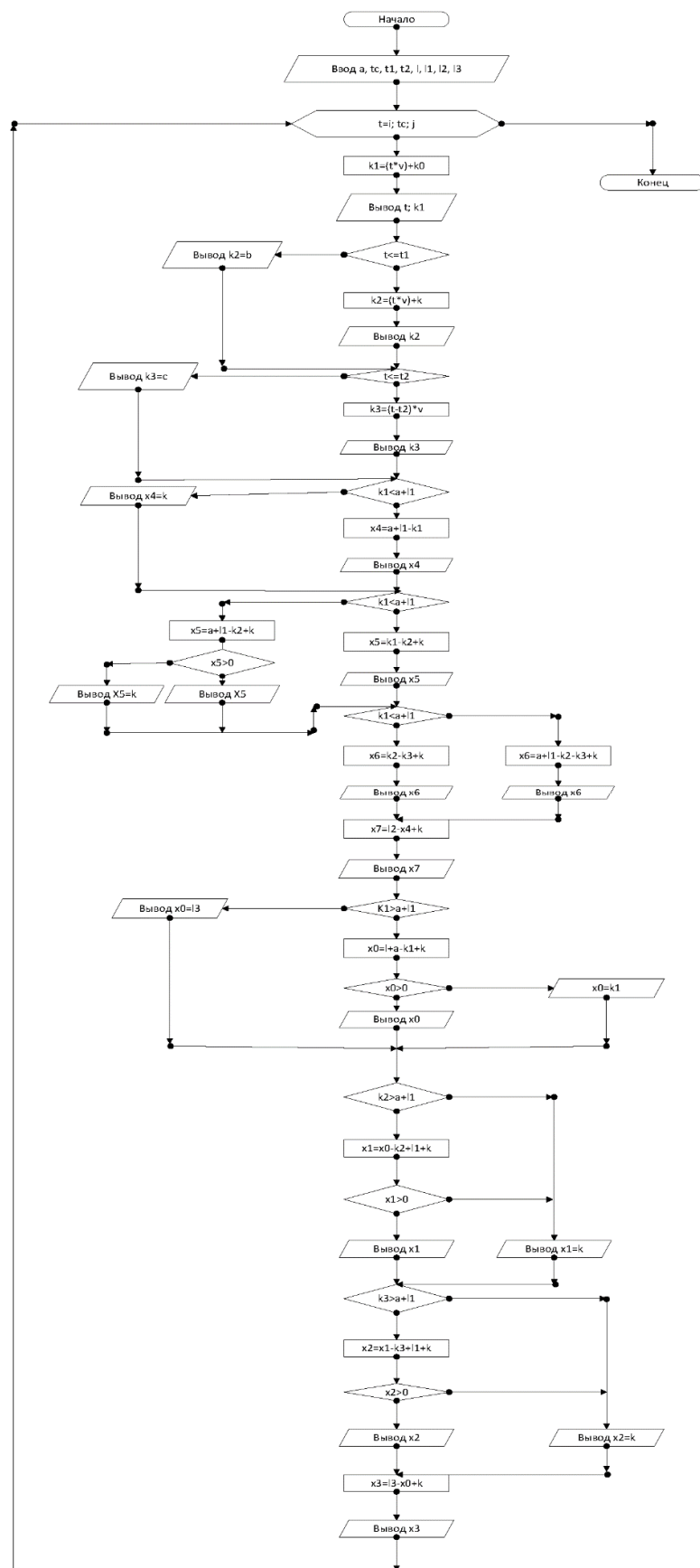


Рисунок 3 – Граф-схема алгоритма расчета расстояний от подстанций до ЭПС

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Блок ввода данных «Ввод $a, tc, t1, t2, l, l1, l2, l3$ » включает в себя ввод начальных параметров: a – начальная координата первого поезда; tc – рассматриваемый промежуток времени движения подвижного состава в секундах; $t1$ – время отправления второго поезда; $t2$ – время отправления третьего поезда; l – длина пути до точки $x0$; $l1$ – расстояние от начала отсчета до координаты поста секционирования; $l2$ – то же с учетом запаса; $l3$ – длина пути до точки $x3$.

Задаем цикл через блок модификации « $t = i; tc; j$ » с параметром времени t , где i – начальное значение времени; tc – конечное значение времени; j – шаг изменения. Определяем тело цикла, включающее в себя команды расчета, блок вывода данных и условный блок.

Блок расчета « $k1 = (t \cdot v) + k0$ » вычисляет координату расположения первого поезда по времени. Блок «Вывод $t; k1$ » выводит мгновенные значения времени и координаты первого поезда.

Условный блок « $t \leq t1$ » проверяет условие времени отправления второго поезда. При выполнении условия ($t \leq t1$) блок «Вывод $k2 = b$ » фиксирует координату второго поезда равной первоначальному значению координаты (поезд не движется), в противном случае ($t > t1$) блок « $k2 = (t \cdot v) + k$ » вычисляет координату второго поезда, выводя значение координаты с помощью блока «Вывод $k2$ ». Аналогично вычисляется координата третьего поезда с учетом времени отправления для третьего поезда.

Условный блок « $k1 < a + l1$ » проверяет условие пересечения первым поездом точки $x4$. При выполнении условия ($k1 < a + l1$) блок « $x4 = a + l1 - k1$ » вычисляет расстояние поезда до точки $x4$ и выводит его через блок «Вывод $x4$ ». В противном случае ($k1 > a + l1$) поезд пересек точку $x4$, блок «Вывод $x4 = k$ » фиксирует координату точки $x4$ равной коэффициенту запаса.

Условный блок « $k1 < a + l1$ » проверяет условие пересечения первым поездом точки $x4$. При выполнении условия ($k1 < a + l1$) блок « $x5 = k1 - k2 + k$ » вычисляет координату точки $x5$ равной расстоянию между первым и вторым поездами, выводит значение через блок «Вывод $x5$ ». В противном случае ($k1 > a + l1$) вычисляет координату точки $x5$ относительно расстояния между точкой $x4$ и вторым поездом. Так как при пересечении вторым поездом точки $x5$ значение координаты принимает отрицательный знак, вводим условный блок « $x5 > 0$ ». При выполнении условия ($x5 > 0$) блок «Вывод $x5$ » выводит значение координаты точки $x5$. В противном случае блок «Вывод $x5 = k$ » фиксирует координату точки $x5$ равной коэффициенту запаса.

Условный блок « $k1 < a + l1$ » проверяет условие пересечения первым поездом точки $x4$. При выполнении условия ($k1 < a + l1$) блок « $x6 = k2 - k3 + k$ » вычисляет координату точки $x6$ равной расстоянию между вторым и третьим поездами, выводит значение через блок «Вывод $x6$ ». В противном случае ($k1 > a + l1$) блок « $x6 = a + l1 - k2 - k3 + k$ » вычисляет координату точки $x6$ относительно расстояния между вторым и третьим поездами.

Блок « $x7 = l2 - x4 + k$ » вычисляет координату точки $x7$. Блок «Вывод $x7$ » выводит значение координаты точки $x7$.

Условный блок « $k1 > a + l1$ » проверяет условие пересечения первым поездом точки $x4$. При выполнении условия ($k1 > a + l1$) блок « $x0 = l + a - k1 + k$ » вычисляет координату точки $x0$ равной расстоянию между точкой $x0$ и первым поездом. Так как при пересечении первым поездом точки $x0$ значение координаты принимает отрицательный знак, вводим условный блок « $x0 > 0$ », при выполнении условия которого блок «Вывод $x0$ » выводит значение координаты точки $x0$. В противном случае блок «Вывод $x0 = k$ » фиксирует координату точки $x0$ равной коэффициенту запаса. При невыполнении условия ($k1 > a + l1$) блок «Вывод $x0 = l3$ » выводит значение координаты точки $x0$ равной расстоянию пути до точки $x3$.

Условный блок « $k2 > a + l1$ » проверяет условие пересечения вторым поездом точки $x4$. При выполнении условия ($k2 > a + l1$) блок « $x1 = x0 - k2 + l1 + k$ » вычисляет координату точки $x1$ равной расстоянию между точкой $x0$ и вторым поездом. Так как при пересечении вторым поездом точки $x1$ значение координаты принимает отрицательный знак, вводим условный блок « $x1 > 0$ », при выполнении условия которого блок «Вывод $x1$ » выводит значение

координаты точки x_1 . В противном случае (« $k_2 > a + l_1$ » или « $x_1 < 0$ ») блок «Вывод $x_1 = k$ » фиксирует координату точки x_1 равной коэффициенту запаса.

Условный блок « $k_3 > a + l_1$ » проверяет условие пересечения третьим поездом точки x_4 . При выполнении условия ($k_3 > a + l_1$) блок « $x_2 = x_1 - k_3 + l_1 + k$ » вычисляет координату точки x_2 равной расстоянию между точкой x_1 и третьим поездом. Так как при пересечении третьим поездом точки x_2 значение координаты принимает отрицательный знак, вводим условный блок « $x_2 > 0$ », при выполнении условия которого блок «Вывод x_2 » выводит значение координаты точки x_2 . В противном случае (« $k_3 > a + l_1$ » или « $x_2 < 0$ ») блок «Вывод $x_2 = k$ » фиксирует координату точки x_1 равной коэффициенту запаса.

Блок « $x_3 = l_3 - x_0 + k$ » вычисляет координату точки x_3 . Блок «Вывод x_3 » выводит значение координаты точки x_7 .

По результатам расчета в блоке формирования файла данных о движении поезда создается текстовый документ в формате (*.dat). Данные в текстовом документе представляются в виде матрицы D размером $M \times N$, где M – количество факторов, N – количество значений факторов в зависимости от шага дискретизации. Например, матрица входных данных для двух поездов на межподстанционной зоне имеет вид:

$$D = \begin{bmatrix} x_4^1 & x_5^1 & x_6^1 & x_1^1 & x_2^1 & x_3^1 & x_4^1 & re_1^1 & le_1^1 & re_2^1 & le_2^1 & ref_1^1 & lef_2^1 & lef_2^1 & vkl_1^1 & vkl_2^1 & vklf_1^1 & vklf_1^1 \\ x_4^2 & x_5^2 & x_6^2 & x_1^2 & x_2^2 & x_3^2 & x_4^2 & re_1^2 & le_1^2 & re_2^2 & le_2^2 & ref_1^2 & lef_2^2 & lef_2^2 & vkl_1^2 & vkl_2^2 & vklf_1^2 & vklf_1^2 \\ - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & - \\ x_4^n & x_5^n & x_6^n & x_1^n & x_2^n & x_3^n & x_4^n & re_1^n & le_1^n & re_2^n & le_2^n & ref_1^n & lef_2^n & lef_2^n & vkl_1^n & vkl_2^n & vklf_1^n & vklf_1^n \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Кроме длины участков межподстанционной зоны в матрицу исходных данных входят такие значения:

re_1, re_2, ref_1, ref_2 – активное сопротивление локомотива в каждый момент времени;

le_1, le_2, lef_1, lef_2 – индуктивность локомотива в каждый момент времени;

$vkl_1, vkl_2, vklf_1, vklf_2$ – бинарный сигнал включения/отключения расчетного блока ЭПС.

Значения re и le определяются по результатам тягового расчета в соответствии с ГОСТ Р 57670–2017 и переходом от напряжений, активных и полных токов к пассивным параметрам в соответствии с выражениями:

$$R_L = \frac{U \cdot I_a}{I_{\text{полн}}^2}, \quad (2)$$

$$L = \frac{\sqrt{\left(\frac{U}{I_{\text{полн}}}\right)^2 - R_L^2}}{314}, \quad (3)$$

где U – напряжение в контактной сети; I_a – активный ток локомотива; $I_{\text{полн}}$ – полный ток локомотива.

Блок чтения данных и записи сигналов (демультиплексор) представляет собой элемент программы, который считывает из файла *.dat данные о движении поезда и преобразует их в сигналы, воспринимаемые программой (рисунок 4). Отдельные данные используются только на начальном шаге моделирования, а другие применяются в течение всей работы программы.

Блок «Тяговая подстанция» (рисунок 5) моделирует работу реальной тяговой подстанции и учитывает потери электроэнергии в ее элементах, в модель встроены измерительных приборы для отслеживания изменений ключевых параметров. Модель тяговой подстанции состоит из трехфазного трехобмоточного трансформатора, подающего напряжение в контактную сеть, блока PQ , который моделирует нагрузку нетяговых потребителей, блоков вычисления активной и реактивной мощностей, амперметров и вольтметров, элементов для построения графиков зависимостей мгновенных и среднеквадратических значений токов и напряжений, активной и реактивной мощностей от времени, спектров токов и напряжений.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

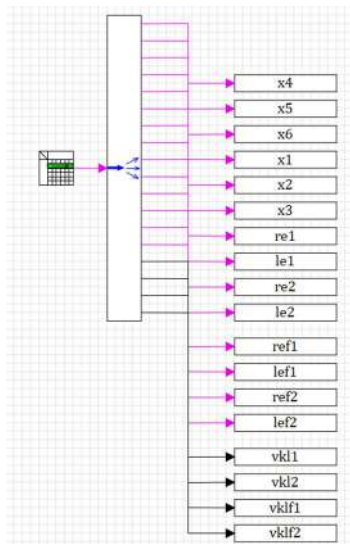


Рисунок 4 – Схема блока чтения данных и записи сигналов

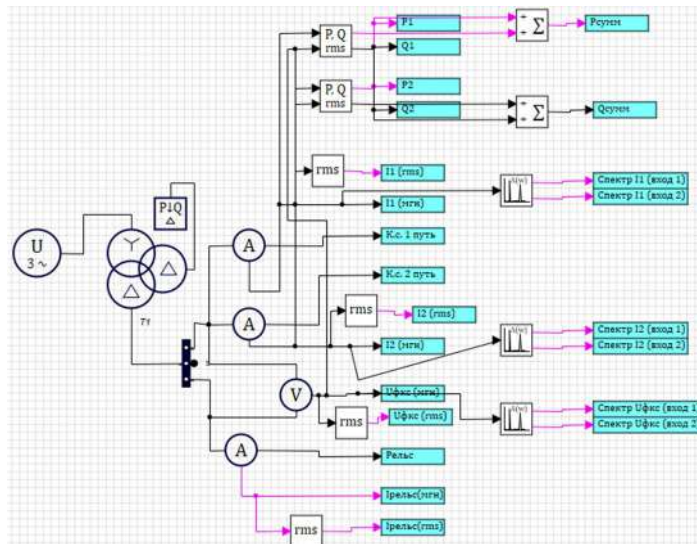


Рисунок 5 – Схема блока «Тяговая подстанция»

Блок «ЭПС» (рисунок 6) представляет собой схему однофазного мостового диодного преобразователя электровоза, имитирующую тяговую нагрузку в СТЭ. Данный подход является упрощенным. Современные типы электровозов переменного тока имеют тиристорные выпрямительно-инверторные преобразователи (ВИПы), однако на данном этапе разработки модели принятые допущения не окажут значительного влияния на результат. Тяговая нагрузка задается на основе тягового расчета, который учитывает модель локомотива, загруженность подвижного состава, график движения поездов и др. В модели используются выпрямительный агрегат и измерительные блоки, по своему назначению аналогичные блокам, применяемым на тяговой подстанции. Для расчета используется действительное напряжение, которое изменяется с каждым шагом итерации модели.

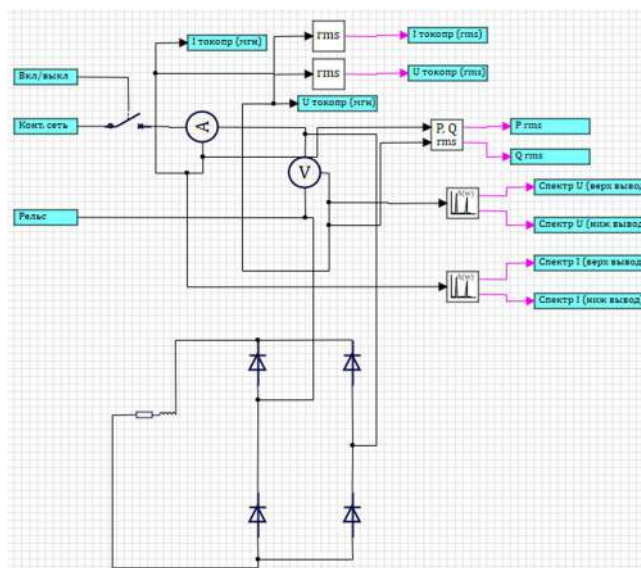


Рисунок 6 – Схема блока «ЭПС»

В блоке «Тяговая сеть» (рисунок 7) смоделированы пассивные элементы контактной сети и рельсовой цепи, которые рассчитываются на основании информации о значениях x_0 , x_1 , x_2 и т. д., получаемой из блока чтения данных и записи сигналов, и заданного удельного сопротивления этих элементов. Таким образом, имеется возможность определения значения напряжений в каждой точке межподстанционной зоны, которые зависят от текущей поездной ситуации.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

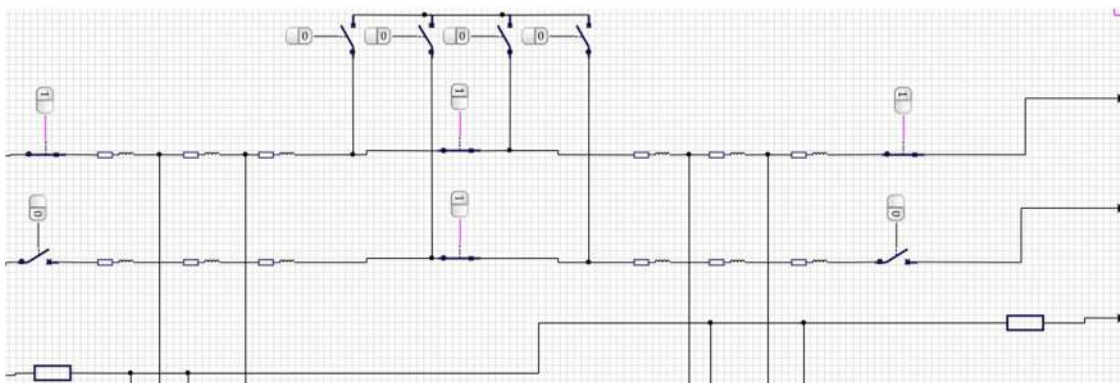


Рисунок 7 – Схема блока «Тяговая сеть»

В блоке «Тяговая сеть» предусмотрено наличие поста секционирования и разъединителей, позволяющих моделировать любую схему питания тяговой сети, в том числе пропуск поездов по одному из путей двухпутного участка.

Блок вывода данных (рисунок 8) отвечает за анализ ключевых параметров системы тягового электроснабжения, таких как напряжение и ток на присоединениях контактной сети, напряжение на токоприемнике ЭПС и ток локомотива, спектральный состав тока и напряжения и дальнейший графический вывод информации. С помощью этого блока можно комплексно оценить изменение требуемых параметров и зависимостей в конкретный момент времени или за все время моделирования для дальнейшего анализа.

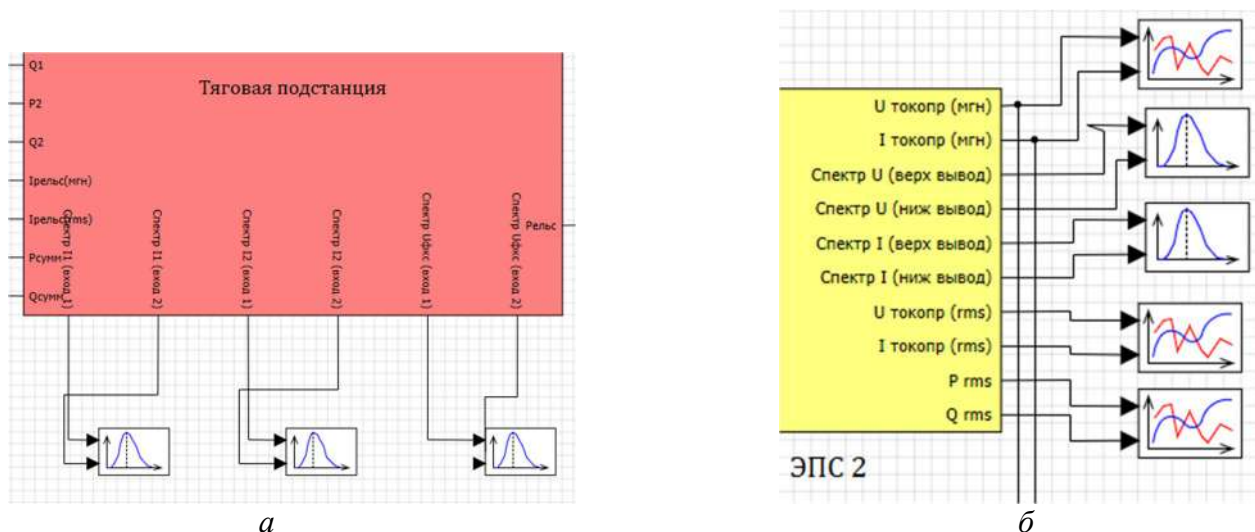


Рисунок 8 – Элементы блока вывода данных:

а – анализаторы спектра токов и напряжений присоединений контактной сети;

б – анализаторы действующих и мгновенных значений, спектрального состава тока и напряжения ЭПС

Кроме того, в разработанной модели имеется блок учета электроэнергии, который состоит из элементов приема сигналов датчиков, расположенных в сопряженных блоках, элементов вычисления активной и реактивной мощностей, пары интеграторов и перемножителей (элемент перемножителя необходим для приведения значения расхода электроэнергии из модельного к реальному). Блок расчета потерь электроэнергии формирует информацию о расходе и потерях электроэнергии в тяговой сети.

Для оценки работоспособности модели в программном комплексе SimInTech выполнено моделирование действующего участка перегона от ст. Карасук 3 до ст. Аксениха протяженностью 52,84 км (Западно-Сибирская железная дорога). В качестве ЭПС выбраны ВЛ85 с массой поезда 3988 т и ЭП1 1070 т соответственно. Одновременно на одной межподстанционной зоне находятся два поезда, которые передвигаются с начальным интервалом 8 мин.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

На рисунке 9 представлен фрагмент графика мгновенных значений тока и напряжения присоединения контактной сети.

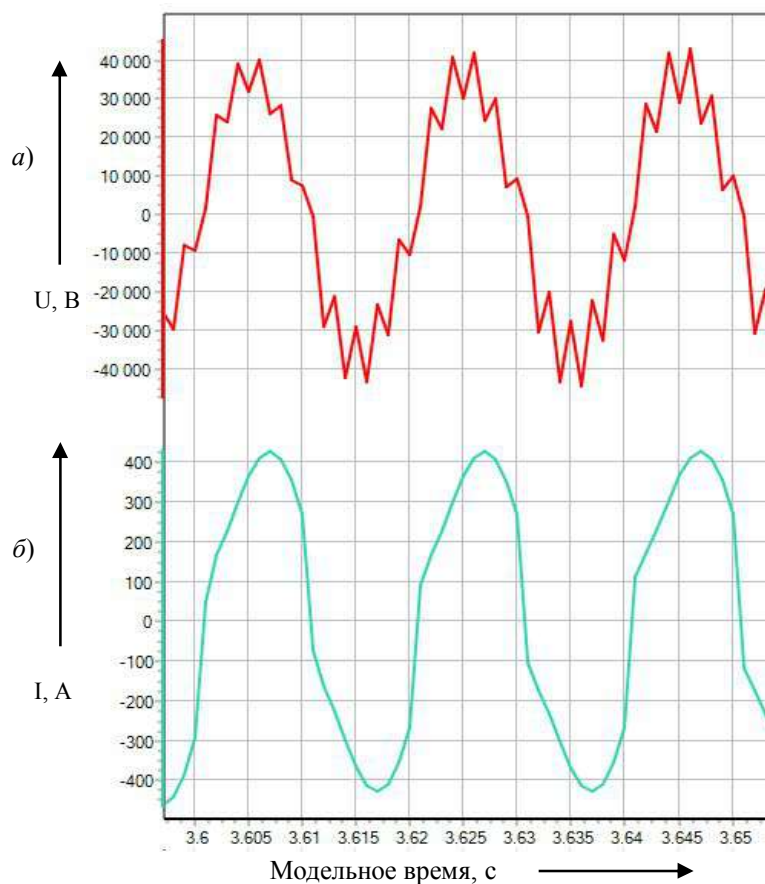


Рисунок 9 – График мгновенных значений напряжения (а) и тока (б)

Из графиков на рисунке 9 видно, что наблюдаются характерные искажения синусоидальности кривых тока и напряжения. На рисунке 10 представлен анализ спектрального состава напряжения присоединения контактной сети тяговой подстанции, из которого видно, что в спектре преобладают нечетные гармоники. Это хорошо согласуется с результатами известных исследований. На рисунке 11 можно наблюдать динамику изменения действующих значений тока и напряжения присоединения контактной сети тяговой подстанции. Имеют место характерные закономерности: при резком увеличении тягового тока наблюдаются просадки напряжения и наоборот.

Выполнена оценка точности модели путем сравнения ее результатов с данными, смоделированными в программном комплексе «КОРТЭС» (таблица).

Сравнение результатов моделирования в SimInTech и КОРТЭС

Параметр	Результаты моделирования в SimInTech, кВт · ч	Результаты моделирования в КОРТЭС, кВт · ч	Погрешность, %
Расход первого локомотива	1198,2	1208,6	0,85
Расход второго локомотива	2759,4	2774,2	0,53
Расход по присоединениям контактной сети с учетом потерь электроэнергии	4036,7	4085,3	1,18

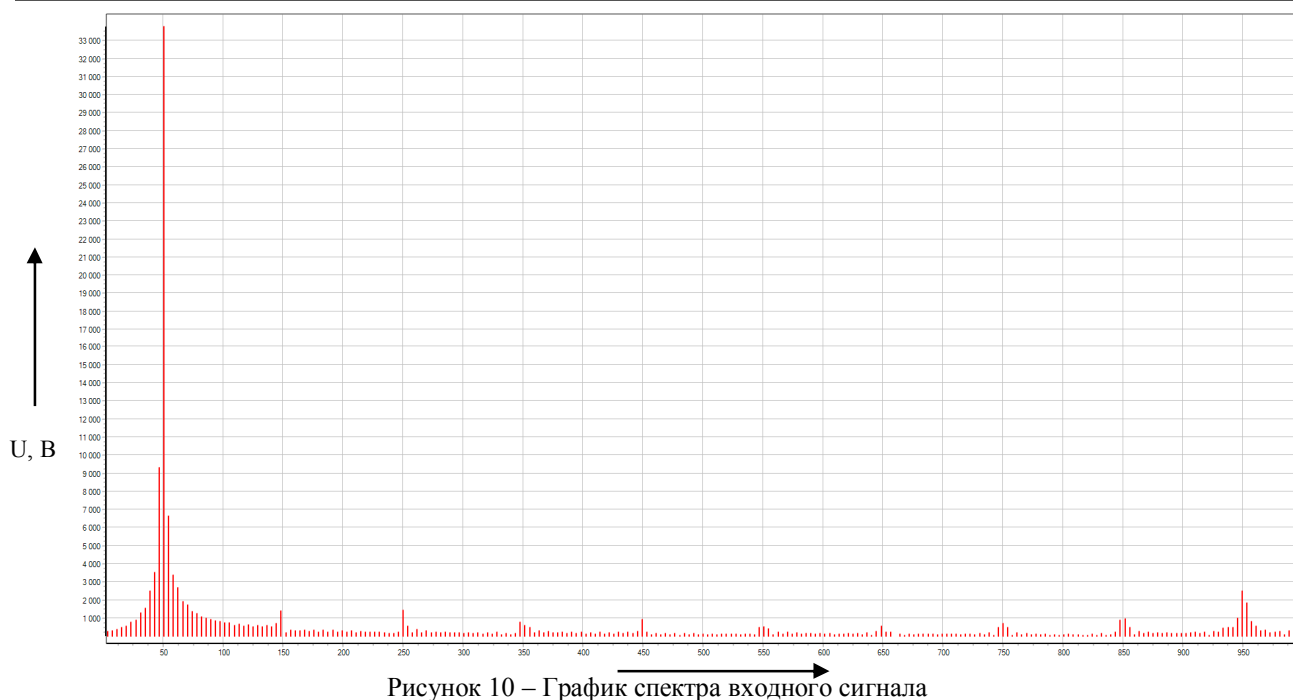


Рисунок 10 – График спектра входного сигнала

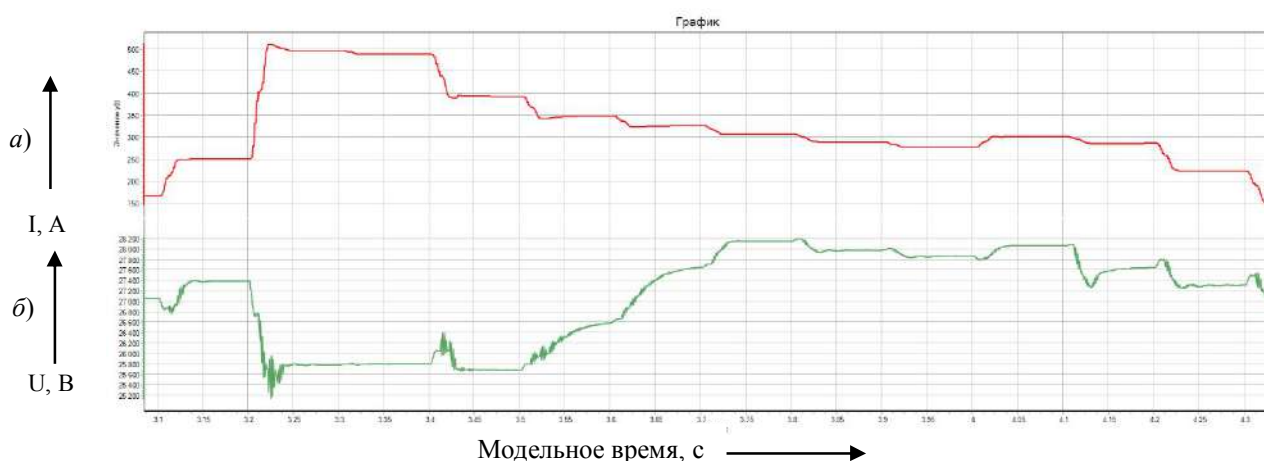


Рисунок 11 – График среднеквадратических значений тока (а) и напряжения (б)

Из данных в таблице видно, что сходимость результатов моделирования с данными КОРТЭС достаточно высока. Таким образом, разработанная модель демонстрирует удовлетворительную сходимость, верификация успешна.

Несмотря на хорошую сходимость результатов имитационного моделирования существует ряд недостатков модели: на данном этапе разработки используется один путь двухпутного расчетного участка, малое количество ЭПС, одновременно находящихся на межподстанционной зоне, нет совместных тяговых и электрических расчетов, что ограничивает универсальность программы.

В дальнейшем планируется поэтапное устранение данных недостатков, уменьшение вводной информации при формировании файла данных путем внедрения тягового расчета в модель совместно с базой данных параметров и характеристик электроподвижного состава, расширение расчетного участка пути за счет введения двухпутного движения, ускорение работы программы путем оптимизации.

В результате проведенного исследования разработана имитационная модель системы тягового электроснабжения в программе SimInTech, включающая в себя модели электроподвижного состава, тяговых подстанций, тяговой сети и различные блоки анализа энергетических показателей СТЭ. Разработан алгоритм, позволяющий учитывать

сопротивление элементов СТЭ при движении поездов по межподстанционной зоне, за счет чего реализована возможность исследования динамических процессов в тяговой сети. После получения результатов моделирования проведена верификация модели путем сравнения ее результатов с программным комплексом КОРТЭС. Результаты показывают, что расход по тяговым подстанциям в модели SimInTech составляет 4036,7 кВт·ч, а по данным КОРТЭС – 4085,3 кВт·ч. Расхождение составило 1,18 %, что доказывает работоспособность модели. В рамках дальнейших исследований предложенную модель предполагается использовать для разработки методики расчета потерь электроэнергии в тяговой сети при ее передаче электроподвижному составу и методики оценки влияния уравнивающих токов на потери электроэнергии.

Список литературы

1. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : Распоряжение Правительства Российской Федерации № 3363-р от 27 ноября 2021 // <https://mintrans.gov.ru> : сайт. – Текст : электронный. – URL : <https://mintrans.gov.ru/file/473193> (дата обращения: 19.03.2023).
2. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года : Распоряжение ОАО «РЖД» № 2537р от 14 декабря 2016 // <http://company.rzd.ru> : Текст : электронный. – URL : <https://company.rzd.ru/api/media/resources/1346066?action=download> (дата обращения: 19.04.2023).
3. Цифровые модели перспективных систем тягового электроснабжения повышенного напряжения / А. В. Крюков, А. В. Черепанов, А. Д. Степанов [и др.]. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 3 (71). – С. 83–91. – DOI 10.26731/1813-9108.2021.3(71).83-91. – EDN OFAEGA.
4. Крюков, А. В. Моделирование режимов систем тягового электроснабжения, оснащенных установками продольной компенсации / А. В. Крюков, М. А. Садохина, М. Л. Дмитриева. – Текст : непосредственный // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири : материалы всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Иркутск, 19 – 22 апреля 2022 года. – Иркутск : Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2022. – Том 1. – С. 170–178. – EDN JEILKX.
5. Анализ программного обеспечения для моделирования электрификации железных дорог / А. А. Королев, Д. С. Плетнев, М. Н. Белов [и др.]. – Текст : непосредственный // Наукосфера. – 2022. – № 1-1. – С. 175–181. – EDN ZHHNYU.
6. Bo Zhang, Yichen Ying, Qionglin Li, Chen Zheng. Traction load modeling considering multiple types of locomotives and analysis of its impact on power grid. *Electric Power Systems Research*, vol. 215, part B, 2023, 109008.
7. X. Yu. General Mathematical Model of AC Traction Power Supply System Simulation Based on Mathematical Reasoning and Its Application Research. *2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems (ICAIS)*, 2020, pp. 441-446.
8. Gang Zhang, Zhongbei Tian, Pietro Tricoli, Stuart Hillmanssen, Zhigang Liu. A new hybrid simulation integrating transient-state and steady-state models for the analysis of reversible DC traction power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 109, 2019, pp. 9-19.
9. Christian Dullinger, Walter Struckl, Martin Kozek. Simulation-based multi-objective system optimization of train traction systems. *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 72, 2017, pp. 104-117.
10. Нурпеисова, Г. Б. Имитационное моделирование участка тягового электроснабжения / Г. Б. Нурпеисова, Ж. Ж. Калиев, А. Б. Нургажанова. – Текст : непосредственный // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. – 2019. – № 4 (111). – С. 283–291. – EDN HXBJKA.

11. Андреев, В. В. Реализация в среде Matlab/Simulink имитационной модели системы электроснабжения с автотрансформаторной тяговой сетью 2×25 кВ на двухпутном участке электрифицированной железной дороги / В. В. Андреев. – Текст : непосредственный // Путь науки. – 2016. – № 8 (30). – С. 20–26. – EDN WHULMR.
12. Бардушко, В. Д. Способ моделирования перемещения электровозов в межподстанционной зоне средствами MATLAB / В. Д. Бардушко, В. А. Ушаков. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2014. – № 4 (20). – С. 10–18. – EDN TCEGOT.
13. Анализ волновых процессов в тяговой сети переменного тока на основе имитационного моделирования / Т. В. Ковалева, А. А. Комяков, О. О. Комякова, Н. В. Пашкова. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2022. – № 1 (72). – С. 80–85. – DOI 10.20291/1815-9400-2022-1-80-85. – EDN KCIPSY.
14. Бородай, И. Ю. Использование среды динамического моделирования SimInTech при моделировании / И. Ю. Бородай. – Текст : непосредственный // Гагаринские чтения-2018 : сборник тезисов докладов международной молодежной научной конференции, Москва – Ахтубинск – Байконур, 17 – 20 апреля 2018 года. – Москва – Ахтубинск – Байконур : Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2018. – Том 1. – С. 306. – EDN ORNEVF.

References

1. Transport strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035: Decree of the Government of the Russian Federation No. 3363-r dated November 27, 2021. Available at: <https://mintrans.gov.ru/file/473193> (accessed 19.03.2023) (In Russian).
2. Energy strategy of the Russian Railways Holding for the period up to 2020 and for the future up to 2030: Order of JSC «Russian Railways» No. 2537r dated December 14, 2016. Available at: <https://company.rzd.ru/api/media/resources/1346066?action=download> (accessed 19.04.2023) (In Russian).
3. Kryukov A.V., Cherepanov A.V., Stepanov A.D. and others. Digital models of advanced high-voltage traction power supply systems. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie. – Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2021, no. 3 (71), pp. 83-91, DOI 10.26731/1813-9108.2021.3(71).83-91, EDN OFAEGA (In Russian).
4. Kryukov A.V., Sadovina M.A., Dmitrieva M.L. Simulation of modes of traction power supply systems equipped with longitudinal compensation units. *Improving the efficiency of energy production and use in Siberia: materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation*. Irkutsk, 2022, vol. 1, pp. 170-178, EDN JEILKX (In Russian).
5. Korolev A.A., Pletnev D.S., Belov M.N. and others. Analysis of software for modeling railway electrification. *Naukosfera – Sciencosphere*, 2022, no. 1-1, pp. 175-181, EDN ZHHHYU (In Russian).
6. Bo Zhang, Yichen Ying, Qionglin Li, Chen Zheng. Traction load modeling considering multiple types of locomotives and analysis of its impact on power grid. *Electric Power Systems Research*, vol. 215, part B, 2023, 109008.
7. X. Yu. General Mathematical Model of AC Traction Power Supply System Simulation Based on Mathematical Reasoning and Its Application Research. *2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems (ICAIIIS)*, 2020, pp. 441-446.
8. Gang Zhang, Zhongbei Tian, Pietro Tricoli, Stuart Hillmanssen, Zhigang Liu. A new hybrid simulation integrating transient-state and steady-state models for the analysis of reversible DC traction power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 109, 2019, pp. 9-19.
9. Christian Dullinger, Walter Struckl, Martin Kozek. Simulation-based multi-objective system optimization of train traction systems. *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 72, 2017, pp. 104-117.

10. Nurpeisova G.B., Kaliev Zh.Zh., Nurgazhanova A.B. Simulation modeling of traction power supply section. *Vestnik Kazahskoj akademii transporta i kommunikacij im. M. Tynyshpaeva – Bulletin of the Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tynyshpayev*, 2019, no. 4 (111), pp. 283-291, EDN HXBJKA (In Russian).

11. Andreev V.V. Implementation in the Matlab/Simulink environment of a simulation model of an electric power supply system with an autotransformer traction network of 2×25 kV on a double-track section of an electrified railway. *Put' nauki. – The path of science*, 2016, no. 8 (30), pp. 20-26, EDN WHULMR (In Russian).

12. Bardushko V.D., Ushakov V.A. The method of simulating movement of locomotives in merptazinol zone by means of MATLAB. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2014, no. 4 (20), pp. 10-18, EDN TCEGOT (In Russian).

13. Kovaleva T.V., Komyakov A.A., Komyakova O.O., Pashkova N.V. Analysis of wave processes in the AC traction network based on simulation modeling. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2022, no. 1 (72), pp. 80-85, DOI 10.20291/1815-9400-2022-1-80-85, EDN KCIPSY (In Russian).

14. Borodaj I.Yu. Using the SimInTech dynamic Modeling environment in modeling. *Gagarin Readings-2018: collection of abstracts of the International Youth Scientific Conference*. Moscow – Akhtubinsk – Baikonur: Moscow Aviation Institute (National Research University), 2018, vol. 1, p. 306, EDN ORNEVF (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Комяков Александр Анатольевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7-904-322-89-05.

E-mail: tskom@mail.ru

Шкулов Андрей Иванович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7-923-695-46-13.

E-mail: shkulov.ai@gmail.com

Бартель Любовь Алексеевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Студентка, направление подготовки – 13.03.02 – «Электроэнергетика и электротехника», направленность (профиль) – «Электроэнергетические системы и сети».

Тел.: + 7-965-875-78-61.

E-mail: lubov.bartel@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Komyakov Aleksandr Anatol'evich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor Of Sciences in Engineering, docent, professor of the department «Theoretical electrical engineering», OSTU.

Phone: +7-904-322-89-05.

E-mail: tskom@mail.ru

Shkulov Andrey Ivanovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Postgraduate student of the department «Theoretical electrical engineering», OSTU.

Phone: +7-923-695-46-13.

E-mail: shkulov.ai@gmail.com

Bartel Lyubov Alekseevna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Student, field of study 13.03.02 Electric power industry and electrical engineering, focus (profile) «Electric power systems and networks».

Phone: + 7-965-875-78-61.

E-mail: lubov.bartel@gmail.com

Комяков, А. А. Имитационное моделирование динамических процессов в системе тягового электроснабжения / А. А. Комяков, А. И. Шкулов, Л. А. Бартель. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 2 (54). – С. 16 – 29.

Komyakov A.A., Shkulov A.I., Bartel L.A. Simulation modeling of dynamic processes in the traction power supply system. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 2 (54), pp. 16-29 (In Russian).

УДК 629.4.027.3

А. В. Харитонов

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

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СКОРОСТНОГО ЭЛЕКТРОПОЕЗДА И ЕЕ ВЕРИФИКАЦИЯ

Аннотация. Статья посвящена вопросу моделирования динамики скоростного электропоезда в программном комплексе «Универсальный механизм». При исследовании динамики подвижного состава ключевым фактором является точность полученных результатов. Точность в первую очередь определяется уровнем детализации рассматриваемой модели подвижного состава, однако это в свою очередь требует значительных вычислительных усилий. В последнее время сложные модели транспортного средства, включающие в себя более подробное рассмотрение процессов, происходящих в компонентах подвески с нелинейными характеристиками, являются предметом обширных исследований. Целью работы является разработка математической модели скоростного электропоезда, которая может быть использована для дальнейших исследований. Разработанная модель включает в себя нелинейные упругодиссипативные характеристики элементов связей экипажной части первичной и вторичной ступеней рессорного подвешивания. К данным элементам, например, относится пневматическая рессора, которая представляется в вертикальном направлении моделью Берга с частотно-зависимой характеристикой вертикальной динамической жесткости. Подтверждение адекватности разработанной модели проводилось в несколько этапов. На первом этапе определены собственные частоты колебаний динамической системы экипажа и исследовались свободные колебания с определением критической скорости движения. На втором этапе проведена верификация модели на основе данных комплексных испытаний электропоезда «Сапсан». В ходе численного исследования проведено сравнение показателей динамических качеств и воздействия на путь, полученных в ходе эксперимента и моделирования. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными, следовательно, разработанная модель отвечает требованиям точности и детализации. В связи с изложенным выше методология численного исследования и представленный в данной работе уровень детализации модели могут быть использованы при исследовании динамики скоростных электропоездов.

Ключевые слова: скоростной электропоезд, имитационная 3D-модель, динамическое моделирование, показатели динамических качеств, нелинейные характеристики, универсальный механизм.

Anton V. Kharitonov

Design and Technological Bureau for Rationing – branch of RZD «Russian Railways»,
Moscow, the Russian Federation

DYNAMIC MODEL OF A HIGH-SPEED ELECTRIC TRAIN AND ITS VERIFICATION

Abstract. The article is devoted to the issue of modeling the dynamics of a high-speed electric train in the «Universal Mechanism» software package. When studying the dynamics of rolling stock, the key factor is the accuracy of the results obtained. Accuracy is primarily determined by the level of detail of the rolling stock model under consideration, but this in turn requires significant computational effort. Recently, complex vehicle models, which include a more detailed consideration of the processes occurring in suspension components with nonlinear characteristics, have been the subject of extensive research. The aim of the work is to develop a mathematical model of a high-speed electric train, which can be used for further research. The developed model includes nonlinear elastic-dissipative characteristics of the coupling elements of the crew part of the primary and secondary stages of spring suspension. These elements, for example, include

a pneumatic spring, which is represented in the vertical direction by a Berg model with a frequency-dependent characteristic of vertical dynamic stiffness. Confirmation of the adequacy of the developed model was carried out in several stages. At the first stage, the natural oscillation frequencies of the dynamic system of the crew were determined, free oscillations were investigated with the determination of the critical speed of movement. At the second stage, the model was verified based on the data of complex tests of the Sapsan electric train. In the course of the numerical study, the indicators of dynamic qualities and the impact on the path obtained during the experiment and modeling were compared. The simulation results are in good agreement with experimental data, therefore, the developed model meets the requirements of accuracy and detail. In connection with the above, the methodology of numerical research and the level of detail of the model presented in this paper can be used to study the dynamics of high-speed electric trains.

Keywords: *high-speed electric train, 3D-simulation model, dynamic modeling, indicators of dynamic qualities, nonlinear characteristics.*

В соответствии со стратегией развития железнодорожного транспорта до 2030 г. [1] основными направлениями развития железных дорог являются возрастание мобильности населения и, как следствие, рост скоростей движения, оптимизация и увеличение товародвижения, оптимизация расходов на эксплуатацию подвижного состава и инфраструктуры, а также повышение комфорта пассажиров во время движения. Эти факторы обеспечивают конкурентоспособность железнодорожного транспорта по отношению к другим видам транспорта. С этой целью в 2015 г. начато проектирование первой в России высокоскоростной магистрали (ВСМ) Москва – Казань. Одновременно с этим утверждено техническое задание на первый российский высокоскоростной электропоезд, рассчитанный на максимальную скорость движения 360 км/ч, а в 2020 г. утверждено техническое задание на поезд для высокоскоростной магистрали Москва – Санкт-Петербург.

Для реализации этих направлений развития необходимо выполнить большой комплекс исследований, включающих в себя исследования динамики подвижного состава и его взаимодействия с железнодорожным полотном. С целью решения этих задач применяют математическое моделирование, т. е. создание программ и алгоритмов, моделирующих движение рельсовых экипажей по железнодорожному пути, соответствующее их реальному движению. Математические модели позволяют сократить время на создание и доработку новых типов рельсовых экипажей.

Модель динамики системы транспортного средства представляет собой многотельную систему, состоящую из твердых и (или) гибких тел, которые связаны друг с другом различными ограничениями и силами. При анализе динамики транспортного средства основные компоненты динамической системы, такие как кузов, рама тележки и колесные пары, можно рассматривать как твердые тела, поскольку они имеют более высокую жесткость, чем жесткости связей между ними. Таким образом, их деформации игнорируются.

В настоящее время для исследования динамики систем тел с учетом их упругости или в твердотельной постановке существует множество программных комплексов. Данные программные комплексы могут быть как универсальными, так и специализированными, которые предназначены исключительно для исследований динамики рельсовых экипажей. Универсальные комплексы могут включать в себя также специальные модули для создания и численного моделирования динамики подвижного состава. К зарубежным программам можно отнести MSC. Adams, SIMPACK, MEDYNA, LS-DYNA, VAMPIRE и VI-Rail. К отечественным программным комплексам относится «Универсальный механизм», разработанный специалистами Брянского государственного технического университета.

Таким образом, для исследования динамики скоростного электропоезда разработана модель горизонтальных и вертикальных колебаний его механической части в программном комплексе «Универсальный механизм» (УМ) [2] в соответствии с кинематической схемой экипажа, представленной на рисунках 1 и 2.

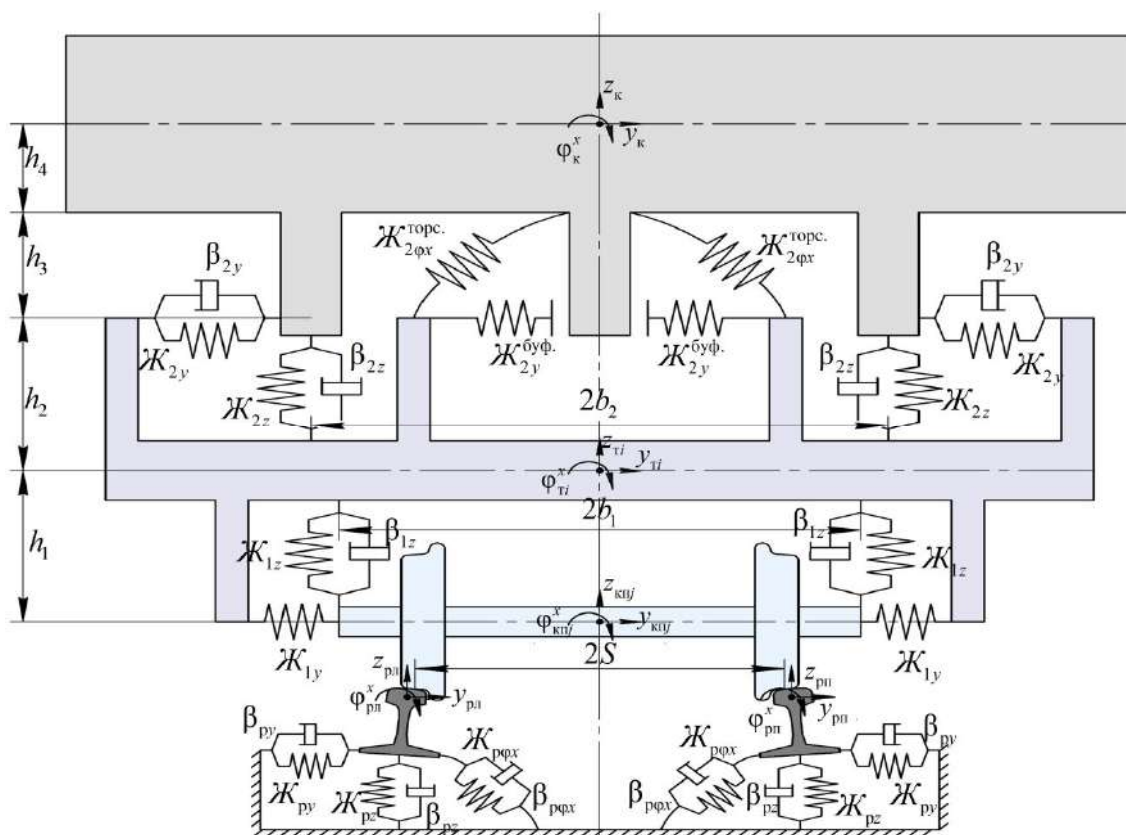


Рисунок 1 – Кинематическая схема, поясняющая связи между элементами экипажной части вагона электропоезда (вид спереди)

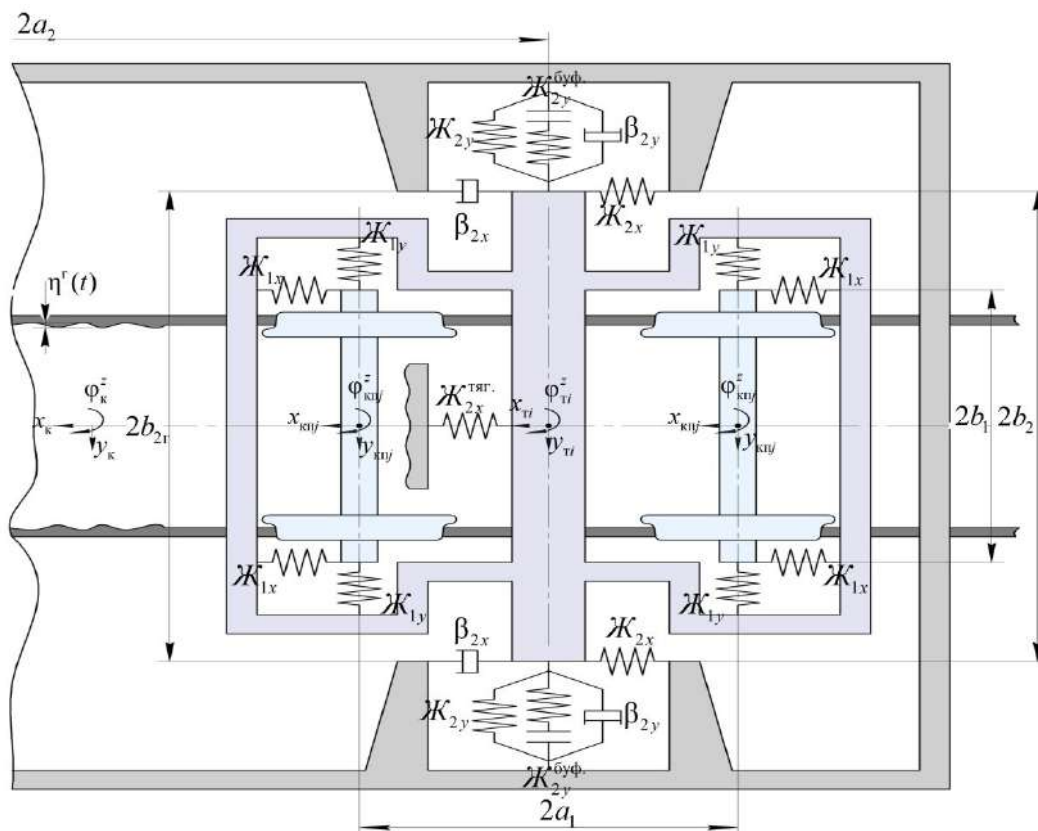


Рисунок 2 – Кинематическая схема, поясняющая связи между элементами экипажной части вагона электропоезда (вид сверху)

На рисунках 1, 2 обозначено: K_{1z} – вертикальная жесткость связи 1-й ступени подвешивания; K_{1x} – продольная жесткость связи 1-й ступени подвешивания; K_{1y} – поперечная жесткость связи 1-й ступени подвешивания; K_{2z} – вертикальная жесткость связи 2-й ступени подвешивания; K_{2x} – продольная жесткость связи 2-й ступени подвешивания; K_{2y} – поперечная жесткость связи 2-й ступени подвешивания; $K_{2y}^{\text{буф}}$ – жесткость поперечного буфера 2-й ступени подвешивания; $K_{2x}^{\text{тяги}}$ – продольная жесткость устройства передачи силы тяги 2-й ступени; $K_{2\phi}^{\text{торс}}$ – угловая жесткость торсиона; β_{1z} – коэффициент демпфирования вертикального гасителя 1-й ступени подвешивания; β_{2z} – коэффициент демпфирования вертикального гасителя 1-й ступени подвешивания; β_{2x} – коэффициент демпфирования гасителя виляния; β_{2y} – коэффициент демпфирования поперечного гасителя 2-й ступени; h_1 – расстояние от центра оси колесной пары до центра рамы тележки по вертикали; h_2 – расстояние от центра рамы тележки до центра оси связей рамы тележки и рамы кузова по вертикали; h_3 – расстояние от центра оси связей рамы тележки и рамы кузова до нижней части кузова по вертикали; h_4 – расстояние от нижней части кузова до центра кузова по вертикали; $2a_1$ – база тележки; $2a_2$ – база кузова; $2b_1$ – поперечная база тележки; $2b_2$ – поперечная база кузова; $2b_{2r}$ – расстояние между креплениями гасителей виляния в поперечном направлении; $2S$ – расстояние между кругами катания колес колесной пары; δ – зазор между рельсом и гребнем колеса колесной пары до гребневого контакта; $\eta^r(t)$ – функции горизонтальной и вертикальной неровности рельса соответственно; K_{pz} – вертикальная жесткость дискретного пути; K_{py} – поперечная жесткость дискретного пути; $K_{p\phi x}$ – жесткость креплений на кручение рельса вокруг оси X ; β_{pz} – коэффициент демпфирования дискретного пути по оси Z ; β_{py} – коэффициент демпфирования дискретного пути по оси Y ; $\beta_{p\phi x}$ – коэффициент демпфирования креплений на кручение рельса вокруг оси X ; z_k , z_{ti} и $z_{k,пj}$ – вертикальные перемещения кузова, рамы i тележки и j колесной пары соответственно; x_k , x_{ti} и $x_{k,пj}$ – продольные перемещения кузова, рамы i тележки и колесной пары j соответственно; y_k , y_{ti} и $y_{k,пj}$ – поперечные перемещения кузова, рамы i тележки и колесной пары j соответственно; φ_k^z , φ_{ti}^z и $\varphi_{k,пj}^z$ – угловые перемещения кузова, рамы i тележки и колесной пары j соответственно вокруг оси Z ; φ_k^x , φ_{ti}^x и $\varphi_{k,пj}^x$ – угловые перемещения кузова, рамы i тележки и колесной пары j соответственно вокруг оси X ; $y_{pл(n)}$, $z_{pл(n)}$ и $\varphi_{pл(n)}^x$ – поперечные, вертикальные и вокруг оси X перемещения левого (правого) рельса соответственно.

При разработке этой кинематической схемы были приняты следующие допущения: элементы экипажной части рассматриваются как абсолютно твердые тела в связи с тем, что их жесткости значительно выше жесткостей соединяющих их упругих элементов; центры масс указанных твердых тел совпадают с их геометрическими центрами; величины жесткости и коэффициентов затухания приняты одинаковыми для соответствующих элементов рессорного подвешивания моторных, немоторных тележек и колесных пар; упругие и диссипативные силы действуют по оси соответствующего упругого и диссипативного элемента.

В качестве прототипа электропоезда были приняты значения массовых, инерционных, упругодиссипативных параметров, а также пространственные координаты расположения силовых элементов модели экипажной части [3] согласно конструкции тележки SF-520 и кузовов вагонов электропоезда ЭВС «Сапсан» с профилем колес ВНИИЖТ-РМ-70 [4, 5] и рельса марки Р65.

Рессорное подвешивание 1-й ступени электропоезда включает в себя комплект цилиндрических пружин, работающих в основном на сжатие, которые опираются на резинометаллический амортизатор. Для обеспечения прогрессивной характеристики 1-й ступени и ограничения вертикального хода подвески конструкция включает в себя упругие упоры. В УМ комплект из двух цилиндрических пружин моделируется билинейным силовым

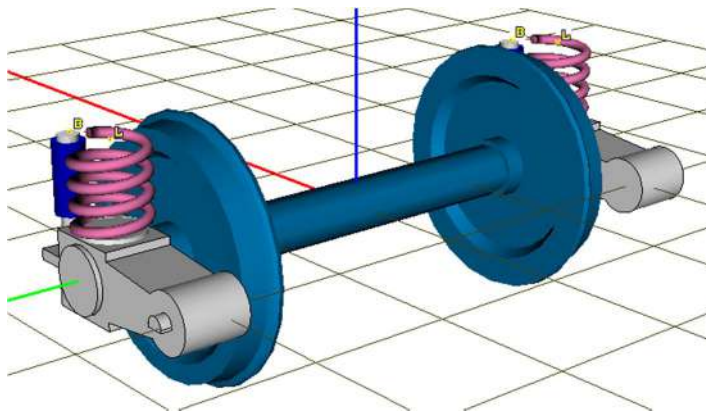
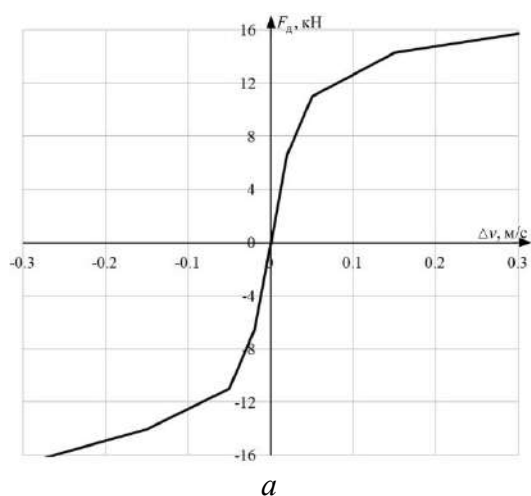


Рисунок 3 – Подсистема 1-й ступени рессорного подвешивания электропоезда «Сапсан» в УМ

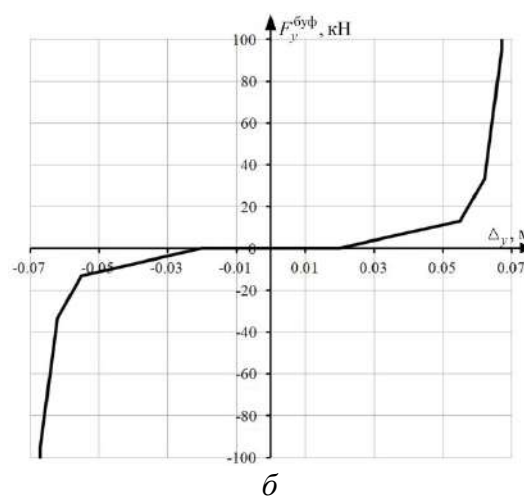
элементом с заданием матриц жесткостей внешней и внутренней пружин. К комплекту пружин приложена стационарная сила, соответствующая статической нагрузке от веса вагона поезда. Упругий упор моделируется с помощью элемента типа «сайлентблок» с поточечным заданием нелинейной характеристики упора. Корпус буксы в УМ моделируется абсолютно твердым телом, связанным с осью колесных пар обобщенным шарниром – включающим в себя вращательную степень свободы по оси Y .

В соответствии с рекомендациями в источнике [2] связь буксового поводка и рамы тележки в УМ моделируется линейным силовым элементом с заданием матрицы жесткостей, с учетом осевой, радиальной жесткостей, жесткости на изгиб и кручение сайлентблока поводка. Для моделирования ограничителя хода буксового сайлентблока ± 8 мм по осям X и Y вводился дополнительно элемент типа «сайлентблок», в котором описывается силовая характеристика работы ограничителя. Подсистема 1-й ступени рессорного подвешивания электропоезда ЭВС «Сапсан» в УМ представлена на рисунке 3.

Общепринятый подход в моделировании гидравлических гасителей колебаний подвижного состава предполагает линейную зависимость реакции гасителя от скорости деформации [6]. Однако для предотвращения деформаций элементов гасителя от воздействия на них ударных нагрузок в поршневую систему встраивают предохранительные клапаны для экстренного перепуска жидкости. Открытие клапанов настроено на определенную скорость перемещения поршня. Таким образом, силовая характеристика гидравлического гасителя колебаний приобретает нелинейный характер. В УМ гидравлические гасители моделируются биполярными силовыми элементами с поточечным вводом нелинейных силовых характеристик (рисунок 4, а).



а



б

Рисунок 4 – Силовая характеристика гасителя виляния (а) и силовая характеристика поперечных упорных буферов 2-й ступени (б)

Для ограничения поперечных перемещений кузова во 2-й ступени применены два симметрично расположенных упорных резиновых буфера с нелинейной характеристикой сжатия (рисунок 4, б).

Вторичная ступень рессорного подвешивания электропоезда «Сапсан» образована двумя пневморессорами диафрагменного типа с дополнительным воздушным резервуаром. Для моделирования пневматической подвески в вертикальном направлении выбрана модель Берга [7]. Пневмоэлементы, применяемые на подвижном составе, имеют такую конструкцию, что при их деформации эффективная площадь пневморессоры меняется незначительно [6]. В связи с этим изменение жесткости рессоры от данного явления в модели не учтено. При этом система уравнений, описывающих работу данной модели, имеет вид:

$$\begin{cases} m\ddot{w} = \mathcal{K}_2(z - w) - \beta \cdot \dot{w}^2 \operatorname{sign}(\dot{w}); \\ F_z = (P_0 - P_a)A_e + \mathcal{K}_1 z + \mathcal{K}_2(z - w), \end{cases} \quad (1)$$

где m – масса воздуха в главном и дополнительном объемах, кг; $\mathcal{K}_1$ – основная вертикальная жесткость пневморессоры, кН/м; $\mathcal{K}_2$ – жесткость, учитывающая сжимаемость воздуха в дополнительном резервуаре, кН/м; β – эквивалентное демпфирование пневморессоры, кНс/м; P_0 – рабочее давление в пневморессоре, кН/м²; P_a – атмосферное давление, кН/м²; A_e – эффективная площадь пневморессоры, м²; w – вертикальное перемещение массы воздуха в пневморессоре, м; z – вертикальная деформация пневморессоры, м. Параметры, входящие в систему уравнений (1), вычисляются согласно методике, изложенной в источниках [2, 7].

В процессе подбора параметров пневморессоры, применяемой на электропоезде «Сапсан», исследована модель Берга в УМ. Динамическая жесткость пневморессоры при $F_{\text{зст}} = 100$ кН представлена на рисунке 5, а.

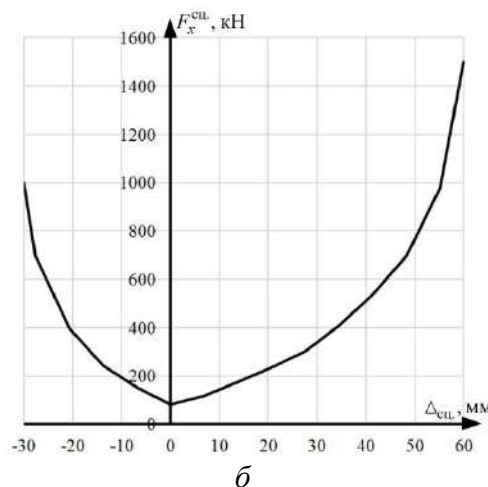
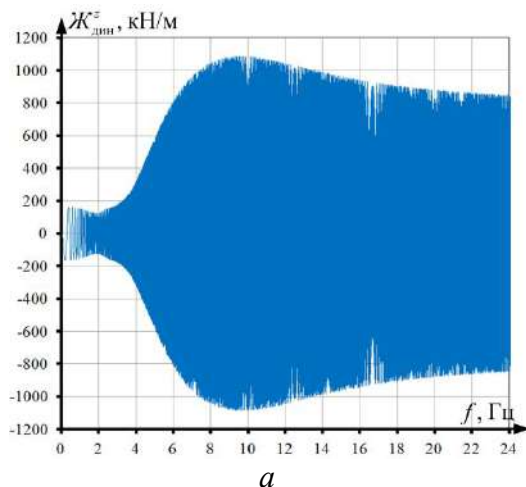


Рисунок 5 – Динамическая жесткость пневморессоры по модели Берга (а) и силовая характеристика межвагонной сцепки (б)

Все вагоны электропоезда «Сапсан» соединены между собой неавтоматическими короткими сцепками, нелинейная характеристика растяжения-сжатия которых приведена на рисунке 5, б. В УМ рама тележки образована абсолютно твердым телом, которое вводится в модель шарниром с шестью степенями свободы. С рамой тележки связаны силовые элементы 1-й и 2-й ступеней рессорного подвешивания. Аналогично в модель вводятся траверсы тележки и кузовов. Для имитации болтовых соединений при жестком скреплении траверсы тележки с кузовом используются фиктивные элементы типа «сайлентблок» с жесткостью порядка 10^6 – 10^8 Н/м. Тяговые и тормозные усилия во 2-й ступени подвешивания от рамы тележки на траверсу (кузов) передаются через два симметрично расположенных тяговых поводка. Поводки моделируются абсолютно твердыми телами и вводятся в систему шарниром с

шестью степенями свободы относительно рамы тележки. Упругие связи поводков с траверсой и рамой тележки моделируются элементом типа «сайлентблок».

Система стабилизации поперечного наклона кузова состоит из торсионного вала с жестко посаженными на него рычагами и опорными втулками с сайлентблоками, через которые он монтируется к траверсе. Рычаги соединяются с рамой тележки через вертикальные поводки. Все перечисленные выше элементы системы стабилизации наклона кузова моделируются в УМ абсолютно жесткими телами (рисунок 6). Вертикальные поводки связаны с рамой тележки посредством сферического шарнира, который образован шарниром с шестью степенями свободы с отключенными поступательными степенями. С рычагами торсиона поводки связаны угловым шарниром с двумя вращательными степенями свободы по осям X и Y . Рычаг торсиона связан с валом торсиона с помощью шарнира вращения. Угловая жесткость вращения между телами торсионного вала и рычагами торсиона задается с помощью линейного силового элемента. Для обеспечения свободного вращения вала торсиона относительно внутренней обоймы сайлентблока вал связан с фиктивными телами вращательными шарнирами, которые, в свою очередь, жестко крепятся к траверсе с помощью элементов типа «сайлентблок». Жесткость торсиона на скручивание рассчитывалась по формуле [6]

$$Ж_{\text{торс}}^{\varphi_y} = \frac{GI_p}{L}, \quad (2)$$

где G – модуль сдвига стали торсиона; I_p – полярный момент инерции поперечного сечения вала торсиона, м^4 ; L – длина вала торсиона, м.

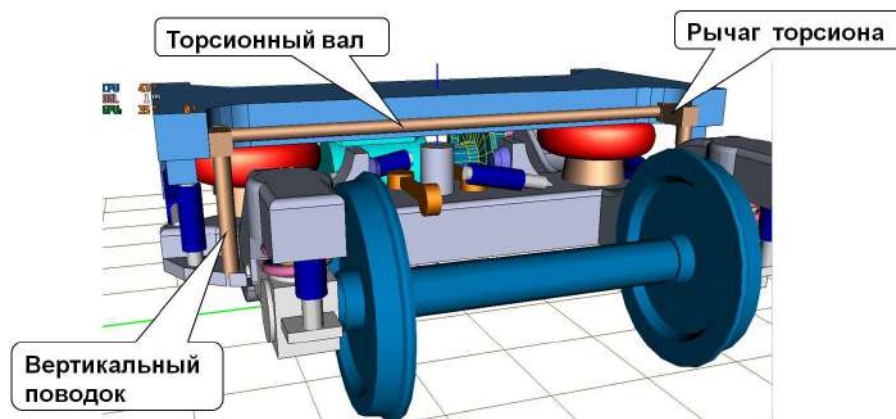


Рисунок 6 – Модель 2-й ступени рессорного подвешивания и системы стабилизации наклона кузова в УМ

Так как акцент исследований в данной работе сделан на исследовании динамики подвижного состава и на увеличении быстродействия численного решения, в качестве модели пути была выбрана модель «инерционный рельс», реализованная в УМ. При этом правый и левый рельсы задаются под каждое колесо колесной пары шарнирами с шестью степенями как абсолютно твердые тела, в которых выключены поступательная степень свободы по оси X и вращательные относительно осей Y и Z . Упругодиссипативные свойства основания пути и рельсовых креплений моделируются силовым элементом типа «сайлентблок». Горизонтальная и вертикальная неровности рельсового пути задавались по методике, основанной на разложении Райса – Пирсона и изложенной в работе [8], с использованием аналитических выражений спектральной плотности мощности неровностей.

На моторных тележках электропоездов платформы «Velaro», в том числе на электропоезде «Сапсан», оба тяговых двигателя (ТЭД) жестко опираются на поддон, который упруго связан с рамой тележки в поперечном направлении посредством четырех листовых рессор [3]. Поперечные демпферы поддона служат для успокоения горизонтальных колебаний поддона с ТЭД.

В УМ элементы подвешивания поддона с ТЭД на раму тележки моделировались силовыми элементами типа «сайлентблок» с заданием соответствующих жесткостей по осям X , Y , Z . Помимо этого для ограничения поперечных перемещений ТЭД в поперечном направлении моделируется нелинейная характеристика буфера с запасом свободного хода поддона с ТЭД ± 7 мм.

Статор ТЭД вводится в систему обобщенным шарниром типа «постоянный сдвиг» относительно поддона. Ротор ТЭД связан со статором шарниром вращения по оси Y . Для моделирования вращения ротора задавался шарнирный момент в виде поточечной функции в зависимости от текущей скорости поезда.

Зубчатая муфта состоит из двух полумуфт. Первая полумуфта связана с ротором ТЭД обобщенным шарниром «постоянный сдвиг», вторая полумуфта аналогично связана с шестерней ТЭД. Две полумуфты связаны между собой с помощью элемента типа «сайлентблок», в котором учтены ее нелинейные упругодиссипативные свойства. Корпус редуктора связан с осью колесной пары и шестерней ТЭД шарнирами вращения по оси Y , что обеспечивает свободное вращение шестерни и колесной пары. Поперечные гасители колебаний поддона моделируются биполярными силовыми элементами. Разработанная модель моторной тележки электропоезда «Сапсан» представлена на рисунке 7.

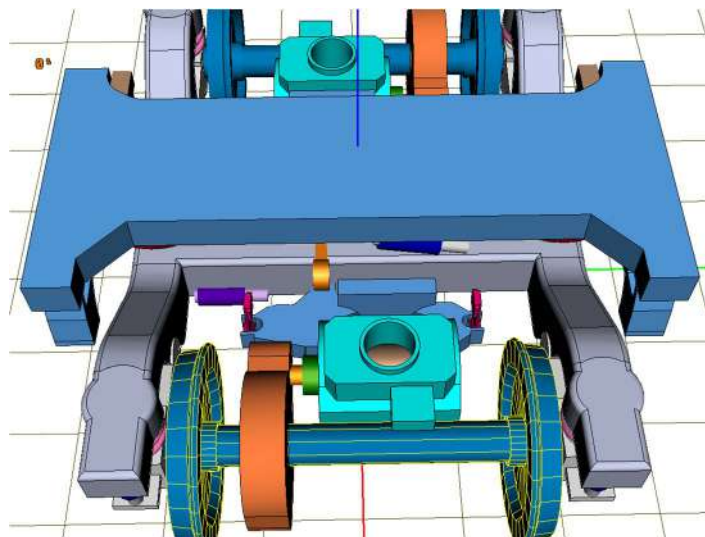


Рисунок 7 – Модель моторной тележки электропоезда ЭВС «Сапсан» в УМ

Модель электропоезда (рисунок 8) включает в себя два сцепленных вагона: головной моторный SR В 01 и прицепной промежуточный DR Т 02.



Рисунок 8 – Общий вид модели электропоезда в УМ

На первом этапе проверки адекватности модели исследовались свободные колебания. Задачей исследования свободных колебаний является проверка правильности работы модели

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

и синтеза дифференциальных уравнений в УМ, описывающих колебания данной системы, определение собственных, резонансных частот, а также критической скорости движения. Собственные частоты колебаний определялись в УМ с использованием инструмента «Статический и линейный анализ», раздел «частоты/корни» – с помощью QR-алгоритма. Для распределения частот по обобщенным координатам предварительно были рассчитаны парциальные частоты динамической системы экипажа. Собственные и парциальные частоты колебаний масс кузова, рамы тележки, поддона с ТЭД и колесной пары приведены в таблице.

Собственные и парциальные частоты колебаний исследуемых масс экипажной части линеаризованной системы

Масса	Перемещение по оси Y	Угловое перемещение вокруг оси Z	Перемещение по оси X	Угловое перемещение вокруг оси X	Перемещение по оси Z	Угловое перемещение вокруг оси Y
Кузов	0,576 Гц/ 0,535 Гц	0,625 Гц/ 0,672 Гц	2,300 Гц/ 2,424 Гц	0,234 Гц/ 0,374 Гц	0,573 Гц/ 0,612 Гц	0,700 Гц/ 0,847 Гц
Рама тележки	13,487 Гц/ 13,454 Гц	35,702 Гц/ 35,678 Гц	44,861 Гц/ 44,494 Гц	6,960 Гц/ 7,960 Гц	8,170 Гц/ 9,065 Гц	10,012 Гц/ 9,406 Гц
Поддон с ТЭД	1,179 Гц/ 1,196 Гц	4,034 Гц/ 4,089 Гц	17,558 Гц/ 17,744 Гц	16,871 Гц/ 18,581 Гц	14,674 Гц/ 19,657 Гц	4,130 Гц/ 4,945 Гц
Колесная пара	11,443 Гц/ 11,558 Гц	50,533 Гц/ 55,819 Гц	37,900 Гц/ 37,985 Гц	37,534 Гц/ 39,134 Гц	33,443 Гц/ 34,675 Гц	–

Примечание: в числителе приведена собственная частота, в знаменателе – парциальная частота.

Для расчета критической скорости экипажа использовался модуль «Многовариантные расчеты», реализованный в УМ. При этом задаются выборка исследуемых скоростей движения и контролируемые переменные – поперечные перемещения колесных пар. В результате расчета строится зависимость числовой характеристики случайных колебаний от скорости движения. В качестве числовой характеристики случайных колебаний выбрано среднеквадратическое отклонение (СКО) поперечных перемещений колесных пар. На каждом шаге по скорости движения время моделирования составляло 30 с с шагом по времени 0,005 с. Критическая скорость оценивается в точке, соответствующей резкому росту СКО. Зависимость СКО от скорости движения приведена на рисунке 9.

Согласно данным таблицы значения собственных частот колебаний хорошо согласуются с парциальными частотами, вследствие этого жесткости связей элементов экипажной части соответствуют принятым параметрам модели.

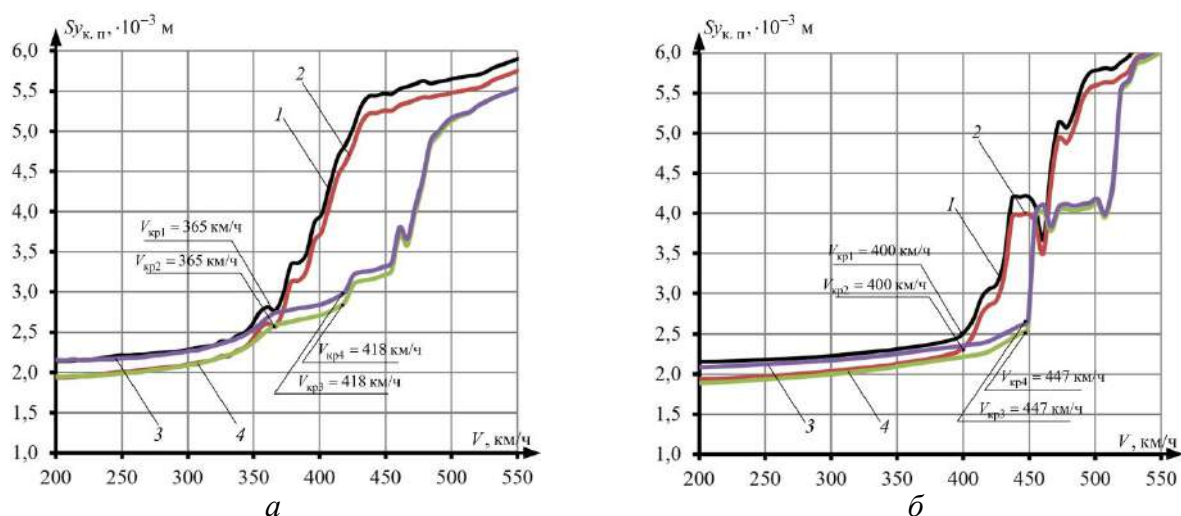


Рисунок 9 – Результаты исследования устойчивости движения моторного вагона (а) и прицепного вагона (б):
1 – первая колесная пара; 2 – вторая колесная пара; 3 – третья колесная пара; 4 – четвертая колесная пара

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Согласно рисунку 7 при анализе СКО колебаний относительных колесных пар вагонов наименьшее значение критической скорости зафиксировано по первой колесной паре моторного вагона и составило 365 км/ч.

На втором этапе верификации модели исследовались вынужденные колебания вагонов электропоезда – головного моторного SR В 01 и прицепного DR Т 02. Полученные результаты были сопоставлены с результатами комплексных испытаний электропоезда «Сапсан» [9, 10]. Комплексные испытания проводились ВНИИЖТом при движении электропоезда по прямому участку пути и круговой кривой (радиус – 4126 м, возвышение наружного рельса – 83 мм) со скоростями до 275 км/ч.

В качестве исследуемых величин были выбраны следующие динамические характеристики: рамная сила H_p , кН, коэффициент вертикальной динамики буксовой ступени рессорного подвешивания $K_{д.б}$, ускорения кузова вертикальное $\ddot{z}_k$, м/с², и поперечное $\ddot{y}_k$, м/с², максимальная величина суммарной боковой силы воздействия на рельс Y_6 , кН.

По каждому случайному процессу исследуемых величин определялось среднее значение абсолютных максимумов по приближенной формуле В. В. Болотина [6]:

$$\bar{H}_{a_j} \cong \bar{M}_q + S_{x_q} \left(\sqrt{2 \ln(f_{e_q} \cdot t_k)} + 1 / \sqrt{2 \ln(f_{e_q} \cdot t_k)} \right), \quad (3)$$

где $\bar{M}_q$ – математическое ожидание случайной величины; S_{x_q} – среднеквадратическое отклонение случайной величины; f_{e_q} – эффективная частота случайного процесса, Гц; t_k – конечное время расчета, с.

По результатам анализа исследуемых характеристик по каждой колесной паре и тележкам выбиралась максимальная величина среднего значения абсолютных максимумов. Численное моделирование осуществлялось в диапазоне скоростей от 200 до 275 км/ч с шагом по скорости движения 12,5 км/ч. В качестве метода численного интегрирования выбран метод «Park Parallel» [2], отличающийся высоким быстродействием за счет многопоточности расчетов.

Сравнение экспериментальных данных [9, 10] и данных, полученных по результатам численного моделирования, приведено на рисунках 10 – 14.

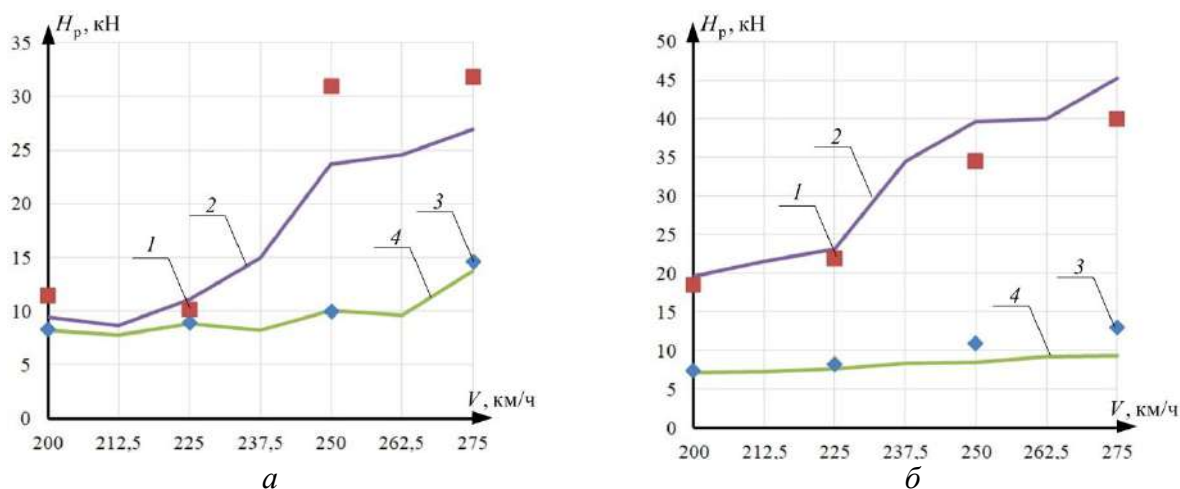


Рисунок 10 – Зависимости рамной силы вагона SR В 01 (а) и вагона DR Т 02 (б) от скорости движения:
1 – эксперимент, движение в кривой; 2 – модель, движение в кривой; 3 – эксперимент, движение по прямой;
4 – модель, движение по прямой

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

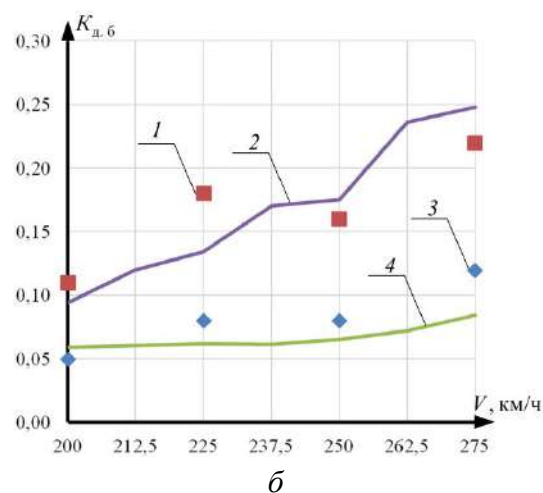
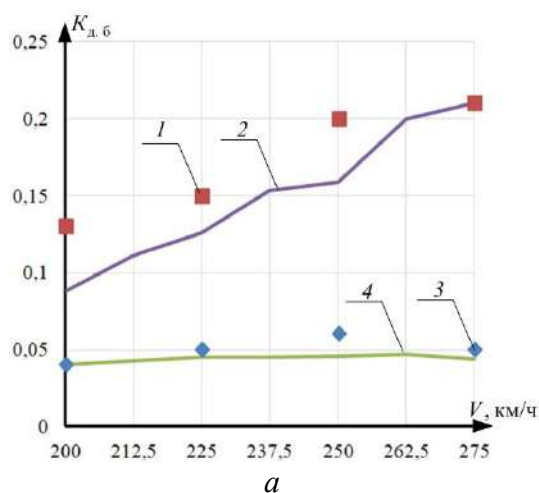


Рисунок 11 – Зависимости коэффициента динамики 1-й ступени вагона SR B 01 (а) и вагона DR T 02 (б) от скорости движения: 1 – эксперимент, движение в кривой; 2 – модель, движение в кривой; 3 – эксперимент, движение по прямой; 4 – модель, движение по прямой

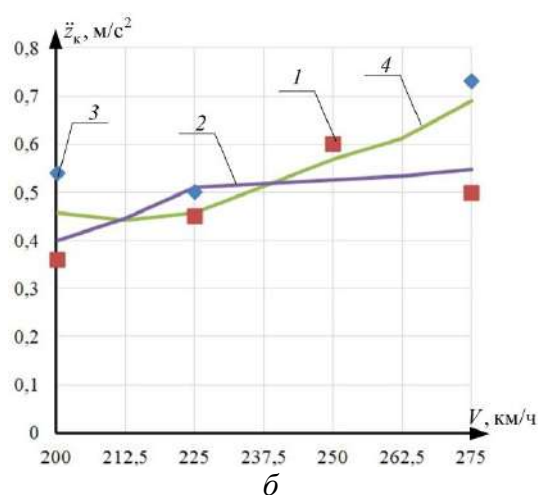
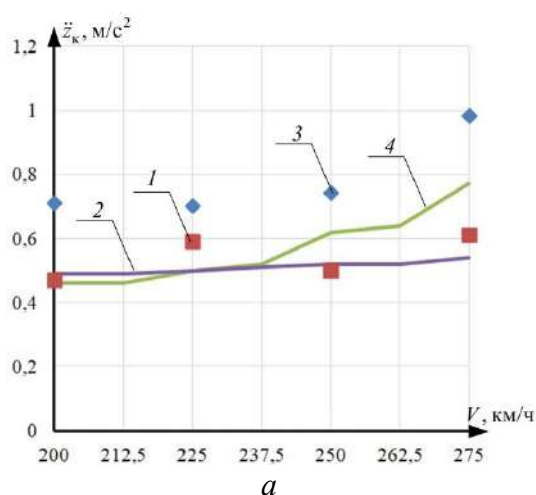


Рисунок 12 – Зависимости вертикального ускорения кузова вагона SR B 01 (а) и вагона DR T 02 (б) от скорости движения: 1 – эксперимент, движение в кривой; 2 – модель, движение в кривой; 3 – эксперимент, движение по прямой; 4 – модель, движение по прямой

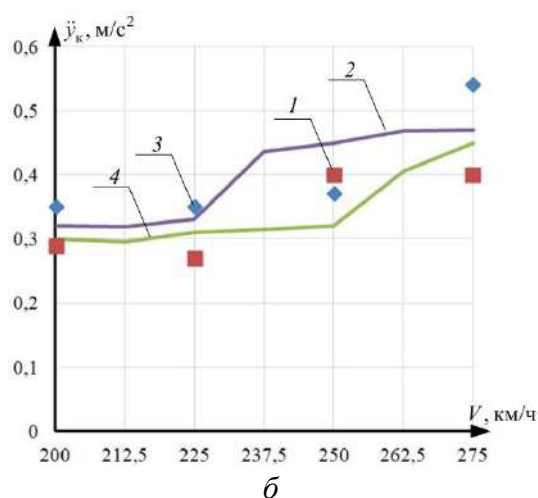
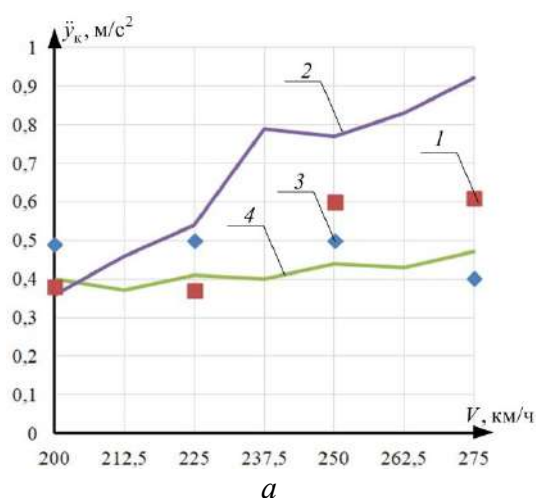


Рисунок 13 – Зависимости поперечного ускорения кузова вагона SR B 01 (а) и вагона DR T 02 (б) от скорости движения: 1 – эксперимент, движение в кривой; 2 – модель, движение в кривой; 3 – эксперимент, движение по прямой; 4 – модель, движение по прямой

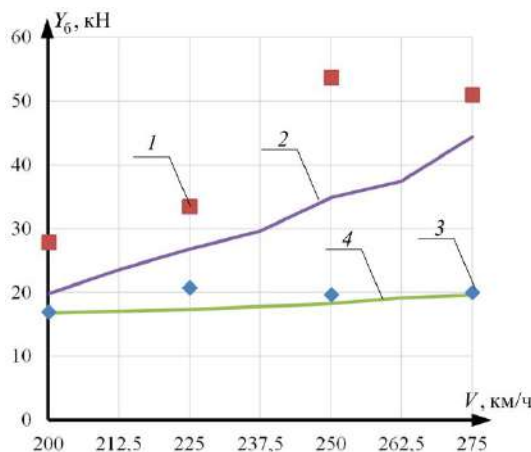


Рисунок 14 – Зависимость наибольшего значения суммарной боковой силы от скорости движения:
1 – эксперимент, движение в кривой; 2 – модель, движение в кривой; 3 – эксперимент, движение по прямой;
4 – модель, движение по прямой

Анализируя зависимости, представленные на рисунках 10 – 14, можно сделать вывод о том, что значения исследуемых характеристик, полученные по результатам численного моделирования, во всем диапазоне скоростей движения не превышают нормативных значений, установленных документом [11]. Кроме того, показатели динамических качеств и воздействия на путь для исследованных вагонов SR В 01 и DR Т 02 хорошо согласуются с экспериментальными данными [9].

Резюмируя изложенное выше, можно сделать вывод о том, что применяемая методология разработки математической модели электропоезда, выбранные подходы моделирования и представленный в данной работе уровень детализации модели могут быть использованы при исследовании динамики железнодорожных экипажей, в частности, скоростных электропоездов.

Список литературы

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года (распоряжение Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-Р) // mintrans.gov.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/1/1010> (дата обращения: 07.02.2023).
2. Руководство пользователя Universal mechanism 9. Моделирование динамики железнодорожных экипажей // [www.universalmechanism.com](http://www.universalmechanism.com/download/90/rus/08_um_loco.pdf) : сайт. – Текст : электронный. – URL: http://www.universalmechanism.com/download/90/rus/08_um_loco.pdf (дата обращения: 20.12.2022).
3. Высокоскоростные поезда «Сапсан» В1 и В2 : учебное пособие / под ред. А. В. Ширяева. – Москва : ОАО «Российские железные дороги», 2013. – 522 с. – Текст : непосредственный.
4. Киселев, А. А. Эквивалентная конусность и ее влияние на движение подвижного состава / А. А. Киселев, Л. С. Блажко, А. В. Романов. – Текст : непосредственный // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 2 (14). – С. 247–255.
5. Киселев, А. А. Влияние геометрических параметров железнодорожного пути на величину эквивалентной коничности колесной пары / А. А. Киселев, Л. С. Блажко, А. С. Гапоненко, А. В. Романов. – Текст : непосредственный // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 2 (16). – С. 202–211.
6. Механическая часть тягового подвижного состава : учебник / И. В. Бирюков, А. Н. Савоськин, Г. П. Бурчак [и др.]; под ред. И. В. Бирюкова. – Москва : Альянс, 2013. – 439 с. – Текст : непосредственный.
7. Sayyaadi H., Shokouhi N. Improvement of Passengers Ride Comfort in Rail Vehicles Equipped with Air Springs. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2009, no. 53, pp. 827–833.

8. Zhai W. Vehicle–Track Coupled Dynamics. Singapore: Science Press and Springer Nature Singapore, 2020, 436 p.

9. Экспериментальная оценка взаимодействия экипажа и пути при скоростном и высокоскоростном движении : научная монография / под ред. А. М. Бржезовского. – Москва : РАС, 2019. – 152 с. – Текст : непосредственный.

10. Взаимодействие пути и подвижного состава ЭВС «Сапсан» (проект Velaro RUS) / А. М. Бржезовский, С. В. Толмачев, Д. Н. Аршинцев, И. В. Смелянский – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТа. – 2012. – № 1. – С. 3–8.

11. ГОСТ 33796–2016. Моторвагонный подвижной состав. Требования к прочности и динамическим качествам. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 41 с. – Текст : непосредственный.

References

1. *Strategija razvitija zhelezнодорожного транспорта в Rossijskoj Federacii do 2030 goda* [Strategy for the Development of Railway Transport in the Russian Federation until 2030], Available at: <https://mintrans.gov.ru/documents/1/1010> (accessed 07.02.2023) (In Russian).

2. *Rukovodstvo pol'zovatelja Universal mechanism 9. Modelirovanie dinamiki zhelezнодорожных jekipazhej* [Universal mechanism User Manual 9. Modeling the dynamics of railway carriages], Available at: http://www.universalmechanism.com/download/90/rus/08_um_loco.pdf (accessed 20.12.2023) (In Russian).

3. Shirjaev A.V. ed. *Vysokoskorostnye poezda «Sapsan» V1 i V2* (High-speed trains «Sapsan» B1 and B2). Moscow: JSC Russian Railways Publ., 2013, 522 p. (In Russian).

4. Kiselev A.A., Blazhko L.S., Romanov A.V. Equivalent taper and its influence on the movement of rolling stock. *Izvestia Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshchenia – Proceedings of Petersburg Transport University*, 2017, no. 2 (14), pp. 247-255 (In Russian).

5. Kiselev A.A., Blazhko L.S., Gaponenko A.S., Romanov A.V. The influence of geometric parameters of the railway track on the value of the equivalent conicity of the wheelset. *Izvestia Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshchenia – Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, no. 2 (16), pp. 202-211 (In Russian).

6. Birjukov I.V. *Mehanicheskaja chast' tjaгovogo podvizhnogo sostava* [Mechanical part of traction rolling stock]. Moscow, Al'janS Publ., 2013, 439 p. (In Russian).

7. Sayyaadi H., Shokouhi N. Improvement of Passengers Ride Comfort in Rail Vehicles Equipped with Air Springs. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2009, no. 53, pp. 827-833.

8. Zhai W. Vehicle–Track Coupled Dynamics. Singapore: Science Press and Springer Nature Singapore, 2020, 436 p.

9. Brzhezovskij A.M. ed. *Jeksperimental'naja ocenka vzaimodejstvija jekipazha i puti pri skorostnom i vysokoskorostnom dvizhenii* [Experimental evaluation of the interaction of the crew and the path in high-speed and high-speed traffic]. Moscow, RAS Publ., 2019, 152 p. (In Russian).

10. Brzhezovskij A.M., Tolmachev S.V., Arshincev D.N., Smeljanskij I.V. Interaction of the track and the rolling stock of the Sapsan EMU (Velaro RUS project). *Vestnik VNIIZhTa – Russian Railway Science Journal*, 2012, no. 1, pp. 3-8 (In Russian).

11. GOST 33796–2016. Motor car rolling stock. Requirements for strength and dynamic qualities. Moscow, Standartinform Publ., 2017, 41 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Харитонов Антон Витальевич

Проектно-конструкторско-технологическое
бюро по нормированию – филиал ОАО «РЖД».

Бригадирский пер., д. 6, г. Москва, 105005,
Российская Федерация.

Ведущий технолог отдела ОНлок.

Тел.: +7 (977) 573-08-75.

E-mail: anton.har@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kharitonov Anton Vital'evich

Design and Technological Bureau for Rationing –
branch of RZD «Russian Railways».

6, Brigadirskij lane, Moscow, 105005, the Russian
Federation.

Leading technologist of the ONlok department.

Phone: +7 (977) 573-08-75.

E-mail: anton.har@mail.ru

Харитонов, А. В. Динамическая модель скоростного электропоезда и ее верификация / А. В. Харитонов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 2 (54). – С. 29 – 42.

Kharitonov A.V. Dynamic model of a high-speed electric train and its verification. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 2 (54), pp. 29-42 (In Russian).

УДК 629.4.027.31:539.4 (045)

С. В. Чунин, Э. С. Оганьян, Г. И. Гаджиметов, М. Ю. Балашов, М. В. Тимаков

Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), г. Коломна, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ПРУЖИН РЕССОРНОГО ПОДВЕШИВАНИЯ СКОРОСТНЫХ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

Аннотация. В статье приведены результаты исследований прочности и долговечности пружин рессорного подвешивания. Исследования включали в себя разработку конечно-элементной модели пружины с последующим проведением прочностных расчетов по определению напряженно-деформированного состояния пружины под действием статической и динамической нагрузки, тензометрирование опытных образцов пружин, выбор режимов нагружения пружин и проведение испытаний на циклическую долговечность. Установленный техническими условиями назначенный срок службы вагона составляет 32 года. Срок службы пружин рессорного подвешивания должен быть не менее 16 лет согласно ГОСТ 1452–2014 «Пружины цилиндрические винтовые тележек и ударно-тяговых приборов подвижного состава железных дорог. Технические условия».

Полученные результаты испытаний показали, что пружины соответствуют требованиям, установленным в ГОСТ 32208–2013 «Пружины рессорного подвешивания железнодорожного подвижного состава. Метод испытания на циклическую долговечность», в части обеспечения минимальных коэффициентов запаса прочности по сопротивлению усталости.

Укрупненный алгоритм для определения расчетного ресурса несущих элементов экипажных частей подвижного состава в данной статье был сформирован по результатам испытаний пружин тележки трехосной скоростной платформы для перевозки контейнеров и включал в себя комплексный подход по решению данной задачи, что является неотъемлемой частью при решении стратегических вопросов долговечности и ресурса подвижного состава железных дорог.

Ключевые слова: пружина, усталостная прочность, напряженно-деформированное состояние, стендовые испытания, грузовой вагон, ресурс, живучесть.

**Sergey V. Chunin, Eduard S. Oganyan, Gadzhimet I. Gadzhimetov, Maksim Yu. Balashov,
Maksim V. Timakov**

JSC «Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock» (JSC «VNIKTI»),
Kolomna, the Russian Federation

STUDY OF THE FATIGUE STRENGTH OF SPRINGS OF SPRING SUSPENSION OF HIGH-SPEED FREIGHT WAGONS

Abstract. The study results of the strength and the fatigue life of springs of spring suspension are presented in the paper. The studies included the development of a finite element model of a spring, followed by strength calculations to determine the stress-strain state of the spring under static and dynamic loads, strain measurement of spring prototypes, selection of spring loading modes and fatigue life testing. The designated service life of a wagon, specified by the technical conditions, is 32 years. The service life of springs of spring suspension must be at least 16 years in accordance with GOST 1452-2014 «Helical springs for bogies and draw-and-buffer gears of railway rolling stock. Specifications».

The test results obtained showed that the springs meet the requirements established in GOST 32208-2013 «Springs of spring suspension of railway rolling stock. Method of fatigue life tests», in terms of ensuring minimum fatigue resistance safety factors.

An enlarged algorithm for determining the estimated life time of the bearing elements of the rolling stock underframe in this paper was formed based on the results of testing the bogie springs of a three-axle high-speed flat wagon for transporting containers and included an integrated approach for solving this problem, without which it is impossible to solve strategic issues of fatigue life and life time of the railway rolling stock.

Keywords: spring, fatigue strength, stress-strain state, bench tests, freight wagon, life time, survivability.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Настоящее исследование посвящено результатам испытаний железнодорожных пружин, применяемых в комплектах рессорного подвешивания ходовой части (тележках) грузовых вагонов.

Рынок грузоперевозок и рынок транспортного грузового вагоностроения являются одними из важнейших составляющих организационной структуры функционирования государственной экономики. Без доставки грузов от производителя к потребителю не может работать ни одно предприятие крупных или даже средних размеров. Грузовые вагоны являются главным инструментом при решении данной задачи.

Из-за быстрого роста объемов грузоперевозок все более актуальным становится вопрос увеличения провозной способности железных дорог. В связи с этим все большее распространение получают грузовые скоростные вагоны, предназначенные для перевозки контейнеров.

Одной из основных особенностей указанного типа подвижного состава является большой среднесуточный пробег (более 600 км в сутки), что обуславливает определенные требования усталостной прочности несущих элементов конструкций вагона, а также упругих элементов его рессорного подвешивания.

Конструкции и детали подвижного состава испытывают в эксплуатации нагрузки различного уровня. Поэтому для расчетов их долговечности и ресурса составляют суммарный режим нагрузки (блок нагрузок), наиболее полно отражающий нагружение детали в эксплуатации. Этот блок представляется в виде ступенчатого распределения амплитуд напряжений, заданный в виде таблиц пары чисел (τ_{ai} , n_i) или в виде плотности вероятностей амплитуд (гистограмма).

Настоящая оценка ресурса (срока службы) пружин рессорного подвешивания подвижного состава (ПС) выполнена расчетно-экспериментальными методами в вероятностной постановке. Эти методы в качестве исходных данных используют результаты ходовых динамико-прочностных испытаний ПС на эксплуатационных участках железнодорожного пути или специальных полигонах, а также стендовых испытаний пружин при статическом и циклическом (на усталость) нагружении.

Представленные методы расчетов определяют долговечность указанного элемента экипажной части ПС, рассчитываемую на основе гипотезы (корректированной) линейного суммирования усталостных повреждений в вероятностной постановке, а также путем аналитического представления и решения уравнений кривой усталости детали.

В процессе разработки перспективного скоростного вагона-платформы были спроектированы и изготовлены пружины его рессорного подвешивания. Для оценки их характеристик усталости с учетом срока службы вагона (32 года) и среднесуточного пробега (750 км) необходимо проведение исследований напряженно-деформированного состояния (НДС) пружины, определение параметров его эксплуатационной нагруженности и характеристик сопротивления усталости.

Для решения поставленной задачи проведены расчеты НДС пружин при нагружении их статической и динамической нагрузкой. Для этого была создана конечно-элементная модель пружины (рисунок 1).

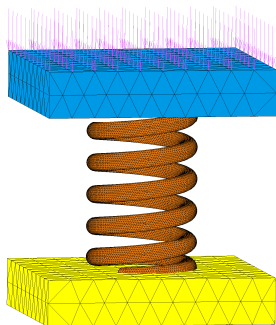


Рисунок 1 – Конечно-элементная модель пружины

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Результаты расчетов представлены на рисунках 2 – 4.

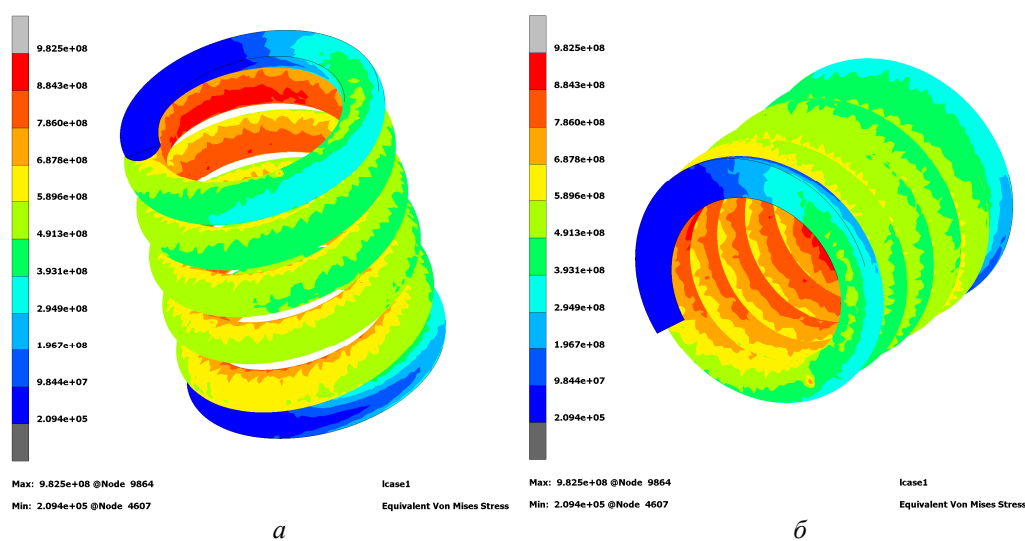


Рисунок 2 – Эквивалентные напряжения: *a* – вид снаружи; *б* – вид изнутри

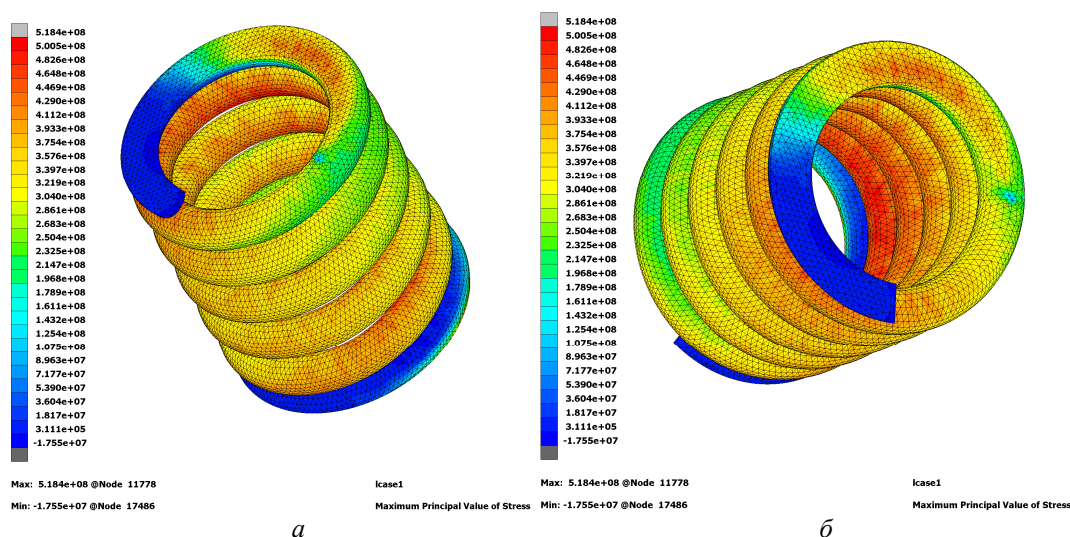


Рисунок 3 – Первое главное напряжение: *a* – вид снаружи; *б* – вид изнутри

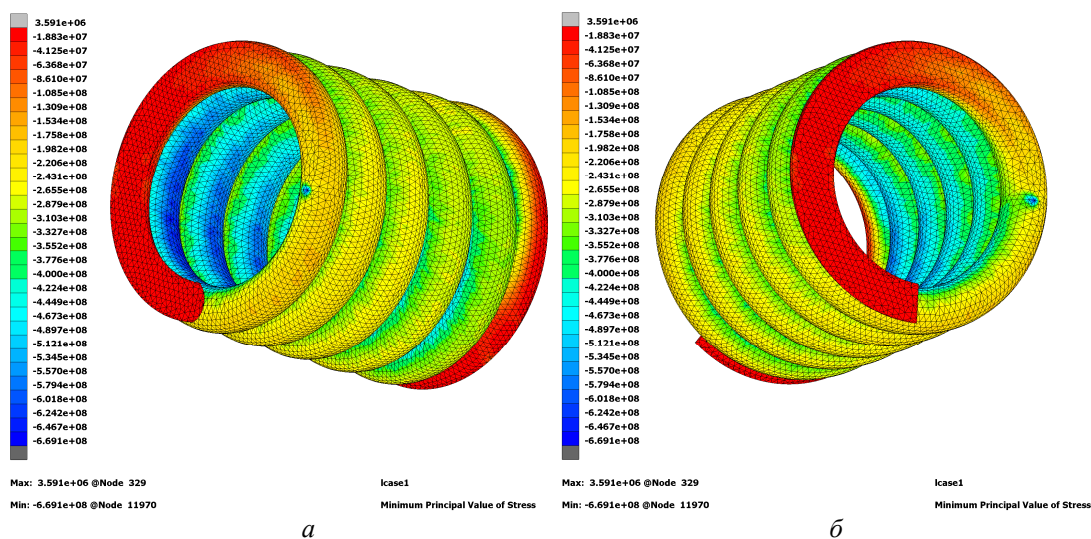


Рисунок 4 – Третье главное напряжение: *a* – вид снаружи; *б* – вид изнутри

Для проведения сравнительного анализа напряженного состояния пружин, полученного расчетным и экспериментальным методами, по результатам расчетов определены места установки тензорезисторов (рисунок 5).

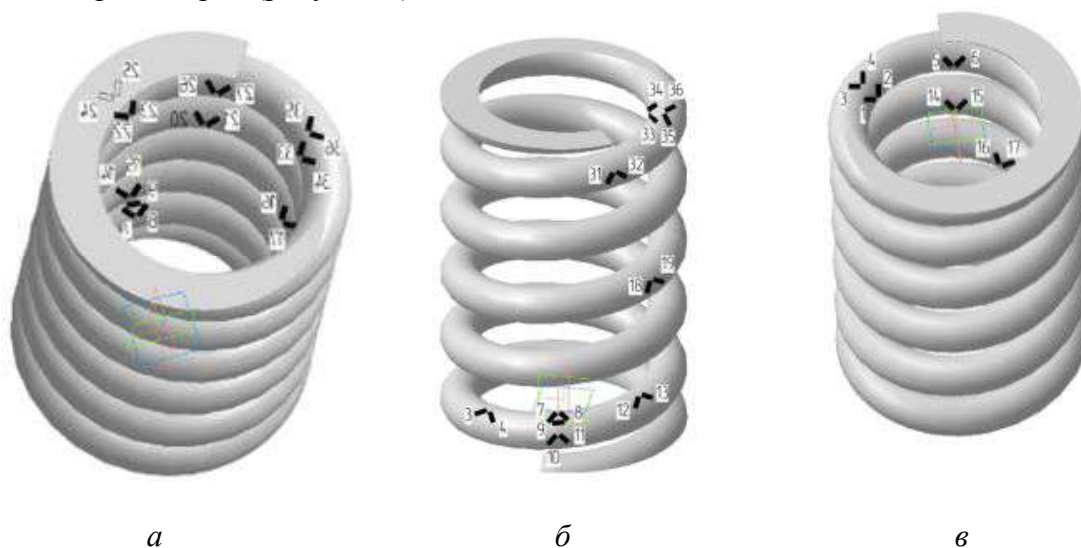


Рисунок 5 – Схемы установки тензодатчиков: *а* – общий вид; *б* – вид спереди; *в* – вид изнутри

Исследование НДС пружин проводилось методом тензометрии. Тензодатчиками оборудовались все рабочие витки пружин на внутренней и наружной сторонах витков. Использовались датчики базой 5 мм. Касательные напряжения определялись по показаниям тензодатчиков, расположенных под углом 45° к оси прутка.

Далее исследуемая пружина устанавливалась в испытательный стенд и проводились статические и циклические испытания, в результате чего были получены значения механического напряжения при статической нагрузке, амплитуды механического напряжения цикла и величина относительных разниц результатов, полученных расчетным и экспериментальными методами.

Из анализа полученных результатов следует, что расчетное касательное напряжение от кручения прутка на внутренней поверхности витка пружины, возникающее при приложении силы F_1 , и предельная амплитуда напряжений цикла при испытании на базе 6×10^6 циклов согласно требованиям стандарта [1] составляют 528,2 и 184,9 МПа соответственно. Максимальное значение касательного напряжения получено равным 870 МПа при допускаемом 915 МПа для пружинной стали 60С2ХФА.

Максимальная относительная разница между значениями механических напряжений, полученных при статическом и циклическом нагружении экспериментальным и расчетным методами, не превышает 15 %. Таким образом, подтверждается возможность выбора адекватного режима нагружения для проведения стендовых испытаний на специализированном испытательном стенде.

Стендовые испытания на усталость проводились на 15 опытных образцах пружин в соответствии с требованиями п. 4.16 ГОСТ 1452–2011 [2]. Пружины устанавливали на испытательный стенд, нагружали заданными статическими нагрузками с учетом результатов предварительно проведенных расчетов НДС и статических испытаний, описанных выше, амплитудное значение которого выбиралось близким к полученному расчетом. При этом каждая пружина испытывалась до ее разрушения (излома).

Результаты, полученные при испытаниях на циклическую долговечность, приведены в таблице.

Как следует из полученных результатов испытаний, долговечность пружин имеет определенный разброс. Усталостные изломы имели вид, представленный на рисунке 6.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Результаты стендовых ресурсных испытаний пружин на циклическую долговечность

Номер пружины	Амплитуда колебаний s_a , мм	Амплитуда напряжений τ_a , МПа	Количество циклов до разрушения пружины N (циклы)	Место и характер разрушения
1	33	222	1844100	Излом по наружной поверхности рабочего витка с началом разрушения от внутреннего дефекта (волосовина)
2			6000290	Без излома
3				
4	41	277	413900	Излом крайнего рабочего витка от точечного контакта с опорным витком
5	36	240	1714200	
6	41	277	1823400	
7	28	185	6000170	Без излома
8				
9	30	203	6000050	
10	36	240	6000120	Излом крайнего рабочего витка от точечного контакта с опорным витком
11			677200	
12	39	253	6000020	Без излома
13			1237200	Излом крайнего рабочего витка от точечного контакта с опорным витком
14	30	203	6000050	Без излома
15	39	253	943100	Излом крайнего рабочего витка от точечного контакта с опорным витком



Рисунок 6 – Виды изломов пружин: *а* – разрушение первого витка от контакта с опорным; *б* – разрушение от дефектов материала прутка

Кривая усталости, построенная по результатам испытаний на циклическую долговечность, приведена на рисунке 7. Из рисунка 7 следует, что предел выносливости τ_a пред пружин данного типоразмера составляет 212,4 МПа.

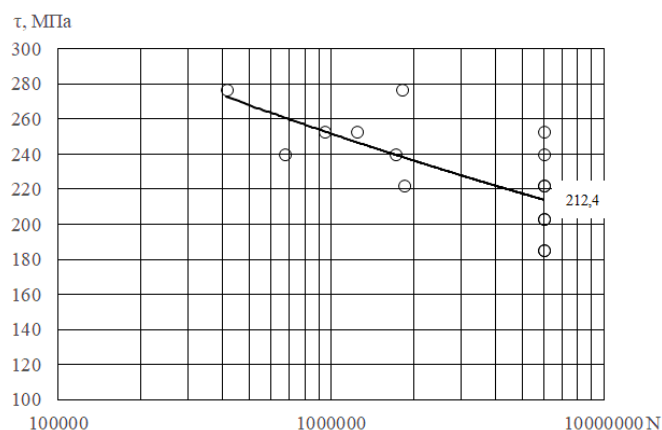


Рисунок 7 – Кривая усталости: τ – значение предельной амплитуды напряжения цикла; N – количество циклов до разрушения

Пружины рессорного подвешивания грузового вагона при эксплуатации работают в условиях многоциклового нагружения с напряжениями, не превышающими предела выносливости детали.

Накопление усталостных повреждений в материале циклически нагружаемой детали характеризует кривая усталости, которая описывается уравнением вида $t_{ai}^m \cdot N_i = \text{const}$ на основании гипотезы линейного суммирования повреждений.

Из уравнения кривой усталости (расчет ведется относительно второй наклонной ветви, так как эксплуатационные напряжения в пружине ниже предела выносливости с количеством циклов $N_0 \geq 10^7$) следует:

$$N_p = \left(\frac{\tau^{P=0,95}}{\tau_{a0}} \right)^{m_2} \cdot N_0 = n_\tau^{m_2} \cdot N_0, \quad (1)$$

где N_p – число циклов нагружения детали до истощения сопротивления усталости (разрушения); $\tau_a^{P=0,95}$ – предел выносливости детали для заданной вероятности разрушения $P = 0,95$,

$$\tau_a^{P=0,95} = \tau_{a \text{ пред}} \cdot (1 - U_p \cdot \nu), \quad (2)$$

где $\tau_{a \text{ пред}}$ – значение предела выносливости, определенное с $P = 0,5$; $U = 1,645$ – квантиль нормального распределения при $P = 0,95$; $\nu = 0,1$ – коэффициент вариации; τ_{a0} – амплитуда (эквивалентная) динамических напряжений в пружине рессорного подвешивания тележки от эксплуатационных нагрузок; n_τ – коэффициент запаса прочности по сопротивлению усталости, соответствующий величине $\tau_a^{P=0,95}$; $m_2 = 2 \cdot m_1 - 1 = 11$; $m_1 = 6$ – по кривой усталости; $N_0 = 6 \cdot 10^6$ циклов.

Для грузового вагона с осевой нагрузкой 197 кН при конструкционной скорости $V_k = 140$ км/ч имеем: $V_{cp} = 90$ км/ч (25 м/с) (таблица 3.4 источника [3]); $n_\tau = 1,2$; $f = 2,5$ Гц – частота амплитуд прогибов (напряжений) пружины; ресурс пружины по числу циклов нагружения до разрушения, посчитанный по уравнению (1).

$$N_p = \left(\frac{212,4 \cdot (1 - 1,645 \cdot 0,1)}{528,2 \cdot 0,193} \right)^{11} = 444,8 \cdot 10^6 = 444,8 \cdot 10^6 \text{ циклов.}$$

С учетом доли скоростей движения грузового поезда от 81 до 90 км/ч, равной 0,54 (по таблице 6 ГОСТ 33211–2014 [4]) годовое число циклов нагружения $N_1 = 27,3 \cdot 10^6$ циклов/год.

При годовом пробеге вагона в груженом состоянии 274 тыс. км безопасный срок эксплуатации пружины от даты изготовления составит $L = \frac{N_p}{N_1} = \left(\frac{444,8}{27,3} \right)^{11} = 16,2$ года.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Результаты испытаний пружин показали, что фактическое значение предельной амплитуды напряжения цикла (предел выносливости пружин) на базе 6×10^6 составляет $\tau_{a \text{ пред}} = 212,4$ МПа, что выше расчетного значения для данного типоразмера пружин 184,9 МПа.

2. Безопасный срок эксплуатации пружин – 16,2 года, что соответствует требованиям ГОСТ 1452–2011 [2].

3. Полученные результаты целесообразно дополнить комплексом эксплуатационных испытаний пружин в различных условиях для оценки их релаксационной стойкости за этот период работоспособности в условиях низких температур и для уточнения блока нагрузок.

Список литературы

1. ГОСТ 32208–2013. Пружины рессорного подвешивания железнодорожного подвижного состава. Методы испытаний на циклическую долговечность. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 11 с. – Текст : непосредственный.

2. ГОСТ 1452–2011. Пружины цилиндрические винтовые тележек и ударно-тяговых приборов подвижного состава железных дорог. Технические условия. – Москва : Издательство стандартов, 2011. – 16 с. – Текст : непосредственный.

3. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). С изм. и доп. № 1 от 01.02.2000 и № 2 от 01.03.2002. – Москва : Государственный научно-исследовательский институт вагоностроения (ГосНИИВ), Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ), 1996. – 319 с. – Текст : непосредственный.

4. ГОСТ 33211–2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 57 с. – Текст : непосредственный.

References

1. GOST 32208–2013. Springs of spring suspension of railway rolling stock. Method of fatigue life tests. Moscow, Standartinform Publ., 2014, 11 p. (In Russian).

2. GOST 1452–2011. Helical springs for bogies and draw-and-buffer gears of railway rolling stock. Specifications. Moscow, Standards Publishing House, 2011, 16 p. (In Russian).

3. Standards for the calculation and design of railway wagons of the Ministry of Railways of the 1520 mm gauge (non-self-propelled). Moscow, GosNIIV, VNIIZhT Publ., 1996, 319 p. (In Russian).

4. GOST 33211–2014. Freight wagons. Requirements to structural strength and dynamic qualities. Moscow, Standartinform Publ., 2016, 57 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чунин Сергей Владимирович

АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»).

Октябрьской революции ул., д. 410, г. Коломна, Московская область, 140402, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, заведующий лабораторией.

Тел.: +7 (496) 618-82-48, доб. 13-36.

E-mail: chunin-sv@vnikti.com

Оганьян Эдуард Сергеевич

АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»).

Октябрьской революции ул., д. 410, г. Коломна, Московская область, 140402, Российская Федерация.

Доктор технических наук, главный научный сотрудник.

Тел.: +7 (496) 618-82-48, доб. 11-20.

E-mail: oganian-es@vnikti.com

Гаджиметов Гаджимет Исамединович

АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»).

Октябрьской революции ул., д. 410, г. Коломна, Московская область, 140402, Российская Федерация.

Руководитель испытательного центра.

Тел.: +7 (496) 618-82-48, доб. 11-27.

E-mail: gajimetov-gi@vnikti.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Chunin Sergey Vladimirovich

JSC «Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock» (JSC «VNIKTI»).

410, Oktyabrskoy Revolutsii st., Kolomna, 140402, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, head of laboratory.

Phone: +7 (496) 618-82-48, ext. 13-36.

E-mail: chunin-sv@vnikti.com

Oganyan Eduard Sergeevich

JSC «Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock» (JSC «VNIKTI»).

410, Oktyabrskoy Revolutsii st., Kolomna, 140402, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, chief researcher of the Strength department.

Phone: +7 (496) 618-82-48, ext. 11-20.

E-mail: oganian-es@vnikti.com

Gadzhimetov Gadzhimet Isamedinovich

JSC «Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock» (JSC «VNIKTI»).

410, Oktyabrskoy Revolutsii st., Kolomna, 140402, the Russian Federation.

Head of Rolling Stock Test Center.

Phone: +7 (496) 618-82-48, ext. 11-27.

E-mail: gajimetov-gi@vnikti.com

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Балашов Максим Юрьевич

АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»).

Октябрьской революции ул., д. 410, г. Коломна, Московская область, 140402, Российская Федерация.

Ведущий инженер.

Тел.: +7 (496) 618-82-48, доб. 12-13.

E-mail: balashov-mu@vnikti.com

Balashov Maxim Yurievich

JSC «Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock» (JSC «VNIKTI»).

410, Oktyabrskoy Revolutsii st., Kolomna, 140402, the Russian Federation.

Leading engineer.

Phone: +7 (496) 618-82-48, ext. 12-13.

E-mail: balashov-mu@vnikti.com

Тимаков Максим Владимирович

АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»).

Октябрьской революции ул., д. 410, г. Коломна, Московская область, 140402, Российская Федерация.

Заведующий лабораторией.

Тел.: +7 (496) 618-82-48, доб. 19-71.

E-mail: timakov-mv@vnikti.com

Timakov Maxim Vladimirovich

JSC «Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock» (JSC «VNIKTI»).

410, Oktyabrskoy Revolutsii st., Kolomna, 140402, the Russian Federation.

Head of laboratory.

Phone: +7 (496) 618-82-48, ext. 19-71.

E-mail: timakov-mv@vnikti.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Исследование усталостной прочности пружин рессорного подвешивания скоростных грузовых вагонов / С. В. Чунин, Э. С. Оганьян, Г. И. Гаджиметов, М. Ю. Балашов, М. В. Тимаков. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 2 (54). – С. 42 – 49.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Chunin S.V., Oganyan E.S., Gadzhimetov G.I., Balashov M.Yu., Timakov M.V. Study of the fatigue strength of springs of spring suspension of high-speed freight wagons. *Journal Of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 2 (54), pp. 42-49 (In Russian).

УДК 629.4.014.6:629.45

Д. Г. Евсеев¹, С. В. Лагутин¹, А. С. Шинкарук²

¹Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), г. Москва, Российская Федерация;

²АО «Федеральная пассажирская компания» (АО «ФПК»), г. Москва, Российская Федерация

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЕГО ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА

Аннотация. Целью настоящего исследования является определение и оценка технического состояния пассажирских вагонов моделей 47К и 47К/к с установлением предельного технического состояния и рекомендациями по остаточному ресурсу их конструкции.

Проведенное исследование пассажирских вагонов, изготовленных на Waggonbau Ammendorf Gruppe в 1979 и 1980 гг., с целью определения остаточного ресурса по разработанной программе включало в себя анализ конструкторской документации на данные модели вагонов; установление зон, подверженных в процессе эксплуатации повышенным нагрузкам; установление зон образования повышенной коррозионности; установление необходимости проведения ультразвукового дефектоскопирования, визуального и измерительного контроля ряда элементов конструкции вагонов.

По результатам оценки технического состояния основных элементов рамы и кузова вагонов (проведение метрических измерений, ультразвукового и визуального контроля) и расчетов циклической долговечности установлено, что пассажирские вагоны данных моделей, достигшие предельного срока службы (с учетом проведения капитально-восстановительного ремонта), сохраняют основные параметры, соответствующие требованиям ГОСТ 55182–2012 «Вагоны пассажирские локомотивной тяги. Общие технические требования» и другим нормативным документам.

Расчеты на циклическую долговечность показали, что исследуемые пассажирские вагоны указанных моделей имеют остаточный срок службы не менее 63 лет и обладают ресурсом использования в 23 года до фактического достижения предельного критического состояния основных несущих элементов конструкции.

Ключевые слова: пассажирский вагон, нагрузки, циклическая долговечность, нагруженность, несущие элементы.

Dmitriy G. Evseev¹, Sergey V. Lagutin¹, Andrey S. Shinkaruk²

¹Russian University of Transport (RUT (MIIT)), Moscow, the Russian Federation;

²JSC «Federal Passenger Company» (JSC «FPC»), Moscow, the Russian Federation

ASSESSMENT OF THE TECHNICAL CONDITION OF A PASSENGER CAR AND RECOMMENDATIONS FOR DETERMINING ITS RESIDUAL LIFE

Abstract. *The purpose of this study is to determine and evaluate the technical condition of the passenger car models 47K and 47K/k with the establishment of the limit state of the car and recommendations on the residual life of the car structure.*

The conducted study of passenger cars manufactured at Waggonbau Ammendorf Gruppe in 1979 and 1980, in order to determine the remaining life according to the developed program, included the analysis of design documentation for these car models; zones subject to increased loads during operation are established; zones of formation of increased corrosivity were established; the need for ultrasonic flaw detection, visual and measurement control of a number of structural elements of cars has been established.

Based on the results of assessing the technical condition of the main elements of the frame and body of the cars (carrying out thickness measurement, ultrasonic and visual inspection) and calculating the cyclic durability, it was found that the passenger cars of these models and having reached the maximum service life limit (taking into account the overhaul repair) found that all the studied parameters generally comply with the requirements of GOST 55182-2012. Passenger carriages of locomotive traction. General technical requirements and regulatory parameters.

Based on the results of calculations for cyclic durability, it has been established that the passenger car under study, according to the results of calculating cyclic durability, has a residual service life of at least 63 years and has a service life of 23 years until the ultimate critical state of its individual elements (spinal semi-beam) is actually reached.

Keywords: *passenger car, loads, cyclic durability, loading, load-bearing elements.*

Дефицит существующего парка вагонов и закрытие в начале 2022 г. пассажирского авиасообщения на ряде направлений нашей страны отрицательно влияют на обеспечение железнодорожных пассажирских перевозок.

Задача обеспечения потребности перевозок с учетом возникших факторов требует реализации мер, позволяющих, с учетом обеспечения безопасности движения, использовать подвижной состав с продлением его нормативного срока службы (ресурса).

Существующая нормативная база, регламентирующая порядок продления срока службы пассажирских вагонов, курсирующих в международном сообщении, регламентирована соответствующим положением [11], при этом нормативный порядок, регламентирующий аналогичные нормативные требования для внутрироссийских перевозок, требует его разработки с учетом постоянного совершенствования подвижного состава и повышения его надежности [8, 9, 14].

В целях оценки возможности реализации возникающих потребностей и рассмотрения возможности использования в обеспечении пассажирских перевозок подвижного состава, выработавшего нормативный срок службы, по результатам проведения оценки его фактического состояния и остаточного ресурса были отобраны **три вагона** моделей 47К (рисунок 1) и 47 К/к, выработавшие нормативный срок службы (все обследованные вагоны 1979 – 1980 гг. выпуска, изготовленные на заводе Waggonbau Ammendorf Gruppe (Германия)), которым проведен капитально-восстановительный ремонт в условиях вагоноремонтного завода в 2007 – 2009 гг.

Для установления остаточного ресурса вагонов данных моделей разработаны программа и методика испытаний, включающие в себя следующие основные разделы:

анализ конструкторской документации на вагоны моделей 47К и 47К/к WaggonbauAmmendorfGruppe;

определение зон, подверженных в процессе эксплуатации повышенным нагрузкам, таким как соударение, продольно-динамические нагрузки в процессе ускорения/торможения вагона и состава в целом и т. д.;

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

определение зон повышенной коррозионности (эксплуатация в различных климатических условиях, попадание «серой воды» на элементы рамы и кузова вагонов) [9];

определение необходимости проведения ультразвукового дефектоскопирования, визуального и измерительного контроля ряда элементов конструкции вагонов.

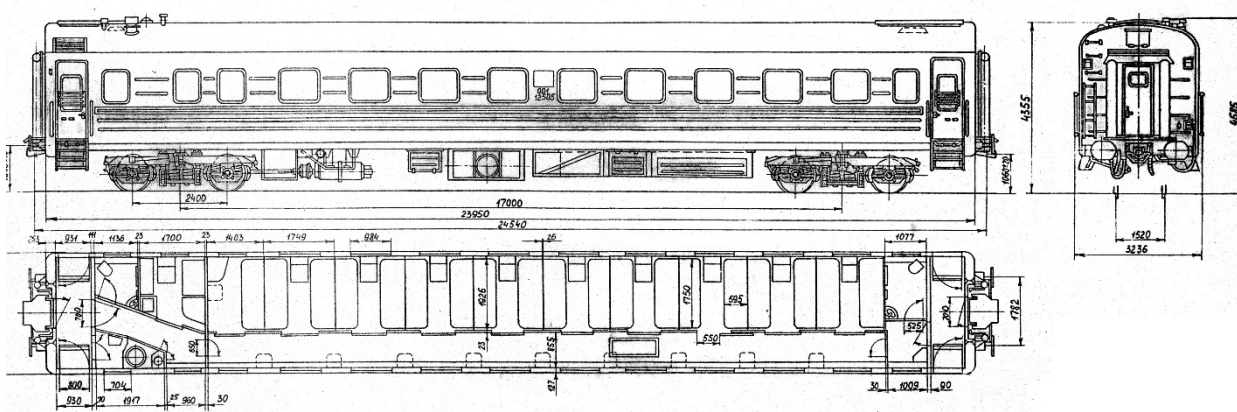


Рисунок 1 – Схема пассажирского вагона модели 47К

Методика испытания с учетом регламентированных параметров [2, 4, 10 – 13] включает в себя выполнение следующих основных операций: пассажирский вагон подается на домкратные позиции, проводятся измерения остаточной толщины элементов силового каркаса вагона толщиномером по контрольным точкам, определенным документами [10, 11] и схематически расположенным на рисунке 2, проводятся дефектоскопирование сварных швов в элементах кузова вагона, визуальный осмотр и контроль на наличие деформаций, трещин, дефектов основного металла с последующей обработкой полученных данных [1 – 4, 7, 12, 13] и анализом допустимых параметров, изложенных в нормативной и конструкторской документации.

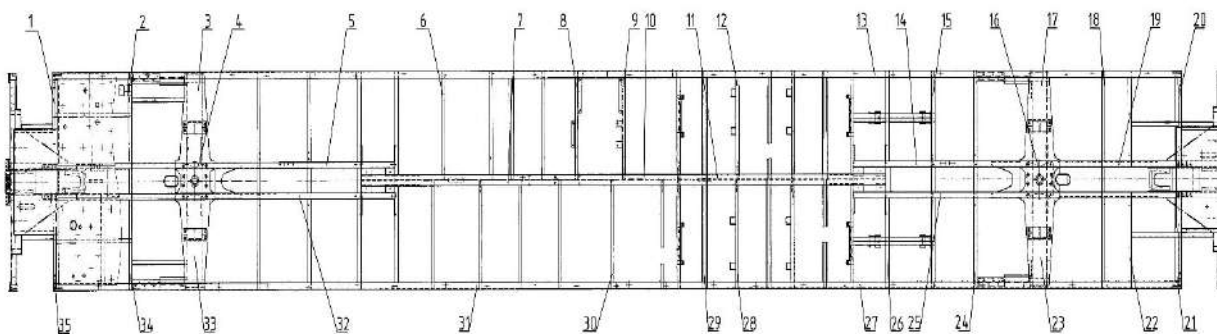


Рисунок 2 – Карта контрольных точек пассажирского вагона

Результаты измерения остаточной толщины элементов силового каркаса вагонов толщиномером по контрольным точкам представлены в таблице 1.

В результате проведенного контроля основных несущих конструкций кузовов и рам пассажирских вагонов моделей 47К и 47 К/к с последующим анализом результатов установлено, что по некоторым сварным соединениям выявлены отдельные дефекты в соответствии с классификацией [6, 7], а именно: превышение толщины углового сварного шва, утонение основного слоя сечения металла у элементов конструкции, несоответствия наложения сварных швов и иные дефекты, устраняемые при проведении планово-предупредительного ремонта.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Таблица 1 – Толщина элемента кузова вагона пассажирского типа в точке контроля с наибольшим коррозионным износом

Наименование элемента кузова	Допускаемая согласно [2] толщина элемента при выпуске из КВР, мм	Допускаемая согласно [3] толщина элемента при выпуске из КР-1, мм	Толщина элемента в точке контроля с наименьшим значением, мм		
			вагон 1 (47К)	вагон 2 (47К/к)	вагон 3 (47К/к)
Нижний подоконный пояс (лист между гофрами)	2,2	1,75	2,26	2,23	2,25
Нижний подоконный пояс (гофры)	2,2	1,75	2,33	2,31	2,28
Нижний подоконный пояс (декоративная полоса)	2,2	1,75	2,24	2,22	2,31
Средний пояс (межоконный простенок)	1,8	3,4	1,77	1,79	1,82
Верхний надоконный пояс (под гофрой)	1,8	1,4	1,83	1,81	1,84
Верхний надоконный пояс (гофра), точки	1,8	1,4	1,83	1,78	1,85
Верхний надоконный пояс (над гофрой)	1,8	1,4	1,88	1,91	1,84
Торцевая стена (гофра)	1,8	1,4	1,84	1,85	1,92
Торцевая стена (лист между гофрами)	1,8	1,4	1,85	1,81	1,87
Торцевая стена (на уровне верхнего листа концевой балки)	1,8	1,4	1,82	1,85	1,91
Пол туалета	8,0	7,0	9,11	8,62	9,21
Гладкий пол	2,6	2,1	2,71	2,73	2,69
Гофрированный пол	2,2	1,75	2,25	2,29	2,24
Концевая балка	8,0	7,0	8,52	8,41	8,52
Продольная боковая балка	11,2	9,8	11,35	11,41	11,56
Шкворневая балка	9,6	8,4	9,9	10,1	10,2
Раскосы	6,6	5,60	6,8	6,82	6,983
Хребтовая балка	8,0	7,0	9,15	9,15	9,11
Поперечная балка	3,4	2,80	3,5	3,55	3,34

По результатам ультразвукового, а также визуального и измерительного контроля в соответствии с требованиями [2, 10, 11] установлено, что обследованные элементы вагонов продолжают соответствовать установленным нормам, сверхнормативных утонений сечений элементов силовых каркасов и кузовов не выявлено. При визуально-измерительном контроле дефектов, требующих исключения исследуемых вагонов из инвентаря, также не выявлено.

При определении горизонтальных и вертикальных изгибов несущих элементов вагонов установлено, что сверхнормативный прогиб кузовов исследуемых вагонов отсутствует.

Таким образом, в ходе измерений было установлено, что вагоны имеют остаточную толщину элементов конструкции, превышающую минимально допустимые значения, установленные нормативными документами [1 – 3].

По результатам контроля толщин основных несущих конструкций кузовов вагонов установлено, что из трех вагонов наибольшие коррозионные повреждения выявлены у первого исследуемого вагона (вагона 1). При этом состояние сварных швов у всех исследованных вагонов удовлетворяет требованиям документа [7], за исключением нескольких сварных швов,

которые требуют восстановления сваркой в соответствии с требованиями [6, 7] в процессе проведения планово-предупредительного ремонта. Следует отметить, что по результатам исследований состояние сварных соединений у всех трех исследованных вагонов сопоставимо между собой.

В ходе испытаний первого исследуемого вагона (вагона 1) разрушений в несущих конструкциях не выявлено, геометрическая целостность не нарушена, максимальные нагрузки на элементы конструкции вагона при соударении составили 227 МПа при допускаемых 245 МПа.

В соответствии с полученными результатами установлено, что в ходе испытаний данного вагона (вагона 1) при сбросе с клиньев разрушений не выявлено, целостность конструкции не нарушена, а в ходе испытаний получены фактические данные, необходимые для проведения расчетов циклической долговечности для базовых элементов конструкции вагона. Измерение напряжений в несущих элементах кузова при квазистатических нагрузках растяжения 1,2 МН и сжатия 1,6 МН выполнено в соответствии с требованием ГОСТа [4]. По результатам проведенного исследования установлено, что целостность конструкции вагона не нарушена, максимальные напряжения при квазистатических нагрузках растяжения и сжатия составили 94 МПа при допускаемом напряжении 125 МПа.

На основании результатов измерений и испытаний данного вагона (вагона 1) произведены такие расчеты:

остаточного срока службы по степени коррозионного износа каждого исследуемого элемента конструкции;

циклической долговечности для базовых элементов конструкции и определение срока службы вагона по результатам контрольных измерений.

Расчет остаточного срока службы пассажирского вагона, выработавшего максимально допустимый срок службы по степени коррозионного износа каждого элемента конструкции, выполнялся в соответствии с основными положениями документов [4, 11] по трем вариантам возможного состояния:

1) замена несущих конструкций с момента изготовления вагона не производилась;

2) замена несущих конструкций произведена полностью при проведении капитально-восстановительного ремонта;

3) замена всех несущих конструкций произведена при проведении последнего капитального ремонта в объеме КР-1 в соответствии с указаниями [1 – 3].

Связано это с тем, что информация по замене несущих конструкций не регламентирована и отсутствует в базе данных на исследуемый вагон.

Как уже отмечалось, оценка толщины конструкции производилась по контрольным точкам, установленным в соответствии с требованиями [12].

Оценка усталостной прочности производится по коэффициенту запаса сопротивления усталости по формуле:

$$n = \frac{\sigma_{a, N}}{\sigma_{a, \varepsilon}} \geq [n], \quad (1)$$

где $\sigma_{a, N}$ – предел выносливости (по амплитуде) для контрольной зоны при симметричном цикле и установившемся режиме нагружения при базовом числе циклов;

$\sigma_{a, \varepsilon}$ – величина амплитуды динамического напряжения условного симметричного цикла, приведенная к базовому числу циклов N_0 , эквивалентная по повреждающему воздействию реальному режиму эксплуатационных напряжений за расчетный срок службы;

$[n]$ – коэффициент запаса сопротивления усталости.

По результатам выполненных расчетов остаточного ресурса вагона установлено, что минимальный срок службы вагона с учетом прогноза по максимально возможному развитию коррозионного износа до достижения браковочных критериев составит:

по варианту № 1 (с даты постройки вагона пассажирского типа 47К замена элементов несущих конструкций кузова не производилась) – 40,9 лет;

по варианту № 2 (при проведении КВР были заменены все элементы несущих конструкций кузова на новые и до достижения вагоном пассажирским типа 47К срока службы 40 лет замена элементов не производилась) – 12,6 лет;

по варианту № 3 (при проведении последнего КР-1 были заменены все элементы несущих конструкций кузова вагона пассажирского типа 47К на новые) – 6,5 лет.

При расчете назначенного срока службы для базовых элементов конструкции по циклической долговечности пассажирского вагона в соответствии с основными положениями документов [10, 13] принималось,

что усталостное повреждение или разрушение материала вагона происходило в основном при упругом деформировании, т. е. расчет производился по критерию многоциклового усталости;

параметром, определяющим циклическую прочность, является коэффициент запаса сопротивления усталости;

справедлива линейная гипотеза суммирования усталостных повреждений;

накопление усталостных микроповреждений происходило в результате продольно-динамического воздействия на вагон;

асимметрия цикла нагружения учитывалась не снижением предела выносливости материала, а увеличением амплитудных значений динамических напряжений путем приведения их к эквивалентному симметричному циклу, так как расчет производился для неустановившегося режима нагружения.

В качестве исходных данных для расчета использовались параметры напряженно-деформированного состояния в контрольных точках конструкции вагона, определяемые расчетно-экспериментальными методами, и механические свойства материала по справочным данным [13]. Контрольные точки на основном металле вагона находятся в зонах геометрических концентраторов напряжений и по полученным результатам от динамических нагрузок.

Искомая величина долговечности по критерию усталостной прочности для каждой выбранной зоны (см. рисунок 2) определялась по формуле:

$$T_k = \frac{\left(\frac{\sigma_{a,N}}{[n]}\right) N_0}{N_{c1} \sum_j (\sigma_{aj}^I)^m P_j^I + N_{c2} \sum_k (\sigma_{ak}^{II})^m P_k^{II}}, \quad (2)$$

где m – показатель степени в уравнении кривой усталости в амплитудах;

T_k – искомая величина расчетного срока эксплуатации;

N_{c1}, N_{c2} – число циклов за один год эксплуатации для каждой из эксплуатационных нагрузок соответственно;

$\sigma_{aj}^I, \sigma_{ak}^{II}$ – амплитуды динамических напряжений, приведенные к симметричному циклу, эквивалентные экспериментально полученным несимметричным для различных эксплуатационных нагрузок и их диапазонов (от вертикальных динамических нагрузок при движении в составе поезда и при нагружениях через сцепное устройство вагона соответственно);

P_j^I, P_k^{II} – вероятности появления амплитуд для различных эксплуатационных нагрузок с уровнями $\sigma_{aj}^I, \sigma_{ak}^{II}$;

N_0 – базовое число циклов.

В качестве расчетного срока эксплуатации принималась минимальная из величин T_k для контрольных зон, $T_{k>\min}$.

Нормативная функция распределения частот повторения продольных усилий выбиралась согласно [1] при действии на пассажирский вагон через автосцепку.

Нормативное количество циклов динамических напряжений от продольных сил за один год эксплуатации для пассажирских вагонов по [13] составило $N_{c1} = 18200$.

Полученные результаты обработаны и систематизированы в таблице 2.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Таблица 2 – Полученные результаты циклической долговечности

Номер точки	Долговечность, лет	$(\overline{k_{\sigma}})_k$	n
1	8242,8	2,4	5,5
2	1248,9	2,4	4,52
3	1814,9	2,4	4,01
4	63,8	2,4	2,03
5	152,4	2,4	2,57
6	1275,0	2,4	4,56
6	2494,4	2,4	4,97
7	340,3	2,4	3,03
8	1192,4	2,4	4,26
9	1346,3	2,4	4,81
10	211,1	2,4	2,98
11	491,1	2,4	3,14
12	2275,3	2,4	4,95
13	23211,8	2,4	7,77
14	142,6	2,4	2,51
15	3092,3	2,4	5,04
16	72,5	2,4	2,23
17	2337,4	2,4	4,86
18	2086,2	2,4	4,29
19	130,0	2,4	2,51
20	3958,9	2,4	6,05
21	5811,3	2,4	6,49
22	1958,3	2,4	4,86
23	1629,3	2,4	5,02
24	2408,3	2,4	4,82
25	145,0	2,4	2,53
26	2638,2	2,4	5,04
27	1087,9	2,4	3,64
28	1529,6	2,4	4,29
29	1593,8	2,4	4,56
30	2493,3	2,4	4,99
31	459,9	2,4	3,05
32	154,0	2,4	2,58
33	1485,8	2,4	4,65
34	2297,1	2,4	4,93
35	8084,1	2,4	6,57

В результате выполненных работ по определению и оценке технического состояния циклическая долговечность прошедшего капитально-восстановительный ремонт и полностью выработавшего продленный срок службы (40 лет с момента постройки) вагона составила для базовых элементов конструкции не менее 63 лет (с момента постройки вагона). С учетом изложенного минимальная величина остаточного срока составляет 23 года.

Выводы. В результате выполненных работ по оценке технического состояния вагонов пассажирских типа 47К, прошедших капитально-восстановительный ремонт, на основе полученных данных испытаний, исследований и измерений установлено фактическое состояние вагонов, полностью выработавших продленный срок службы (40 лет с момента постройки), позволяющее их дальнейшее использование [5].

Анализ сварных соединений вагонов показал, что состояние сварных соединений рамы вагонов в целом удовлетворительное, за исключением двух сварных швов, которые требуют восстановления сваркой [7].

При проведении ультразвукового контроля сварных соединений обнаружены единичные внутренние дефекты. Данные дефекты регламентированы устранением сваркой с предварительной разделкой соответствующих зон до чистого металла [7].

Анализ величины коррозионного износа вагонов определил остаточные толщины основных несущих элементов кузова. Их состояние в целом удовлетворяет нормативным

требованиям [2]. При этом исследованные вагоны полностью соответствуют требованиям по коррозионному износу [3].

Измерением напряжений в несущих элементах кузова вагонов в ходе контрольных испытаний при соударениях установлено, что максимальные напряжения не превышают предельно допустимые значения, целостность конструкции пассажирского вагона не нарушена. Испытываемые вагоны после истечения продленного срока службы продолжают соответствовать требованиям [5].

Измерение напряжений в несущих элементах кузова вагонов в ходе контрольных испытаний при проведении сброса с клиньев позволило получить необходимые данные для проведения расчетов циклической долговечности для базовых элементов конструкции.

Измерением напряжений при квазистатических нагрузках растяжения и сжатия в несущих элементах кузова установлено, что максимальные напряжения по растяжению и сжатию соответствуют нормативным параметрам, разрушений не выявлено и целостность конструкции не нарушена. Вагоны после истечения продленного срока службы продолжают соответствовать требованиям [5].

На основании проведенных расчетов остаточный ресурс пассажирского вагона модели 47К [11] (вагона 1), полностью выработавшего продленный срок службы (40 лет с момента постройки), и результатов оценки его коррозионных повреждений до достижения одним из элементов браковочных критериев [3] составляет 40,9 лет (вариант № 1).

При наиболее неблагоприятном варианте коррозионного износа (вариант № 3) остаточный срок службы такого вагона составит 6,5 лет при условии своевременного проведения плановых видов ремонта и технического обслуживания.

Вместе с тем минимальный остаточный ресурс пассажирского вагона модели 47К, полностью выработавшего нормативный продленный срок службы (40 лет с момента постройки), гарантирует нахождение вагона в технически исправном состоянии до достижения минимально допустимых коррозионных повреждений в течение 12,5 лет.

На основании проведенных расчетов циклической долговечности [10, 13] установлено, что общий срок службы базовых элементов конструкции вагона модели 47К составляет не менее 63 лет с момента постройки вагона. Таким образом, исследуемый вагон имеет остаточный ресурс не менее 23 лет.

Список литературы

1. Вагоны пассажирские цельнометаллические. Руководство по капитальному ремонту (КР-2), ЛВ1.0030 РК. – Москва : ОАО «РЖД», 2019. – 98 с. – Текст : непосредственный.
2. Вагоны пассажирские. Руководство по капитально-восстановительному ремонту (КВР) 046 ПКБ ЦЛ 2007РК. – Москва : ОАО «РЖД», 2007. – 84 с. – Текст : непосредственный.
3. Вагоны пассажирские. Руководство по капитальному ремонту (КР-1), ЛВ1.0031 РК. – Москва : ОАО «РЖД», 2019. – 112 с. – Текст : непосредственный.
4. ГОСТ 33788–2016. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и динамические качества. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 46 с. – Текст : непосредственный.
5. ГОСТ 34681–2020. Вагоны пассажирские локомотивной тяги. Общие технические требования. – Москва : Стандартинформ, 2020. – 40 с. – Текст : непосредственный.
6. ГОСТ Р ИСО 6520-1–2012 Сварка и родственные процессы. Классификация дефектов геометрии и сплошности в металлических материалах. Часть 1. Сварка плавлением. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 36 с. – Текст : непосредственный.
7. Инструкция по сварке и наплавке узлов и деталей при ремонте пассажирских вагонов ЦЛ-201-2019 (приложение № 53 к протоколу Совета по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества, протокол от 15 – 16 октября 2019 г. № 71). – Москва : АО «ВНИИЖТ», 2019. – 185 с. – Текст : непосредственный.
8. Коршунов, С. Д. Разработка методики оценки ресурса несущих конструкций вагонов, прошедших капитально-восстановительный ремонт / С. Д. Коршунов, Д. Я. Антипин, Ю. М. Черкашин. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТа. – 2011. – № 1. – С. 5–8.
9. Коршунов, С. Д. Совершенствование метода оценки несущей способности и остаточного ресурса кузовов пассажирских вагонов после ремонта : специальность 05.22.07

«Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Коршунов Сергей Дмитриевич ; Брянский гос. техн. ун-т. – Брянск, 2014. – 171 с. – Текст : непосредственный

10. Нормы для расчета и проектирования новых и модернизируемых вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – Москва : ВНИИВ-ВНИИЖТ, 1983. – Текст : непосредственный.

11. Положение о продлении срока службы пассажирских вагонов, курсирующих в международном сообщении. Утверждено Советом по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества, протокол от 21-22.10.2014 № 61. – Москва : ОАО «ВНИИЖТ», 2014. – 35 с. – Текст : непосредственный.

12. ПР НК В.5. Правила неразрушающего контроля сварных соединений при ремонте пассажирских вагонов. Специальные требования. – Москва : АО «НИИ мостов», 2019. – 62 с. – Текст : непосредственный.

13. РД 24.050.37–95. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества. – Москва : ГосНИИВ, 1995. – Текст : непосредственный.

14. Третьяков, А. В. Продление срока службы подвижного состава : монография / А. В. Третьяков. – Москва : МБА, 2011. – 304 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Passenger cars are all-metal. Overhaul manual (KR-2), LV1.0030 RK, Moscow, JSC «Russian Railways» Publ., 2019, 98 p. (In Russian).

2. Passenger cars. Manual on capital repair (KVR) 046 PKB TSL 2007 RK. Moscow, JSC «Russian Railways» Publ., 2007, 84 p. (In Russian).

3. Passenger cars. Manual for major repairs (KR-1), LV1.0031 RK. Moscow, JSC «Russian Railways» Publ., 2019, 112 p. (In Russian).

4. GOST 33788–2016. Freight and passenger cars. Methods of testing for strength and dynamic qualities. Moscow, Standartinform Publ., 2016, 46 p. (In Russian).

5. GOST 34681–2020. Passenger cars of locomotive traction. General technical requirements, Moscow, Standartinform Publ., 2020, 40 p. (In Russian).

6. National Standard ISO 6520-1–2012 Welding and related processes. Classification of geometry and continuity defects in metallic materials. Part 1. Fusion welding, Moscow, Standartinform Publ., 2014, 36 p. (In Russian).

7. Instructions for welding and routing of assemblies and parts during the repair of passenger cars CL-201-2019 (Appendix no. 53 to the Protocol of the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States, Protocol no. 71 dated October 15-16, 2019), Moscow, JSC «VNIIZHT» Publ., 2019, 185 p. (In Russian).

8. Korshunov S.D., Antipin D.Ya., Cherkashin Yu.M. Development of a methodology for assessing the resource of load-bearing structures of wagons that have undergone capital repairs. *Vestnik VNIIZhTa – Russian Railway Science Journal*, 2011, no. 1, pp. 5-8 (In Russian).

9. Korshunov S.D. *Sovershenstvovanie metoda otsenki nesushchei sposobnosti i ostatochnogo resursa kuzovov passazhirskikh vagonov posle remonta* (Improving the method of assessing the carrying capacity and residual life of passenger car bodies after repair). Doctor's thesis, Bryansk, Bryansk State Technical University, 2014, 171 p. (In Russian).

10. Norms for the calculation and design of new and modernized railcars of the MPC gauge of 1520 mm (non-self-propelled), Moscow, VNIIV-VNIIZhT Publ., 1983 (In Russian).

11. Regulations on extending the service life of passenger cars plying in international traffic. Approved by the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States, Protocol No. 61 dated 21-22.10.2014, Moscow, JSC «VNIIZHT» Publ., 2014, 35 p. (In Russian).

12. ПР НК В.5. Rules of non-destructive testing of welded joints during the repair of passenger cars. Special requirements, Moscow, JSC «Research Institute of Bridges» Publ., 2019, 62 p. (In Russian).

13. RD 24.050.37–95 Freight and passenger cars. Methods of testing for strength and driving performance, Moscow, GosNIIV Publ., 1995 (In Russian).

14. Tretyakov A.B. *Prodlenie sroka sluzhby podvizhnogo sostava: monografiia* [Prolongation of the service life of rolling stock: monograph]. Moscow: MBA Publ., 2011, 304 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Евсеев Дмитрий Геннадьевич

Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ)).

Новосущевская ул., д. 22, ст. 1, г. Москва, 127055, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», РУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (985) 769-60-78.

E-mail: evseevvg@gmail.com

Лагутин Сергей Викторович

Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ)).

Новосущевская ул., д. 22, ст. 1, г. Москва, 127055, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», РУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (985) 242-72-22.

E-mail: lagutin.seryoga@yandex.ru

Шинкарук Андрей Сергеевич

АО «Федеральная пассажирская компания» (АО «ФПК»).

Маши Порываевой ул., д. 34, г. Москва, 107078, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, главный ревизор по безопасности движения поездов.

Тел.: +7 (925) 804-44-95.

E-mail: shinkarukas@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Евсеев, Д. Г. Оценка технического состояния пассажирского вагона и рекомендации по определению его остаточного ресурса / Д. Г. Евсеев, С. В. Лагутин, А. С. Шинкарук. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 2 (54). – С. 49 – 58.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Evseev Dmitriy Gennad'evich

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

22, Novosushchevskaya st., art. 1, Moscow, 127055, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor, professor of the department «Technology of transport engineering and repair of rolling stock», RUT (MIIT).

Phone: +7 (985) 769-60-78.

E-mail: evseevvg@gmail.com

Lagutin Sergey Viktorovich

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

22, Novosushchevskaya st., art. 1, Moscow, 127055, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department «Technology of transport engineering and repair of rolling stock», RUT (MIIT).

Phone: +7 (985) 242-72-22.

E-mail: lagutin.seryoga@yandex.ru

Shinkaruk Andrey Sergeevich

JSC «Federal Passenger Company» (JSC «FPC»).

34, Masha Poryvaeva st., Moscow, 107078, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, chief auditor for train safety.

Phone: +7 (925) 804-44-95.

E-mail: shinkarukas@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Evseev D.G., Lagutin S.V., Shinkaruk A.S. Assessment of the technical condition of a passenger car and recommendations for determining its residual life. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 2 (54), pp. 49-58 (In Russian).

УДК 621.332.23: 625.14: 656.25: 517.54

С. А. Лунев¹, С. В. Гришечко², В. В. Дремин²

¹Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ)), г. Москва, Российская Федерация;

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

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОБРАТНОЙ ТЯГОВОЙ РЕЛЬСОВОЙ СЕТИ

Аннотация. В статье рассматриваются пути обеспечения надежной работы перегонных и станционных устройств СЦБ, а также снижения непроизводительных потерь электроэнергии за счет уменьшения значений обратного тягового тока в рельсовой сети. Актуальность рассматриваемых вопросов определяется применением конструкции балластной призмы с использованием таких изоляционных материалов, как геотекстиль и пеноплекс, а также организацией движения поездов повышенной массы и длины. Предлагается

поставленную цель решить за счет установки дополнительных рабочих заземлений средних точек дроссель-трансформаторов в местах установки междупутных перемычек на перегоне. В статье приведены результаты экспериментальных исследований, а также опытной эксплуатации предложенных технических решений на ряде участков Западно-Сибирской железной дороги, электрифицированных на переменном токе, подтверждающие их эффективность. Отдельно рассмотрены принципы реализации оптимальной конфигурации обратной тяговой рельсовой сети на станции. С целью уменьшения потерь электрической энергии в обратной тяговой рельсовой сети предложено реализовать фидер отсоса в виде индивидуальных глубинных заземлителей средних точек дроссель-трансформаторов, электрически соединенных с контуром заземления тяговой подстанции и между собой через землю. Предложены варианты увеличения числа глубинных заземлителей без нарушения рациональной конфигурации замкнутых контуров обратного тягового тока на основе применения технологии построения обратной тяговой сети с использованием фильтрующих устройств, обеспечивающих повышенное сопротивление стеканию сигнального тока. Данные решения, по мнению авторов, позволят снизить расходы электроэнергии на тягу поездов за счет организации оптимальной электрической цепи протекания обратного тягового тока.

Ключевые слова: обратный тяговый ток, рабочее заземление, дроссель-трансформатор, рельсовая сеть, глубинный заземлитель.

Sergey A. Lunev¹, Sergey V. Grishechko², Vladimir V. Dremin²

¹Russian University of Transport (RUT (MIIT)), Moscow, the Russian Federation;

²Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

INCREASING THE REVERSE TRACTION RAIL NETWORK PERFORMANCE EFFICIENCY

Abstract. The article discusses ways to ensure the reliable operation of the stage and station devices of the signaling system, as well as to reduce unproductive losses of electricity by reducing the values of the reverse traction current in the rail network. The relevance of the issues under consideration is determined by the use of the design of a ballast prism using such insulating materials as geotextiles and penoplex, as well as the organization of the movement of trains of increased mass and length. The task is proposed to be solved by installing additional working grounding of the middle points of the chokes-transformers at the places of installation of inter-track jumpers on the station-to-station block. The article presents the results of experimental studies, as well as trial operation of the proposed technical solutions on a number of sections of the West Siberian Railway, electrified on alternating current, confirming their effectiveness. The principles of implementing the optimal configuration of the reverse traction rail network at the station are considered separately. In order to reduce the loss of electrical energy in the reverse traction rail network, it is proposed to implement the suction feeder in the form of individual deep ground electrodes of the middle points of the choke-transformers, electrically connected to the ground loop of the traction substation and to each other through the ground. Options for increasing the number of deep ground electrode systems without violating the rational configuration of closed reverse traction current circuits are proposed based on the use of technology for constructing a reverse traction network using filtering devices that provide increased resistance to signal current draining. These solutions, according to the authors, will reduce the cost of electricity for train traction due to the organization of an optimal electrical circuit for the flow of reverse traction current.

Keywords: reverse traction current, working grounding, impedance bond, rail network, deep grounding conductor.

Развитие железнодорожных перевозок предусматривает увеличение пропускной и провозной способности участков железных дорог, в частности, за счет обращения грузовых поездов повышенного веса и длины и развития высокоскоростного железнодорожного сообщения. В связи с этим ужесточаются требования, предъявляемые к инфраструктуре, в том числе в части сопряжения работы устройств СЦБ и системы тягового электроснабжения, а также других факторов, обеспечивающих безопасность движения поездов. Согласно технической политике ОАО «РЖД» в качестве основной конструкции принят бесстыковой путь на железобетонных шпалах, который широко применяется на многих железных дорогах Российской Федерации. В рамках национального проекта правительством Российской Федерации 30 сентября 2018 г. распоряжением № 2101-р утвержден план модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 г., куда включены федеральные проекты «Высокоскоростное железнодорожное сообщение» и «Железнодорожный транспорт и транзит». Реализация этих проектов требует комплексного подхода к построению новых и модернизации существующих объектов инфраструктуры железных дорог.

Необходимость комплексного подхода к решению этих задач объясняется следующими обстоятельствами.

До настоящего времени не уделялось большого внимания вопросам повышения эффективности функционирования обратной тяговой рельсовой сети (ОТРС). Однако в последние годы появился ряд факторов, которые в совокупности могут привести к увеличению значений обратного тягового тока в ОТРС. В качестве таких факторов можно назвать следующие: повышение веса поезда, увеличение скоростей движения и применение новой конструкции балластной призмы с использованием геотекстиля и плит пеноплекса (пенополистирола), приводящее к высокому переходному сопротивлению «рельс – земля». Как результат, возможно возникновение больших значений асимметрии обратного тягового тока в рельсовой линии, что в свою очередь приводит к усилению влияния обратного тягового тока на работу рельсовых цепей, устройств автоматической локомотивной сигнализации (АЛСН) и другой аппаратуры железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ), а также появлению непроизводительных потерь электроэнергии.

Таким образом, с появлением перечисленных выше факторов изменились условия работы устройств СЦБ, в частности, рельсовых цепей. Необходимость рассмотрения новых условий работы устройств СЦБ, а также их электромагнитной совместимости с ОТРС также подтверждается статистикой участвовавших случаев отказов и, как следствие, задержками поездов на участках бесстыкового пути [1]. С целью проверки готовности инфраструктуры к пропуску грузовых поездов повышенной массы и длины и повышения безопасности движения на некоторых участках Западно-Сибирской железной дороги с электрической тягой переменного тока был проведен ряд экспериментальных исследований [2]. По результатам исследований было установлено значительное повышение сопротивления изоляции рельсовой линии (более 10 Ом·км) и увеличение зоны растекания тягового тока от локомотива, длина которой превышает длину межподстанционной зоны. Эти данные резко отличаются от данных на участках со старой конструкцией балластной призмы при электротяге переменного тока, на которых весь ток электровоза стекает с рельсов в районе 3 – 4 км от него [3]. Очевидно, что кроме подтвержденного факта влияния на работу устройств СЦБ такое увеличение длины зоны растекания тягового тока по рельсам приводит и к дополнительным потерям электроэнергии. Таким образом, проведенная в ходе экспериментальных исследований оценка показала, что в результате сохранения значительной части обратного тягового тока в ОТРС возникает также мешающее воздействие протекающего в рельсовой сети обратного тягового тока на работу аппаратуры ЖАТ [4].

С учетом приведенных результатов исследований была предложена установка рабочего заземления средней точки дроссель-трансформатора в местах установки междупутных перемычек на перегоне и на тяговых подстанциях с целью снижения эквивалентного сопротивления ОТРС [5]. Предполагалось, что установка такого заземления позволит уменьшить значение проходящего по ОТРС обратного тягового тока и, как следствие, снизить непроизводительные потери электроэнергии на тягу поездов, а также значительно уменьшить влияние обратного тягового тока на работу рельсовых цепей и аппаратуры АЛСН.

Оценка эффективности применения такого рабочего заземления была проведена в ходе экспериментальных исследований на участке Западно-Сибирской железной дороги Карасук – Зубково, результаты которых приведены в статье [6]. Анализ полученных результатов показал, что после установки только одного рабочего заземления уровень обратного тягового тока в ОТРС снижается практически вдвое. Следовательно, установка дополнительных рабочих заземлений на межподстанционной зоне позволит не только уменьшить уровень тока в рельсовой сети, обеспечив надежную работу устройств ЖАТ, но и снизить расходы электроэнергии на тягу поездов за счет организации оптимальной электрической цепи протекания обратного тягового тока.

По результатам проведенных экспериментов было предложено для железных дорог, электрифицированных электротягой переменного тока, при реализации перспективного

грузового тяжеловесного и высокоскоростного движения организовывать систему канализации обратного тягового тока с применением технологии, защищенной патентом на изобретение [7].

Предполагается, что выполнение предложенных мероприятий позволит увеличить массы грузовых поездов, участковую скорость их движения, уменьшить токи в ОТПС, повысить устойчивость работы рельсовых цепей и других устройств СЦБ.

По результатам проведенных исследований службой III Западно-Сибирской железной дороги был направлен запрос в Управление автоматики и телемеханики Центральной дирекции инфраструктуры ОАО «РЖД» о разрешении опытной эксплуатации предложенных технических решений в части заземления междупутных перемычек. В целях накопления опыта эффективного применения схемы по обеспечению электромагнитной совместимости тяговой сети переменного тока с устройствами автоблокировки и снижения асимметрии и величины обратного тягового тока в ОТПС решением Проектно-конструкторского бюро по инфраструктуре – филиала ОАО «РЖД» – была разрешена опытная эксплуатация предложенных технических решений на ряде участков Западно-Сибирской железной дороги. При этом предполагалось выполнять заземление междупутных перемычек в соответствии с требованиями, указанными в разд. 5.12 Свода правил СП 235.1326000.2015 «Железнодорожная автоматика и телемеханика. Правила проектирования», т. е. с учетом сохранения количества рельсовых цепей в контуре. По итогам опытной эксплуатации в 2021 г. руководством Западно-Сибирской железной дороги результаты работ по организации заземления средней точки дроссель-трансформатора в местах установки междупутных перемычек на перегоне признаны положительными и принято решение о проведении аналогичных работ и на других участках, оборудованных электротягой переменного тока с новой конструкцией балластной призмы.

Для увеличения положительного эффекта предложенных мероприятий целесообразно рассмотреть возможность применения рабочих заземлений не только на перегонах, но и на станциях.

В настоящее время повышение эффективности системы пропуска обратного тягового тока на станции достигается за счет рационального выбора места установки и количества междупутных и междурельсовых перемычек, а также сокращения доли ручного труда при построении и внесении изменений в схемы канализации обратного тягового тока в случае капитального ремонта или реконструкции за счет автоматизации рутинных проектных операций. При этом требуется обеспечение выполнения нормативных требований, указанных в источнике [8] с учетом изменений, указанных в документе [9], а именно:

1) количество рельсовых цепей в простом контуре (при отсутствии параллельных ветвей для тягового тока) или эквивалентном контуре (при наличии таких ветвей) должно быть не менее 10 при частоте сигнального тока 25 Гц или не менее 6 при частоте 50 Гц;

2) для сигнального тока тональной частоты длина обходной цепи по замкнутому контуру (простому или эквивалентному) должна быть не менее четырехкратной длины самой длинной рельсовой линии, входящей в этот контур.

Выполнение данных требований при построении систем пропуска обратного тягового тока обеспечивает безопасность движения поездов, однако является трудоемкой задачей, особенно в период проведения реконструкции путевого развития ОТПС. Как показывает опыт, во многих случаях схемы ОТПС на станциях содержат ошибки, допущенные при их синтезе, особенно для крупных станций и для станций стыкования.

Проверка выполнения указанных выше требований должна проводиться для всех элементарных ветвей (не имеющих параллельных ответвлений), входящих в сложный разветвленный контур ОТПС. Рассмотрим варианты такой проверки. Так, в статье [10] рассматривается простейший случай (рисунок 1), когда ОТПС состоит из трех смежных контуров.

Как следует из рисунка 1, такая ОТПС содержит три контура: $N1$, $N2$ и $N3$. Соответственно имеется и три общих ветви, количество рельсовых цепей в которых равно n_{1-2} , n_{2-3} и n_{1-3} .

Если два контура имеют общую последовательность рельсовых цепей, то они являются смежными. Для двух смежных контуров число рельсовых цепей общей ветви необходимо определять в соответствии с Указанием [9].

Тогда понижающий коэффициент для определения необходимого числа рельсовых цепей относительно первого контура $N1$, смежного с контуром $N2$, как показано в работе [10], составит:

для кодовых рельсовых цепей –

$$K = \frac{n_{1-2}}{n_2}, \quad (1)$$

где n_{1-2} – число рельсовых цепей в общей ветви контуров;
 n_2 – число рельсовых цепей во втором контуре.

Для тональных рельсовых цепей –

$$K = \frac{l_{1-2}}{l_2}, \quad (2)$$

где l_{1-2} – длина общей смежной ветви;
 l_2 – длина второго контура.

В таком случае формулы для расчета эквивалентного количества рельсовых цепей в контурах будут иметь следующий вид:

а) эквивалентное количество рельсовых цепей в первом контуре $N1$, смежном с контуром $N2$,

$$n'_1 = n_1 - K \cdot n_{1-2}, \quad (3)$$

с учетом формулы (1) получаем:

$$n'_1 = n_1 - \frac{n_{1-2}^2}{n_2}; \quad (4)$$

б) эквивалентное количество рельсовых цепей во втором контуре $N2$, смежном с контуром $N1$,

$$n'_2 = n_2 - \frac{n_{1-2}^2}{n_1}; \quad (5)$$

в) эквивалентное количество рельсовых цепей в третьем контуре $N3$, смежном с контуром $N1$,

$$n'_3 = n_3 - \frac{n_{1-3}^2}{n_1}, \quad (6)$$

где n_1, n_2, n_3 – число рельсовых цепей в первом, втором и третьем контурах соответственно.

Из формул (3) – (6) следует, что реальное количество рельсовых цепей (реальная длина обходной цепи для тональных частот) в исходном контуре будет уменьшено за счет добавления к нему смежного, параллельного контура.

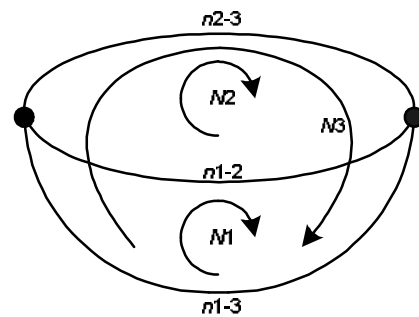


Рисунок 1 – Схема трехконтурной ОТПС

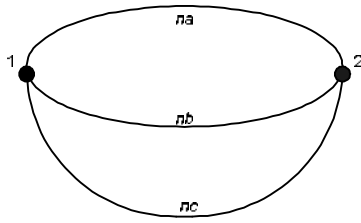


Рисунок 2 – Пример изображения ОТПС с параллельным соединением трех ветвей

Второй вариант проверки выполнения требований безопасности при построении схемы ОТПС на станции [9] в качестве исходных данных использует не значения количества рельсовых цепей в контурах, а количество рельсовых цепей в ветвях a , b и c – n_a , n_b , n_c (рисунок 2).

В этом случае выполнение расчетов можно производить по следующим формулам [9]:

а) для ветви a –

$$n_{a \text{ экв}} = n_a + \frac{n_b \cdot n_c}{n_b + n_c}; \quad (7)$$

б) для ветви b –

$$n_{b \text{ экв}} = n_b + \frac{n_a \cdot n_c}{n_a + n_c}; \quad (8)$$

в) для ветви c –

$$n_{c \text{ экв}} = n_c + \frac{n_a \cdot n_b}{n_a + n_b}. \quad (9)$$

Вместе с тем в указании [9] не приводится информация о том, каким образом определяется эквивалентное количество рельсовых цепей в ветвях контура при наличии в схеме ОТПС k параллельных ветвей, где $k > 2$. В этом случае для упрощения вычислений, как показано в статье [10], целесообразно ввести понятие симметрического многочлена. Так, например, многочлен от x и y называется симметрическим, если он не изменяется при замене x на y и y на x . Элементарными симметрическими многочленами называются многочлены $x + y$ и $x \cdot y$, которые обозначаются следующим образом: $\sigma_1 = x + y$; $\sigma_2 = x \cdot y$.

С учетом этого формула (7) для ветви a приобретает вид:

$$n_{a \text{ экв}} = n_a + \frac{\sigma_2}{\sigma_1}, \quad (10)$$

где $\sigma_1 = n_b + n_c$; $\sigma_2 = n_b \cdot n_c$ – симметрические многочлены ветвей b и c .

Выражения для ветвей b и c могут быть получены аналогичным образом.

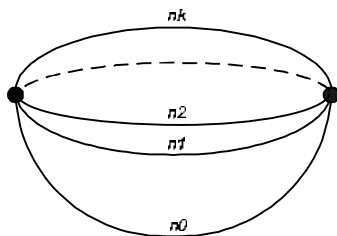


Рисунок 3 – Пример изображения сложной схемы ОТПС с параллельным соединением k ветвей

Фрагмент ОТПС, в составе которой имеется k параллельных ветвей, приведен на рисунке 3.

В этом случае, как указано в статье [10], формула (7) для нахождения эквивалентного количества рельсовых цепей в контуре примет вид:

$$n_{0\text{ЭКВ}} = n_0 + \frac{n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \cdot \dots \cdot n_k}{n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \cdot \dots \cdot n_k + n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \cdot \dots \cdot n_k + \dots + n_1 \cdot n_2 \cdot \dots \cdot n_i \cdot \dots \cdot n_k + \dots + n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \cdot \dots \cdot n_k}, \quad (11)$$

где k – количество параллельных ветвей.

Обозначение $\overline{n_i}$ означает отсутствие отмеченного сомножителя в произведении. Вид выражения (11) можно упростить, если воспользоваться понятием элементарного симметрического многочлена от k переменных [10]:

$$n_{0\text{ЭКВ}} = n_0 + \frac{\sigma_k}{\sigma_{k-1}}. \quad (12)$$

Для получения минимальной оценки эквивалентного количества рельсовых цепей при параллельном соединении k ветвей, входящих в данный эквивалентный контур, в работе [10] предложено граничное условие, однозначно определяющее рациональную конфигурацию эквивалентного замкнутого контура ОТПС:

$$\frac{\sigma_k}{\sigma_{k-1}} \geq \frac{n_1}{k}. \quad (13)$$

Аналогично граничное условие, однозначно определяющее нерациональную конфигурацию эквивалентного замкнутого контура и позволяющее получить максимальную оценку значений эквивалентного количества рельсовых цепей параллельного соединения k ветвей, входящих в данный эквивалентный контур, имеет вид:

$$\frac{\sigma_k}{\sigma_{k-1}} \leq \frac{\sigma_1}{k^2}. \quad (14)$$

На основании полученных неравенств были сформулированы следующие алгоритмы при рассмотрении трех или более параллельных между собой ветвей. В первую очередь при анализе замкнутых контуров находится наименьшая ветвь n_0 , относительно которой будут выполняться вычисления. Если число входящих в эту ветвь рельсовых цепей превышает значение 10 (для частоты тока 25 Гц) или 6 (для частоты тока 50 Гц), то такие рассматриваемые контуры будут соответствовать нормам пропуска обратного тягового тока. Если данное условие не выполняется, то осуществляется переход к нахождению достаточного условия рациональной конфигурации системы ОТПС. Выбирается наименьшая из оставшихся ветвей n_1 , делится на количество этих ветвей, прибавляется ветвь n_0 и проверяется на соответствие указанным выше требованиям. Далее проверяется необходимое условие соответствия правилам составления систем ОТПС и т. д.

При анализе замкнутых контуров, состоящих из рельсовых линий, как канала для пропуска одновременно тяговых токов и токов тональной частоты в каждой параллельной ветви находится рельсовая линия с максимальной длиной L_{max} . Если длина обходной цепи с учетом эквивалентности контуров превышает значение четырехкратной максимальной длины рельсовой линии, входящей в состав этой ветви, то контур относительно данной ветви будет соответствовать нормативным требованиям пропуска обратного тягового тока. Далее процесс синтеза и анализа продолжается для каждой найденной параллельной ветви и на основании полученных результатов делается вывод о соответствии нормам всей ОТПС в целом.

Для железных дорог, оборудованных электротягой, известна проблема повреждения цепей обратного тока тяговых подстанций. Использование в ОТПС протяженных тяговых соединителей (отсосов) негативно сказывается на работе системы тягового электроснабжения и смежных устройств. Таким системам присущи следующие недостатки:

- низкая надежность вследствие применения отсасывающих линий;
- существенные потери электрической энергии в тяговой сети.

Поэтому создание станционной ОТПРС, позволяющей повысить надежность электроснабжения тяговых потребителей и снизить потери в тяговой сети, является актуальной задачей.

Для её решения в схеме ОТПРС на станции в патенте [11] предлагается соединить контур заземления тяговой подстанции со средней точкой выводов дроссель-трансформатора посредством фидера отсоса и с землей. При этом фидер отсоса выполняется в виде индивидуальных глубинных заземлителей, электрически соединенных с контуром заземления тяговой подстанции и между собой через землю. Таким образом, для повышения эффективности работы ОТПРС станции предлагается применить ранее предложенную технологию повышения эффективности ОТПРС на перегонах. Схема такой станционной ОТПРС приведена на рисунке 4.

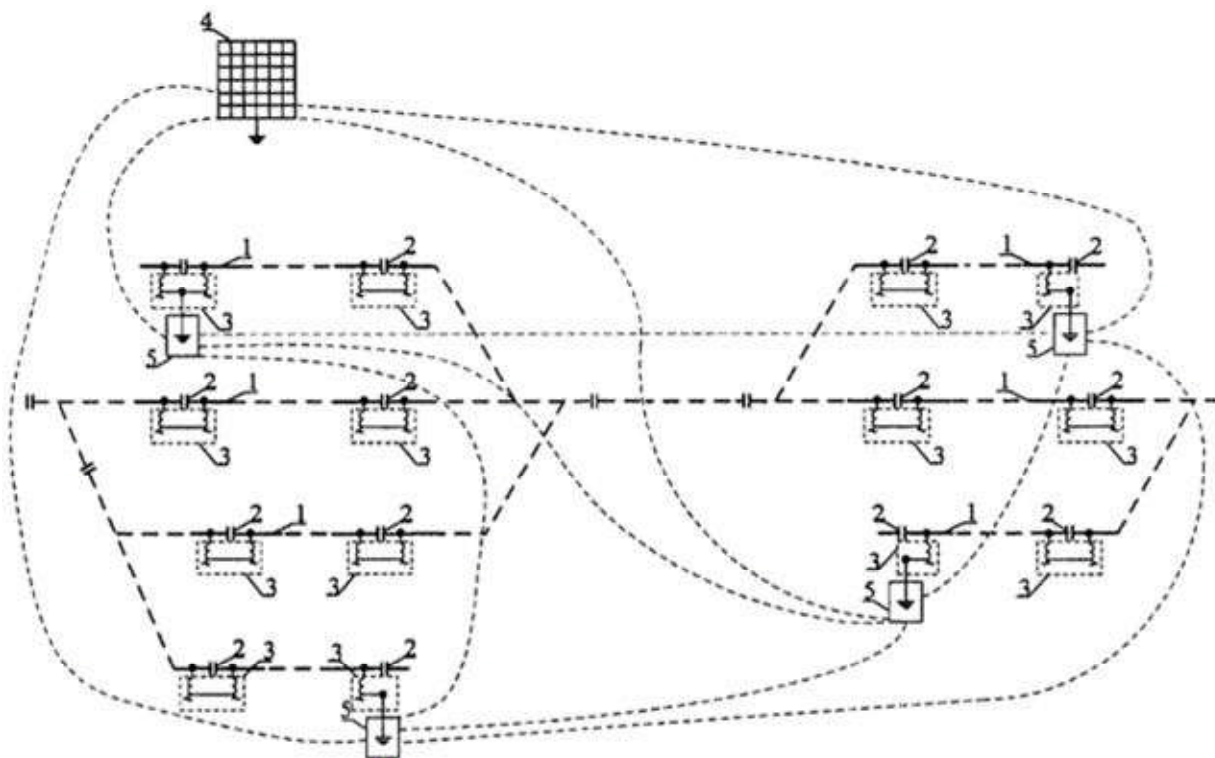


Рисунок 4 – Схема ОТПРС на станции: 1 – рельсовая цепь; 2 – изолирующий стык; 3 – дроссель-трансформатор; 4 – контур заземления тяговой подстанции; 5 – глубинный заземлитель

При этом индивидуальные глубинные заземлители подключаются к средним точкам определенных дроссель-трансформаторов. Дроссель-трансформаторы, подлежащие подключению к индивидуальным глубинным заземлителям на станции, должны определяться с учетом выполнения нормативных требований [9, 10], связанных с количеством (длиной) рельсовых цепей, расположенных между точками подключения индивидуальных глубинных заземлителей. Выбор таких дроссель-трансформаторов осуществляется по приведенной выше методике.

В результате повышается надежность электроснабжения тяговых потребителей и снижаются потери в тяговой сети. Максимальный эффект от применения предложенной схемы ОТПРС достигается для станций, наиболее удаленных от тяговой подстанции.

Вместе с тем предлагаемая схема ОТПРС содержит ограниченное количество заземлителей, применяемых на станции, в соответствии с приведенной выше методикой расчета

замкнутых тяговых контуров, исключая взаимное влияние рельсовых цепей, находящихся в одном контуре. В связи с этим в случае выхода из строя хотя бы одного глубинного заземлителя ухудшаются условия канализации обратного тягового тока и, как следствие, происходит увеличение потерь электрической энергии в тяговой сети.

Для создания схемы ОТПС на станции, позволяющей повысить надежность электро-снабжения тяговых потребителей, снизить потери в тяговой сети и повысить надежность работы смежных устройств инфраструктуры, в том числе рельсовых цепей, за счет увеличения количества глубинных заземлителей на станции, на наш взгляд, следует вновь обратиться к технологии построения ОТПС на перегоне [7], предполагающей заземление средних точек дроссель-трансформаторов через фильтрующие устройства, обеспечивающее сопротивление стеканию сигнального тока более 5 Ом, что удовлетворяет требованиям пункта 2.3.5 Инструкции ЦЭ-191 по подключению к средним точкам дроссель-трансформаторов. Увеличение числа глубинных заземлителей при этом может быть достигнуто за счет установки дополнительных дроссель-трансформаторов в местах разрыва замкнутых тяговых контуров.

Таким образом, вследствие применения в схеме канализации обратного тягового тока большого количества индивидуальных глубинных заземлителей выход из строя одного или нескольких глубинных заземлителей не приведет к уменьшению надежности схемы канализации обратного тягового тока и сбоям в работе смежных устройств инфраструктуры.

На станции всегда будет гарантировано протекание обратного тягового тока от рельсовой сети до тяговой подстанции, что повышает надежность работы системы тягового электроснабжения. Использование большого количества глубинных заземлителей в схеме пропуска обратного тягового тока существенно снижает сопротивление цепи в целом, а следовательно, уменьшает потери в тяговой сети. Снижение величины обратного тягового тока в рельсах в качестве дополнительного эффекта способствует уменьшению количества нарушений в работе смежных устройств инфраструктуры, т. е. в станционных рельсовых цепях.

Список литературы

1. Служба автоматики и телемеханики Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры. Анализ работы устройств сигнализации, централизации и блокировки за декабрь и 12 месяцев 2019 года. – Новосибирск : Западно-Сибирская дирекция инфраструктуры. – 2020. – 16 с. – Текст : непосредственный.
2. Лунев, С. А. Исследование переходного сопротивления «рельс – земля» на бесстыковом пути / С. А. Лунев, С. С. Сероштанов, А. Г. Ходкевич. – Текст : непосредственный // Автоматика, связь, информатика. – 2008. – № 5. – С. 35–36.
3. Балугев, Н. Н. Нормирование сопротивления элементов тяговой рельсовой сети / Н. Н. Балугев, В. И. Шаманов. – Текст : непосредственный // Автоматика, связь, информатика. – 2014. – № 2. – С. 13–18.
4. Исследование влияния усиленного капитального ремонта пути на обратную тяговую сеть / В. В. Дремин, С. А. Лунев, С. С. Сероштанов, А. Г. Ходкевич. – Текст : непосредственный // Автоматика, связь, информатика. – 2020. – № 2. – С. 9–11.
5. Методические указания по применению устройств защиты от перенапряжения в устройствах ЖАТ № 12013/ЦДИ от 31 марта 2016 г. – Москва : Управление автоматики и телемеханики ЦДИ ОАО «РЖД». – 179 с. – Текст : непосредственный.
6. Эффективность применения рабочего заземления в системе тягового электроснабжения / В. В. Дремин, С. А. Лунев, С. С. Сероштанов, А. Г. Ходкевич. – Текст : непосредственный // Автоматика, связь, информатика. – 2020. – № 4. – С. 5–7.

7. Патент № 2623030 Российская Федерация, МПК В60М30/00. Тяговая сеть переменного тока : № 2015151370 : заявлено 30.11.2015 : опубликовано 21.06.2017 / Дремин В. В., Лунев С. А., Сероштанов С. С., Ходкевич А. Г. – 4 с.: ил. – Текст : непосредственный.

8. Проектирование двухниточных планов станций с электрическими рельсовыми цепями 411505 – ТМП. – Санкт-Петербург : ГТСС, 2015. – 39 с. – Текст : непосредственный.

9. Указание № 1247/1545, шифр РЦ64. Проектирование двухниточных планов станций с электрическими рельсовыми цепями. Изменение №1 410104-ТМП. – Санкт-Петербург : ГТСС, 2002. – 3 с. – Текст : непосредственный.

10. Применение теории графов для автоматизации процесса анализа схем канализации обратного тягового тока / С. А. Лунев, О. В. Гателюк [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник РГУПС. – 2008. – № 4. – С. 77–84.

11. Патент № 2662346 Российская Федерация, МПК В60М30/00. Схема канализации обратного тягового тока на станции : № 2017125901 : заявлено 18.07.2017 : опубликовано 25.07.2018 / Лунев С. А., Присухина И. В., Соколов М. М., Сероштанов С. С., Ходкевич А. Г. – 4 с.: ил. – Текст : непосредственный.

References

1. Automation and Telemechanics Service of the West Siberian Directorate of Infrastructure. Analysis of the operation of signaling, centralization and blocking devices for December and 12 months of 2019. Novosibirsk, West Siberian Directorate of Infrastructure Publ., 2020, 16 p. (In Russian).

2. Lunev S.A., Seroshtanov S.S., Hodkevich A.G. Investigation of rail-to-ground transient resistance on a seamless track. *Avtomatika, svyaz', informatika – Automation, communications, informatics*, 2008, no. 5, pp. 35-36 (In Russian).

3. Baluev N.N., Shamanov V.I. Standardization of the resistance of the elements of the traction rail network. *Avtomatika, svyaz', informatika – Automation, communications, informatics*, 2014, no. 2, pp. 13-18 (In Russian).

4. Dremin V.V., Lunev S.A., Seroshtanov S.S., Hodkevich A.G. Investigation of the effect of enhanced track overhaul on the reverse traction network. *Avtomatika, svyaz', informatika – Automation, communications, informatics*, 2020, no. 2, pp. 9-11 (In Russian).

5. Guidelines 12013–2016. Guidelines for the use of surge protection devices in railway automation and remote control devices, Moscow, Department of Automation and Telemechanics of the Central Directorate of Infrastructure of Russian Railways Publ., 2016, 179 p. (In Russian).

6. Dremin V.V., Lunev S.A., Seroshtanov S.S., Hodkevich A.G. The effectiveness of the use of working grounding in the traction power supply system. *Avtomatika, svyaz', informatika – Automation, communications, informatics*, 2020, no. 4, pp. 5-7 (In Russian).

7. Dremin V.V., Lunev S.A., Seroshtanov S.S., Hodkevich A.G. *Patent RU 2623030 C2*, 21.06.2017.

8. Typical design materials 411505 – TMP. Design of two-line station plans with electric track circuits. Saint Petersburg, JSC «Roszheldorproekt» Publ., 2015, 39 p. (In Russian).

9. Directive 1247/1545. Design of two-line station plans with electric track circuits. Change 1 410104-TMP. Saint Petersburg, State Institute for the Design of Transport, Communications and Signaling Publ., 2002, 3 p. (In Russian).

10. Lunev S.A., Gatelyuk O.V., Grishechko S.V., Seroshtanov S.S., Ayupov R.Sh. Application of graph theory to automate the process of analyzing reverse traction current sewage schemes. *Vestnik RGUPSa – Vestnik RGUPS*, 2008, no. 4, pp. 77-84 (In Russian).

11. Lunev S.A., Prisuina I.V., Sokolov M.M., Seroshtanov S.S., Hodkevich A.G. *Patent RU 2662346 C2*, 25.07.2018.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лунев Сергей Александрович

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы управления транспортной инфраструктурой», РУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (495) 649-19-29.

E-mail: slunev@mail.ru

Гришечко Сергей Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 44-39-01.

E-mail: svgrishechko@mail.ru

Дремин Владимир Валентинович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Старший преподаватель кафедры «Автоматика и телемеханика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 44-39-01.

E-mail: dremin-vladimir@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Лунев, С. А. Повышение эффективности функционирования обратной тяговой рельсовой сети / С. А. Лунев, С. В. Гришечко, В. В. Дремин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 2 (54). – С. 58 – 68.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lunev Sergey Alexandrovich

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

9, Obrazcova st., Moscow, 127994, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Transport infrastructure management systems», RUT (MIIT).

Phone: +7 (495) 649-19-29.

E-mail: slunev@mail.ru

Grishechko Sergey Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

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

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

E-mail: svgrishechko@mail.ru

Dremin Vladimir Valentinovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Senior Lecturer of the department «Automatics and Telemechanics», OSTU.

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

E-mail: dremin-vladimir@yandex.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Lunev S.A., Grishechko S.V., Dremin V.V. Increasing the reverse traction rail network performance efficiency. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 2 (54), pp. 58-68 (In Russian).

УДК 656.212.5:519.872.8

Н. Ю. Гончарова, Р. С. Большаков, Н. В. Давыдова

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), г. Иркутск, Российская Федерация

ОРГАНИЗАЦИЯ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК СМЕШАННОГО ТИПА. МУЛЬТИМОДАЛЬНЫЕ ТУРИСТИЧЕСКИЕ ПЕРЕВОЗКИ

Аннотация. В качестве предмета исследования выбраны железнодорожные пассажирские перевозки по туристическим маршрутам Восточно-Сибирской железной дороги. Оцениваются варианты смешанных пассажирских перевозок туристического типа на примере экскурсионных маршрутов Кругобайкальской железной дороги (КБЖД). Обработка пассажиропотока, следующего для отправки по туристическому маршруту КБЖД, из-за удаленности пункта отправления имеет некоторые сложности. Предлагается альтернативный вариант осуществления пассажирской перевозки, представляющий собой доставку пассажиров в конечный пункт туристического маршрута, что подразумевает реализацию крупного проекта по строительству моста в устье реки Ангара либо увеличение числа паромов и оборудование удобной паромной переправы с местами отдыха и питания для пассажиров.

Целью проведения исследований является анализ перспективных направлений развития туристических пассажирских перевозок с учетом их смешанной составляющей, зависящей от наличия различных видов

используемого транспорта. Оценка состояния туристических железнодорожных перевозок производится на основе комплексных представлений о системе пассажирских перевозок с учетом использования дополнительных видов транспорта. Проведенные исследования показывают, что целесообразность формирования устойчивых железнодорожных туристических маршрутов заключается в повышении их привлекательности вследствие улучшения условий для пассажиров путем использования альтернативных вариантов реализации этих маршрутов, что инициирует приток дополнительного числа пассажиров. Полученные результаты могут быть применены в процессе формирования смешанных туристических перевозок и при оценке масштабных инфраструктурных проектов, направленных на улучшение условий пребывания пассажиров в регионе.

Смешанные туристические перевозки являются перспективным направлением развития железнодорожного транспорта совместно с другими видами транспорта, что позволяет увеличить пассажирооборот. Оценивается возможность использования понятия «Мультимодальные туристические перевозки».

Ключевые слова: железнодорожные пассажирские перевозки, мультимодальность, смешанные перевозки, туристический пассажирооборот.

Natalya Yu. Goncharova, Roman S. Bolshakov, Nadezhda V. Davidova

Irkutsk State Transport University (ISTU), Irkutsk, the Russian Federation

ORGANIZATION OF PASSENGER TRAFFICS OF MIXED TYPE. MULTIMODAL TURISTIC TRAFFICS

Abstract. The subject of the research is passenger rail transportation along the tourist routes of the East Siberian Railway. Variants of mixed passenger transportation of tourist type are evaluated on the example of excursion routes of the Circum-Baikal Railway (CBR). Due to the remoteness of the point of departure, the processing of passenger traffic following to be sent along the tourist route of the Circum-Baikal Railway has some difficulties. An alternative option for the implementation of passenger transportation is proposed, which is the delivery of passengers to the final destination of the tourist route, which implies the implementation of a major project to build a bridge at the mouth of the Angara River or an increase in the number of ferries and the equipment of a convenient ferry crossing with places of rest and food for passengers.

The purpose of the research is to analyze promising directions for the development of tourist passenger traffic, taking into account their mixed component, which depends on the availability of various types of transport used. The assessment of the state of tourist rail transportation is based on systemic ideas about the system of passenger transportation, taking into account the use of additional modes of transport. The results of the research show the feasibility of forming sustainable railway tourist routes due to the influx of an additional number of passengers. The results obtained can be applied in the process of formation of mixed tourist traffic and in the evaluation of large-scale infrastructure projects aimed at improving the conditions for passengers in the region. Mixed tourist transportation is a promising direction for the development of railway transport together with other modes of transport, which allows increasing passenger traffic. The possibility of using the concept of «Multimodal tourist transportation» is evaluated.

Keywords: railway passenger transportation, multimodality, multimodal transportation, tourist passenger traffic.

Развитие холдинга ОАО «РЖД» ориентировано на достижение масштабных долгосрочных целей, связанных с улучшением эффективности взаимодействия элементов транспортного пространства и повышения качества предоставляемых транспортно-логистических услуг, что актуализирует решение задач, к основным из которых можно отнести совершенствование инфраструктуры перевозочных процессов, повышение конкурентоспособности в сфере грузовых перевозок, увеличение прибыли от их реализации, формирование новых услуг в сфере транспортного обслуживания как грузовых, так и пассажирских перевозок [1, 2]. В частности, необходимо отметить, что в процессах изменения пассажирских перевозок наблюдается некоторая стагнация, связанная с тенденциями снижения скоростей из-за инфраструктурных ограничений, уменьшения размеров государственной поддержки, направленной на увеличение мобильности граждан и др.

Наличие этих факторов делает одним из перспективных направлений развития пассажирской сферы услуг смешанные перевозки, развитие которых способно повысить качество современных транспортных услуг, направленных на увеличение скоростей и повышение мультимодальности перевозок, а также качество привычных сервисных услуг, что должно благоприятно сказаться на притоке дополнительного пассажирооборота [3 – 6]. Решение задач, способствующих развитию мультимодальных пассажирских перевозок,

непосредственно связано с реализацией государственных программ, направленных на создание комфортных условий перемещения граждан различных категорий и общественно значимых перевозок, что позволяет поддерживать достаточный уровень конкуренции с другими видами транспорта. Однако с точки зрения мультимодальности включение других видов транспорта, к примеру, в туристические маршруты увеличивает их привлекательность для широкого круга пассажиров.

В контексте повышения привлекательности пассажирских перевозок в туристическом сегменте локальные региональные маршруты могут привлечь своей новизной, которая, в свою очередь, должна быть подкреплена соответствующим транспортным обеспечением предлагаемых вариантов и сервисным обслуживанием достаточного уровня, что необходимо для формирования устойчивого пассажиропотока [7 – 10]. Если иметь в виду железнодорожные экскурсионные маршруты повышенной комфортности, то возникает вопрос организации доставки пассажиров до мест отправления, что связано с некоторыми сложностями, обусловленными, в частности, отсутствием необходимой туристической инфраструктуры и понятийных основ, обозначающих мультимодальную туристическую составляющую таких перевозок.

В предлагаемой статье рассматривается реализация региональных смешанных туристических перевозок при различных вариантах маршрутов с учетом мультимодальной составляющей.

В организации мультимодальных грузовых и пассажирских потоков много сходства и различий. Основное различие состоит в том, что пассажир одновременно является не только объектом перемещения, но и потребителем транспортных услуг. Пассажир играет активную роль в осуществлении перевозки: он сам выбирает маршрут и может изменить его уже в ходе поездки. У каждой группы пассажиров имеются свои предпочтения, основываясь на которых они выбирают маршрут, время поездки, вид транспорта, место пересадки, способ оплаты. В отдельную группу можно выделить туристов, желающих путешествовать по России поездом. В последние годы компания ОАО «РЖД» развивает железнодорожный туризм [9, 10], который должен обеспечивать полный комплекс услуг для организации железнодорожных путешествий на специализированном подвижном составе.

Однако железнодорожный туризм можно рассматривать как особый вид туристской деятельности, в котором железнодорожный транспорт и его инфраструктура выступают не только в роли транспортной составляющей турпродукта, а становятся объектом интереса туристов. Железная дорога в данном случае становится самостоятельным объектом для мотивации поездки. Интерес или мотив, побуждающий туриста к поездке, заключается как в осуществлении поездок, во время которых создается неповторимая атмосфера «путешествие под стук колес», так и в культурно-исторической ценности объектов железнодорожного транспорта и его инфраструктуры.

Примером того является Кругобайкальская железная дорога ВСЖД, которая привлекает туристов своими уникальными промышленными сооружениями и объектами, сохранившимися в первозданном виде с момента постройки.

Тенденция экологизации и устойчивости развития, а также ориентации на туризм, отразилась в инициации Международным союзом железнодорожного транспорта в 2016 г. проекта TopRail2, направленного на формирование единой логики управления туристическим сегментом пассажирского транспорта. Данный проект выступает информационной базой о железнодорожном транспорте стран-участников, о его возможностях в туризме и участии в функционировании и специализации национального туристического продукта. Изучение опыта железнодорожного туризма позволяет определить потенциальные опции участия железнодорожных перевозок, в частности и железнодорожной транспортной системы в целом в формировании национального туристского продукта. В таблице 1 выделены функции, которые выполняет железнодорожный транспорт в туризме.

Таблица 1 – Функции железнодорожного транспорта в туризме

Функция	Описание функции
Способ доставки туристов к месту назначения	Использование железнодорожного транспорта в качестве способа доставки экскурсантов к отдельным объектам показа без экскурсионного сопровождения в пути или с экскурсионным сопровождением и показом объектов по ходу движения электропоезда
Экскурсионный транспорт	Железнодорожный транспорт выступает основной туристической услугой и экскурсионным сопровождением
Основа железнодорожного продукта	Железнодорожный транспорт становится еще местом проживания и обслуживания туриста, более того, сам маршрут становится отдельной аттракцией. Туристический поезд (реже используется термин «круизный поезд») – специальный комфортабельный поезд высокого класса, который перевозит туристов по заранее запланированному маршруту. Топ-25 лучших туристических поездов мира определяется Ассоциацией международных железнодорожных путешественников (АМЖП) по специальному рейтингу
Часть историко-культурного потенциала	Объекты транспортной инфраструктуры выступают отдельными аттракциями, формирующими туристский интерес и побуждающими туристов отправиться в путешествие. Живописные маршруты, красивые вокзалы, необычные мосты и виадуки, заброшенные станции и железнодорожные ветки – все это особым образом формирует ресурсную базу туризма в регионе или стране. Каждый из таких объектов имеет определенную историко-культурную ценность
Способ обеспечения функционирования туристской дестинации	Железнодорожный транспорт выступает основой для формирования туристических продуктов как способ доставки туристов к дестинации и обратно (например, в пляжных или экскурсионных турах) и как центральный ресурс так называемых круизных железнодорожных туров

Следует отметить, железнодорожный транспорт как часть историко-культурных ресурсов в мировой и российской практике туристических железнодорожных перевозок рассматривается в различных аспектах, представленных на рисунке 1.

Особое место в туристических аттракциях занимают железные дороги, внесенные в список Всемирного наследия ЮНЕСКО. Они отражают развитие инженерной мысли человечества, сохраняют оригинальный внешний вид как подвижного состава, так и инфраструктуры и являются важнейшими туристическими достопримечательностями. Всего несколько железных дорог мира имеют статус объекта Всемирного наследия ЮНЕСКО.



Рисунок 1 – Железнодорожный транспорт как часть историко-культурных ресурсов

Анализируя современное состояние железнодорожного туризма в России, можно выделить несколько способов отправиться в путешествие по железной дороге, одним из которых может выступать самостоятельное передвижение туристов на поезде. Ежегодно в летний сезон добавляются сотни стандартных нефирменных маршрутов, следующих по направлению курортов Краснодарского края, Крыма, Северного Кавказа, Москвы и Санкт-Петербурга, из самых разных регионов России. Каждый сезон количество поездов возрастает в три раза благодаря именно таким сезонным маршрутам. Стандартные купейные и плацкартные вагоны, как правило, старого образца и без удобств. Существуют также множество круглогодичных маршрутов, включая фирменные (комфортабельные поезда с новыми вагонами и увеличенным набором услуг, преимущественно связывающие Москву и Санкт-Петербург друг с другом и другими крупными городами России), следующие в пределах России, стран СНГ и Прибалтики; туристические поезда. ОАО «РЖД» в настоящее время активно занимается развитием железнодорожного туризма. Эти поезда следуют по уже определенным туристическим маршрутам и располагают всеми стандартами качества. Следует отметить, что эти поезда рассчитаны на более состоятельную целевую аудиторию, поскольку имеют в своем составе преимущественно вагоны класса СВ и VIP. В число основных направлений железнодорожного туризма на поездах РЖД входит также Кругобайкальская железная дорога, обладающая рядом перспективных факторов для развития: туристские ресурсы, степень развитости туристской инфраструктуры, наличие необходимого уровня знаний у потенциальных туристов о туристском объекте, его имидже, который также формируют туристскую привлекательность. Туристская ценность КБЖД состоит еще и в том, что она позволяет турфирмам показывать своим клиентам Байкал в любое время года.

Анализ пассажиропотока Кругобайкальской железной дороги. Объектом исследования для привлечения пассажиропотока в сфере туристического бизнеса является участок Кругобайкальской железной дороги ВСЖД протяженностью 94 км с пятью станциями. В настоящее время Кругобайкальская железная дорога относится к малоинтенсивным железнодорожным линиям и эксплуатируется только как туристическая железная дорога, проезд по ней включен во все туристические маршруты по Транссибу, организуемые АО «Федеральная пассажирская компания» – филиалом ОАО «РЖД» (АО «ФПК»). С учетом реализации инвестиционного проекта по развитию туристско-рекреационного кластера «Ворота Байкала» увеличится поток туристов на КБЖД преимущественно со стороны поселка Листвянка, что в свою очередь приведет к необходимости увеличения количества поездов на КБЖД. Для большей заинтересованности туристов в посещении Байкала актуализируется потребность в разработке новых маршрутов, например, с посещением поселка Листвянка. При разработке расписания движения туристического поезда необходимо избегать порожних пробегов и излишних простоев состава. Кроме того, следует учитывать удобство расписания туристических поездов для гостей.

Так как участок Култук – Байкал однопутный, оборудован двухсторонней полуавтоматической блокировкой, не электрифицирован, при увеличении поездопотока возникнут проблемы с пропуском поездов, поэтому существует необходимость увеличения пропускной способности. Рассматриваемый участок Кругобайкальской железной дороги ВСЖД в качестве объекта исследования для привлечения пассажиропотока в сфере туристического бизнеса имеет ограничения в плане технической модернизации, поскольку включен в состав особо охраняемых объектов. В связи с этим в границы туристско-рекреационного кластера (ТРК) «Ворота Байкала» включена особая экономическая зона туристско-рекреационного типа с одноименным названием. Учитывая изложенное выше, необходима разработка технологии развития туристического железнодорожного маршрута по КБЖД без реконструкции существующей инфраструктуры объектов КБЖД.

Для оценки пассажиропотока необходимо рассчитать среднее количество туристов, прибывающих за сутки для дальнейшего составления композиции и схемы состава. Для примера расчета среднесуточного потока туристов взяты данные за 2021 г. По данным Департамента туризма Иркутской области за 2021 г. Иркутскую область посетило 186,2 тыс. туристов: 70 % в летнее время (130,34 тыс. чел.), это с мая по октябрь, 30 % в зимний период (55,86 тыс. чел.). Летом в день 709 туристов прибывают в область, а зимой 309. Примерно 25 % туристов в день посещают КБЖД: летом – 178 чел., зимой – 77 чел. 4 % (29) туристов в летний период и 8 % (25) в зимний от общего числа гостей, прибывших в область за сутки, которые сначала отправились в Байкальск, а потом на КБЖД. Таким образом, необходимо сформировать состав так, чтобы его вместимость была не меньше числа гостей, посещающих КБЖД за сутки. В летнее время это число составит 207 чел., а в зимнее 102. В состав поезда включаются вагоны и обычные купейные вагоны, вагон-ресторан и штабной вагон. Схемы и композиции поездов на летний и зимний периоды представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Композиции состава туристического поезда

Летом			Зимой		
№ вагона	категория ваг.*	число мест	№ вагона	категория ваг.*	число мест
1	СВ	16	1	СВ	16
2	СВ	16	2	ВР	–
3	ВР	–	3	ШВ	–
4	ШВ	–	4	К	36
5	К	36	5	К	36
6	К	36	6	К	36
7	К	36			
8	К	36			
9	К	36			
Итого	7/9	212		4/6	124

Примечание.* – К – жесткий купейный вагон с местами для лежания; СВ – мягкий с местами для лежания; ВР – вагон-ресторан; ШВ – штабной вагон.

На основании разработанной схемы состава туристического поезда и пассажиропотока на данном участке рассчитаны показатели пассажирского движения.

Для анализа работы железнодорожного транспорта в области пассажирских перевозок применяется система показателей пассажирских перевозок, которая включает в себя количественные, качественные и экономические показатели. Полученные значения показателей представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Значения показателей

№ п/п	Наименование показателя	Значение
1	2	3
Количественные показатели		
1	Количество перевезенных (отправленных) пассажиров	414
2	Пассажирооборот $\sum AI = 2 \cdot (A_1 L_1 + A_2 L_2 + \dots + A_n L_n)$, пас.-км	83914,4
3	Средняя дальность поездки $l_{cp} = \frac{\sum AI}{\sum A_{от}}$, км	202,7
4	Поездокилометры: $\sum NI = 2(N_1 l_1 + N_2 l_2 + \dots + N_n l_n)$, поездо.-км	440,8
5	Вагонокилометры $\sum mS = 2(N_1 m_1 l_1 + N_2 m_2 l_2 + \dots + N_n m_n l_n)$, ваг.-км	3967,2
6	Пассажиро-место-километры $\sum AI_{np} = 2(a_1 N_1 l_1 + a_2 N_2 l_2 + \dots + a_n N_n l_n)$, пас.-место-км	93449,6
7	Средний состав поезда $m_{cp} = \frac{\sum mS}{\sum NI}$, вагонов	9
8	Средняя плотность пассажиропотоков $a_{cp} = \frac{\sum AI_{np}}{2L}$, пас.	212

1	2	3
	Качественные показатели	
9	Потребный парк составов $\sum \Pi_c = \sum \Pi_c^{\text{тип}}$, составов	1
10	Потребный парк вагонов $\sum n_v = m \sum \Pi_c$, ваг	9
11	Среднесуточный пробег состава $S_c = \frac{\sum NI}{\sum \Pi_c}$, км	440,8
12	Среднесуточный пробег вагона $S_v = \frac{\sum mS}{\sum n_v}$, км	440,8
13	Средняя населенность состава $a_c = \frac{\sum Al}{\sum NI}$, пас.	191
14	Коэффициент использования вместимости состава $P_m = \frac{\sum Al}{\sum Al_{\text{пр}}}$	0,9
15	Средняя маршрутная скорость поездов $V_m^{\text{ск}} = \frac{\sum NI_{\text{ск}}}{\sum NT_{\text{ч}}}$, км/ч	20,8

Анализ графика движения и расписания поездов на КБЖД показывает, что ввод дополнительной нитки возможен и вполне оправдан в условиях увеличения спроса на туристические перевозки. Однако еще большее увеличение количества прокладываемых поездов повлечет за собой проблемы с их пропуском. В связи с этим возникает необходимость увеличения пропускной способности рассматриваемого участка, в том числе с использованием альтернативных вариантов доставки пассажиров до туристического маршрута через поселок Листвянка. Показатели пассажирских перевозок при измененном варианте графика движения не рассчитывались из-за небольших отклонений от приведенных в таблице 3. Исследования в данном направлении при изменении параметров выходят за рамки представленной научной статьи и будут рассмотрены отдельно в детализированном виде.

Имитационное моделирование пассажиропотока на участке поселок Листвянка – Порт Байкал. Применительно к КБЖД, учитывая ограничения, связанные с нахождением объекта в границах особо охраняемых территорий и необходимость разработки технологий, способствующих увеличению туристических перевозок, наиболее предпочтительной для решения задачи с точки зрения функциональных возможностей выглядит среда моделирования AnyLogic.

Перемещение пассажирского потока на туристическом маршруте КБЖД происходит при взаимодействии автомобильного, железнодорожного и речного транспорта. Схема маршрута представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Схема туристического маршрута КБЖД

Для исследуемого объекта КБЖД «узким местом» является участок станция Порт Байкал – поселок Листвянка. Пропускная способность данного участка при движении пассажиропотока ограничивается возможностями паромов, обслуживаемого Восточно-Сибирским речным пароходством. Расписание паромов сезонное и зависит от времени года. Перевозки осуществляются паромом «Байкальские воды». Вместимость – 30 человек и четыре автомобиля. Максимальное количество, которое может перевезти паром в высокий сезон (июнь – сентябрь), – 240 чел. Однако следует учитывать, что значительная часть из числа пассажиров – это дачники и жители близлежащих населенных пунктов станции Порт Байкал. Доля таких пассажиров приходится преимущественно на утренние и вечерние рейсы.

Следует отметить неудобства для пассажиров, возникающие при стыковании маршрутов поездов КБЖД и рейсов паромов. Так, прибывающим на дневных рейсах паромов пассажирам нет возможности отправиться поездом в ближайшее время при существующем расписании поездов КБЖД. Строительство и ввод в эксплуатацию моста через реку Ангара в перспективе реализации проекта «Ворота Байкала» позволит увеличить пропускную способность участка поселок Листвянка – Порт Байкал независимо от сезона и времени суток. В этой связи возрастет необходимость ввода дополнительных оптимальных маршрутов поездов, курсирующих на КБЖД.

Разработка имитационной модели движения пассажирского потока на данном участке проводилась с целью определения временных и количественных характеристик процесса перевозки туристов железнодорожным и автомобильным транспортом, что позволит сформировать рациональные варианты организации перевозочного процесса в заданных условиях.

Разработка модели в среде AnyLogic осуществлялась на основе агентного, дискретно-событийного и системного подходов. На первом этапе моделирования пассажирского потока на участке поселок Листвянка – станция Байкал были реализованы простые рефлексные агенты, поведение которых зависит от взаимодействия агентов между собой и внешней средой. Было выделено три типа агентов: агент-поезд, агент-пассажир, агент-автобус из пешеходной, автомобильной и железнодорожной библиотеки. В таблице 4 представлены агенты и их описания для разрабатываемой модели.

Таблица 4 – Агенты модели и их характеристики

Агент	Характеристика агента	Тип агента в AnyLogic
Пассажир	Пассажир туристического маршрута. Поведение агента включает в себя следующее: перемещение автомобильным транспортом до поселка Листвянка, переправа на пароме, посадка в туристический поезд. Все перемещения пассажира осуществляются в соответствии с расписанием движения туристического поезда, паромной переправы	Ped Source
Поезд	Туристический поезд, состав которого – локомотив и пассажирские вагоны (количество вагонов определяется в зависимости от числа туристов-пассажиров)	Train Source
Автобус	Автобус, осуществляющий перевозку пассажиров из Иркутска в поселок Листвянка	Car Source

Агент-пассажир является динамическим элементом моделируемого процесса перевозки туристов по заданному участку. Появление агентов-пассажиров в модели возможно при наступлении следующих событий: прибытие автобуса, в этом случае количество пассажиров определяется количеством мест данного транспортного средства (рисунок 3); прибытие поезда на станцию Байкал, при этом количество пассажиров определяется количеством мест в вагонах поезда (рисунок 4); случайные туристы, прибывшие в поселок Листвянка на собственном транспорте, а также местные жители и проживающие на территории населенного пункта гости.

Управление процессами перевозок

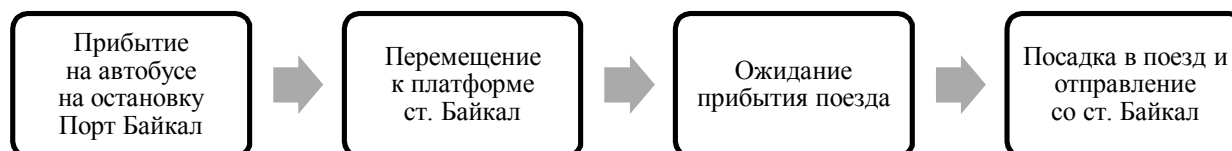


Рисунок 3 – Схема поведения агентов-пассажиров, прибывших автобусом

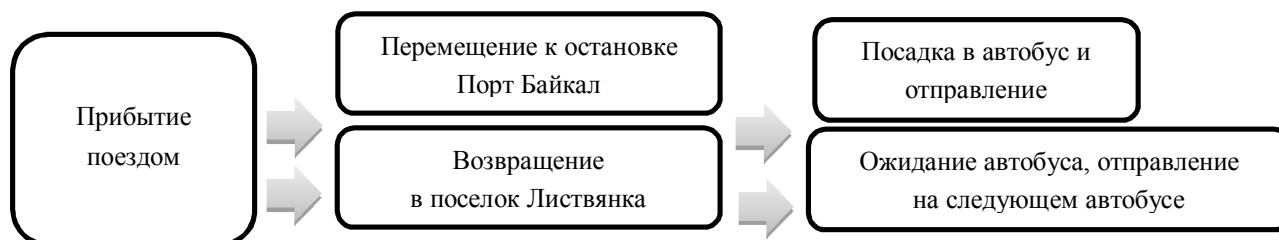


Рисунок 4 – Схема поведения агентов-пассажиров, прибывших поездом

Поведение агентов-пассажиров последнего варианта (случайные туристы) следующее: появляются на станции Байкал и отправляются на поезде по маршруту КБЖД.

Агент-автобус является статичным в моделируемой системе, появляется согласно расписанию рейсов, прибывает из Иркутска к остановке Порт Байкал, высаживает пассажиров, ожидает времени следующего рейса, осуществляет посадку пассажиров и отправляется со станции Порт Байкал обратно в Иркутск. Количество рейсовых автобусов определено расписанием.

Агент-поезд также является в разрабатываемой системе статичным элементом, прибывает на станцию Байкал согласно расписанию, осуществляет посадку и отправляется по маршруту КБЖД. Количество поездов определяется расписанием. Однако состав поезда (количество вагонов) зависит от прибывших на остановку Порт Байкал туристов.

Разработанная в графическом редакторе среды AnyLogic логическая схема модели содержит области задания внешних данных, переменных, параметров и агентов; участок схемы, реализующий нанесение условных обозначений на карту. Динамические объекты, проходя по элементам структурной схемы, реализуют заданные алгоритмом действия: появление пассажиров в модели (одним из рассмотренных ранее случаев), перемещение к местам посадки на железнодорожный или автомобильный транспорт, отправление поездом или автобусом. На основании разработанной имитационной модели могут быть получены численные значения перевезенных пассажиров поездом, количество требуемых вагонов в составе, а также может производиться корректировка параметров рассматриваемой системы.

Таким образом, анализ существующих тенденций в сфере туристических перевозок показывает, что достижение стратегических целей холдинга ОАО «РЖД», связанных с улучшением качества обслуживания пассажиров, может быть ускорено за счет внимания к развитию внутренних туристических маршрутов с преобладанием железнодорожного транспорта, популярность которых возросла в связи с нестабильной международной ситуацией. Кругобайкальская железная дорога как туристический объект имеет положительную перспективу на будущее, которая может быть реализована в рамках туристско-рекреационного кластера «Ворота Байкала» с планируемым приростом количества туристских прибытий в границах кластера к 2025 г. порядка 775 тыс. человек. Рассмотрена возможность добавления новых оптимальных маршрутов поездов для перевозки туристов на участке Слюдянка – ст. Байкал с учетом значительного прироста пассажирского потока при возможном вводе в эксплуатацию моста через реку Ангара. Для оценки рассматриваемых вариантов разработана имитационная модель пассажиропотока с использованием пакета прикладных программ AnyLogic, позволяющая изменять параметры системы при оценке пассажиропотока различной интенсивности.

Список литературы

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р. – Текст : электронный. – URL: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=155> (дата обращения: 05.05.2023).
2. Лapidус, Б. М. О создании Интеллектуальной мультимодальной транспортной системы России и проекта «Интеллектуальный контейнерный конвейер» / Б. М. Лapidус. – Текст : непосредственный // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2020. – Т. 79. – № 5. – С. 276–281. – DOI 10.21780/2223-9731-2020-79-5-276-281.
3. Пазойский, Ю. О. Закономерность распределения пассажиропотока в пассажирских поездах дальнего следования / Ю. О. Пазойский, М. Ю. Савельев, Е. А. Середов. – Текст : непосредственный // Экономика железных дорог. – 2022. – № 7. – С. 29–39.
4. Организация пассажирских перевозок : учебник / А. Г. Котенко, Е. А. Макарова, И. Н. Шутов, Ю. О. Пазойский [и др.]. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2017. – 136 с. – Текст : непосредственный.
5. Волкова, Е. М. Мультимодальные пассажирские перевозки как инструмент повышения конкурентоспособности железнодорожного транспорта / Е. М. Волкова. – Текст : непосредственный // Транспорт Российской Федерации. – 2022. – № 1-2 (98-99). – С. 27–30.
6. Вакуленко, С. П. Мультимодальные пассажирские перевозки в условиях развития скоростного железнодорожного транспорта / С. П. Вакуленко, А. К. Головнич. – Текст : непосредственный // Актуальные вопросы и перспективы развития транспортного и строительного комплексов : материалы IV международной научно-практической конференции: в 2-х частях, Гомель, 11–12 октября 2018 года / Министерство транспорта и коммуникаций Республики Беларусь, Белорусская железная дорога, Белорусский государственный университет транспорта; под общей редакцией Ю. И. Кулаженко. – Гомель : Белорусский государственный университет транспорта, 2018. – Часть 2. – С. 276–277.
7. Дунаев, О. Н. Рынок пассажирских перевозок: пути организации мультимодальных перевозок / О. Н. Дунаев, А. В. Гуц. – Текст : непосредственный // Транспорт Российской Федерации. – 2019. – № 1 (80). – С. 23–27.
8. Родионова, Н. А. Основные тенденции развития туристического обслуживания труднодоступных регионов / Н. А. Родионова, Ю. И. Куприянова. – Текст : непосредственный // Федор Петрович Кочнев – выдающийся организатор транспортного образования и науки в России : труды международной научно-практической конференции, Москва, 22–23 апреля 2021 года / отв. редактор А. Ф. Бородин, сост. Р. А. Ефимов. – Москва : Российский университет транспорта, 2021. – С. 345–348.
9. Наумова, Д. В. Новая эра железнодорожного туризма / Д. В. Наумова. – Текст : непосредственный // Автоматика, связь, информатика. – 2022. – № 7. – С. 39–40.
10. ОАО «РЖД» и внутренний туризм в России // Железнодорожный транспорт. – 2021. – № 11. – С. 2.

References

1. Strategy for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030. Approved by the order of the Government of the Russian Federation dated June 17, 2008. Published on November 30, 2011. Available at: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=155> (accessed 05.05.2023).
2. Lapidus B.M. On the creation of the Intelligent Multimodal Transport System of Russia and the project «Intelligent Container Conveyor». *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Russian Railway Science Journal*, 2020, vol. 79, no. 5, pp. 276–281, DOI 10.21780/2223-9731-2020-79-5-276-281 (In Russian).
3. Pazoiski Yu.O. The regularity of the distribution of passenger traffic in long-distance passenger trains. *Ekonomika zheleznykh dorog – Journal of Railway Economics*, 2022, no. 7, pp. 29–39 (In Russian).

4. Kotenko A.G., Makarova E.A., Shutov I.N., Pazoiski Yu.O. and others. *Organizatsiia passazhirskikh perevozok: uchebnik* [Organization of passenger transportation: tutorial]. Moscow, Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport Publ., 2017, 136 p. (In Russian).

5. Volkova E.M. Multimodal passenger transportation as a tool for increasing the competitiveness of railway transport. *Transport Rossiiskoi Federatsii – The Transport of Russian Federation*, 2022, no 1-2 (98-99), pp.27-30 (In Russian).

6. Vakulenko S.P., Golovnich A.K. Multimodal passenger transportation in the context of the development of high-speed railway transport. *Actual issues and prospects for the development of transport and construction complexes: materials of the IV international scientific and practical conference*. Gomel, Part 2, 2018, pp. 276-277 (In Russian).

7. Dunaev O.N., Guts A.V. Passenger transportation market: ways of organizing multimodal transportation. *Transport Rossiiskoi Federatsii – The Transport of Russian Federation*, 2019, no. 1 (80), pp. 23-27 (In Russian).

8. Rodionova N.A., Kupriianova Yu.I. Main trends in the development of tourism services in remote regions. *Fedor Petrovich Kochnev – an outstanding organizer of transport education and science in Russia: proceedings of the international scientific and practical conference*. Moscow, 2021, pp. 345-348 (In Russian).

9. Naumova D.V. New era of railway tourism. *Avtomatika, svyaz', informatika – Automation, communications, informatics*, 2022, no. 7, pp. 39-40 (In Russian).

10. The Company «Russian Railways» and domestic tourism in Russia. *Zheleznodorozhnyi transport – Journal of Railway Transport*, 2021, no. 11, p. 2 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гончарова Наталья Юрьевна

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Кандидат педагогических наук, декан факультета «Управление на транспорте и информационные технологии», ИрГУПС.

Тел.: +7 (3952) 638-376.

E-mail: goncharova_nyu@irgups.ru

Большаков Роман Сергеевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой», ИрГУПС.

Тел.: +7 (908) 661-42-63.

E-mail: bolshakov_rs@mail.ru

Давыдова Надежда Викторовна

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Старший преподаватель кафедры «Управление эксплуатационной работой», ИрГУПС.

Тел.: +7 (902) 510-03-79.

E-mail: nadia.nadegda379@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Goncharova Natalya Yurievna

Irkutsk State Transport University (ISTU).

35, Chernishevskiy str., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Ph. D. in Pedagogical, dean of the faculty «Transport management and information technology», ISTU.

Phone: +7 (3952) 638-376.

E-mail: goncharova_nyu@irgups.ru

Bolshakov Roman Sergeevich

Irkutsk State Transport University (ISTU).

35, Chernishevskiy str., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor, associate professor of the department «Control of operational work», ISTU.

Phone: +7 (908) 661-42-63.

E-mail: bolshakov_rs@mail.ru

Davydova Nadezhda Viktorovna

Irkutsk State Transport University (ISTU).

35, Chernishevskiy str., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Senior Lecturer of the department «Control of operational work», ISTU.

Phone: +7 (902) 510-03-79.

E-mail: nadia.nadegda379@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Гончарова, Н. Ю. Организация пассажирских перевозок смешанного типа. Мультимодальные туристические перевозки / Н. Ю. Гончарова, Р. С. Болшаков, Н. В. Давыдова. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 2 (54). – С. 68 – 79.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Goncharova N.Yu., Bolshakov R.S., Davydova N.V. Organization of passenger traffics of mixed type. Multimodal turistic traffics. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 2 (54), pp. 68-79 (In Russian).

УДК 625.143.5(045)

В. С. Коссов, О. Г. Краснов, Г. С. Ноздрачев, О. К. Богданов

Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), г. Коломна, Российская Федерация

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СКРЕПЛЕНИЙ НА ПОДУКЛОНКУ РЕЛЬСОВ

Аннотация. В статье приведены результаты исследования усилий прижатия подошвы рельса к шпале на выборке из 30 новых клемм ЦП369.102. Установлено, что усилия прижатия подошвы рельса к шпале при одинаковых моментах затяжки шурупа ЦП54 имеют существенные различия: при $M_{зат} = 250 \text{ Н·м}$ максимальный разброс достигал 385 кгс. Среднее значение усилия прижатия подошвы рельса к шпале при $M_{зат} = 250 \text{ Н·м}$ для шурупа ЦП54 в среднем составляет 900 кгс, что ниже нормированного значения 1000 кгс. Лишь у 20 % измеренных клемм усилие прижатия было близко к нормативному значению. Устойчивые нормативные значения усилия прижатия 1000 кгс были достигнуты при $M_{зат} = 300 \text{ Н·м}$.

В статье приведены результаты исследования изменения квазистатической и динамической подуклонки рельсов в кривых малого радиуса на подкладочных скреплениях ЖБР65-ПШМ. Установлено, что изменение квазистатической подуклонки под наружными и внутренними рельсами в кривых участках пути определяется доминирующими уровнями непогашенных ускорений. Изменение квазистатической и динамической подуклонки рельсов определяет изменение параметров взаимодействия колес и рельсов, что влияет на изменение площади пятна контакта, нормальных и касательных напряжений в зоне контакта и увеличивает интенсивность износа поверхности рельсов и скорость образования контактно-усталостных дефектов. Для стабилизации параметров подуклонки рельсов, обеспечения достаточного сопротивления продольному перемещению рельса предлагается проработать вопрос увеличения усилий прижатия клеммой подошвы рельса путем повышения момента затяжки путевых шурупов и применения подрельсовых прокладок повышенной жесткости (196... 294 кН/мм) с одновременным использованием подпальных подкладок для сохранения способности гашения высокочастотных вибраций от взаимодействия колес с рельсами.

Ключевые слова: промежуточное рельсовое скрепление, усилие прижатия, подрельсовая прокладка, жесткость, поездная нагрузка, квазистатическая и динамическая подуклонка рельсов.

Valeriy S. Kossov, Oleg G. Krasnov, Gennady S. Nozdrachev, Oleg K. Bogdanov

Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock (VNIKTI), Kolomna, the Russian Federation

THE INFLUENCE OF FASTENING CHARACTERISTICS ON RAIL INCLINATION

Abstract. The article provides the results of studying the force of the rail base clamping to the sleeper on a sample of 30 new clips TsP369.102. It has been established that the force of rail base clamping to the sleeper at the same tightening torques of screw TsP54 has significant differences. At $M_{tight} = 250 \text{ N·m}$ the maximum range reaches 385 kgf. The average value of the force of the rail base clamping to the sleeper at $M_{tight} = 250 \text{ N·m}$ is 900 kgf, which is lower than the normalized value of 1000 kgf. Only 20% of measured clips have the clamping force close to the standard value. Stable standard values of clamping force 1000 kgf are achieved at $M_{tight} = 300 \text{ N·m}$.

The article provides the results of studying the changes in the quasi-static and dynamic rail inclination in sharp curves on plate fastenings ZhBR65-PShM. It has been established that the change in the quasi-static inclination under high and low rails in track curves is determined by dominant levels of unbalanced accelerations. The change in the quasi-static and dynamic rail inclination determines the variance of the wheel-rail interaction parameters, which affects the change in the contact patch area, normal and tangential stresses in the contact zone and increases the wear rate of the rail surface and the rate of contact fatigue defects. In order to stabilize parameters of the rail inclination and provide

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

sufficient resistance to the longitudinal rail displacement, it is proposed to study the issue of increasing the force of clamping the rail base with the clip by increasing the tightening torque of screw spikes and applying rail pads of increased stiffness (196...294 kN/mm) with the simultaneous use of sleeper pads to maintain the ability to damp high-frequency vibrations caused by the wheel-rail interaction.

Keywords: intermediate rail fastening; clamping force; rail pad; stiffness; train load; quasi-static and dynamic rail inclination.

Рельсовые крепления служат для прикрепления рельсов к шпалам и выполняют при этом ряд важных задач [1, 2]:

- сохранять стабильность ширины рельсовой колеи;
- обеспечивать достаточное сопротивление продольному перемещению рельса;
- упруго передавать динамические воздействия от колес подвижного состава;
- гасить высокочастотные вибрации, расстраивающие путь.

В кривых малого радиуса на участках пути с высокой грузонапряженностью рекомендовано применять подкладочные крепления ЖБР-65ПШМ. Общий вид крепления представлен на рисунке 1.

ШАЙБА СТО 24

В узле 2 штуки

КЛЕММА ЖБР ЦП 369.102

В узле 2 штуки

ШУРУП ЦП-54

В узле 2 штуки

ПРОКЛАДКА УПРУГАЯ ВП 920.1281

В узле 1 штука

ПРОКЛАДКА УПРУГАЯ ВП 920.1282

В узле 1 штука

ПРОКЛАДКА ЦП-638/538/363

В узле 1 штука

ПОДКЛАДКА ЖБР М ЦП 369.607

В узле 1 штука

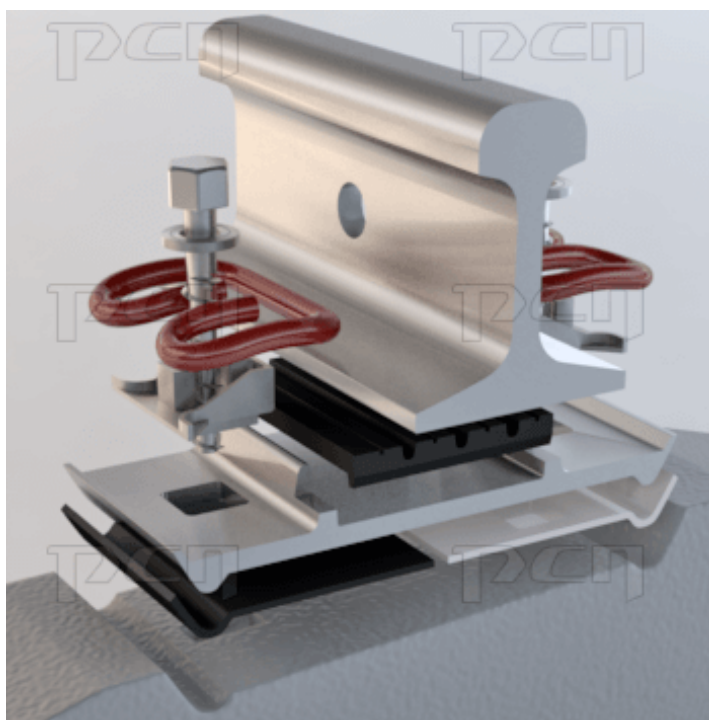


Рисунок 1 – Подкладочное крепление ЖБР-65ПШМ

В данной конструкции крепления металлические подкладки значительно усиливают узел крепления и стабилизируют упорную рельсовую нить. В качестве прикрепителя пружинной клеммы используют путевой шуруп ЦП 54, вкручиваемый в дюбель железобетонной шпалы с усилием 220...250 Н·м.

Нашпальные прокладки имеют разную толщину кромок. Разворот нашпальных прокладок позволяет изменять подуклонку рельса и тем самым регулировать ширину колеи.

Стабильность работы узла крепления определяется параметрами упругих клемм, подрельсовых и нашпальных прокладок. От параметров указанных элементов зависят сопротивление продольному перемещению рельса, динамическая разуклонка рельса от действия поездной нагрузки, квазистатическая подуклонка рельса.

Для определения стабильности прижатия подошвы рельса к шпале упругими клеммами ЖБР ЦП 369.102 проведены экспериментальные исследования клемм, снятых с новой

рельсошпальной решетки. Для определения усилия прижатия использовалась шпала Ш-3 с куском рельса Р65, закрепленного скреплениями ЖБР-65ПШМ. Предварительно шпалы и принадлежащие им клеммы маркировались масляной краской. В измерительное скрепление устанавливались клеммы с разных шпал новой рельсошпальной решетки, после чего шурупы ЦП54 затягивались последовательно с разных сторон от рельса тензометрическим ключом до величины крутящего момента 150 Н·м.



Рисунок 2 – Приспособление для измерения усилия прижатия подошвы рельса к шпале с использованием измерительного ключа АпАТЭК

Измерения усилия прижатия проводились с использованием измерителя прижатия клемм АРС-4 фирмы АпАТЭК (рисунок 2).

С учетом того, что измеритель АпАТЭК предназначен для измерения усилия прижатия подошвы рельса клеммами скрепления АРС-4, потребовалась конструктивная доработка подошвы рельса. Для установки захватов измерителя АпАТЭК под клеммы ЖБР предварительно в подошве рельса были профрезерованы пазы для беспрепятственного охвата прутка упругой клеммы, лежащего на подошве рельса. Это

позволило использовать измеритель АпАТЭК с клеммами ЖБР. Для использования этого прибора на участках укладки рельсошпальной решетки со скреплениями ЖБР требуется доработка конструкции захватов. В процессе измерений производили затяжку путевых шурупов ЦП-54 последовательно с разных сторон от рельса с моментом затяжки от 150 до 350 Н·м и шагом 50 Н·м. При каждой величине затяжки выполняли измерение прижатия клеммой подошвы рельса к шпале с одной и другой стороны.

Было исследовано 30 клемм с восемью новых шпал. Измерения усилия прижатия подошвы рельса производили с одной и другой стороны от рельса для конкретного момента затяжки $M_{i \text{ зат}}$.

После проведения измерений усилия прижатия рельса при фиксированном моменте момент затяжки увеличивали с использованием тензометрического ключа до $M_{i+1 \text{ зат}}$. Цикл измерения усилий повторялся до достижения величины крутящего момента $M_{\text{зат}} = 350 \text{ Н·м}$.

Результаты измерений представлены в таблице 1.

По данным таблицы 1 построены зависимости изменения усилия прижатия подошвы рельса к шпале от момента затяжки шурупа ЦП54 (рисунок 3) для разных клемм с одной шпалы и по средним значениям для всех клемм.

Характеристики кривой Р298 К506, на которой проводились замеры бокового отжатия головки рельса, представлены в таблице 2.

Отступления пути на опытной кривой отсутствовали. Суточный пакет поездов на участке составил: грузовых – 79...85, пассажирских – 6, моторвагонных – 2.

Измерительный участок был заложен в середине круговой части кривой. Для измерения боковых и вертикальных сил в соответствии со схемой оборудования пути на шейку рельса наклеивали тензорезисторы согласно ГОСТ Р 55050–2012 [3]. Для измерения отжатия головки рельсов использовали балочные прогибомеры, измерительный тракт которых тарировали путем подкладки мерных пластин.

В условиях эксплуатации боковое отжатие головки рельсов происходит при вертикальном пригрузе от воздействия колес подвижного состава. Для установления величин бокового отжатия при нагруженном пути поездной нагрузкой были выполнены измерения бокового отжатия рельсов при движении поездов в кривых участках пути R298 и R565 м на втором главном пути со скреплениями ЖБР-65ПШМ.

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Таблица 1 – Результаты измерений усилия прижатия рельса при различной величине момента затяжки

Номер шпалы упругой клеммы	Усилие прижатия рельса, кН				
	Величина момента затяжки шурупа, Н·м				
	150	200	25	300	350
1.1	6,09	6,76	8,99	9,43	11,44
1.2	4,98	7,21	8,76	10,55	11,65
1.3	7,21	8,32	8,99	10,55	11,65
1.4	6,32	6,98	8,99	9,43	10,32
2.1	8,09	9,43	10,99	12,77	13,88
2.2	6,09	6,53	7,21	10,32	12,55
2.3	6,32	8,54	9,43	10,77	12,55
2.4	4,98	7,65	8,54	10,08	11,44
3.1	5,87	7,43	9,21	10,77	12,99
3.2	6,32	7,43	9,21	10,55	11,21
3.3	5,42	6,53	7,88	9,21	11,65
3.4	6,32	7,65	9,43	10,77	12,55
4.1	6,32	8,09	8,54	10,99	13,44
4.2	5,42	7,43	8,32	10,55	11,21
4.3	6,76	8,09	8,76	11,21	14,11
4.4	6,98	8,32	8,99	10,77	13,88
5.1	6,76	7,88	9,96	11,44	12,55
5.2	6,09	8,54	10,55	12,55	12,99
5.3	7,21	7,88	8,99	12,11	12,55
5.4	5,42	6,32	7,43	9,43	10,32
6.1	4,76	6,98	8,09	10,08	10,99
6.2	6,09	7,88	9,43	10,77	11,44
6.3	6,76	7,65	8,54	10,55	11,21
6.4	8,09	8,99	10,77	11,88	11,65
7.1	6,09	6,76	8,32	9,65	10,99
7.2	7,21	8,99	9,88	11,65	13,44
7.3	4,98	6,09	7,88	8,99	10,32
7.4	5,87	7,21	8,09	10,08	11,65
8.1	8,32	9,65	11,65	12,11	13,44
8.2	6,53	7,88	8,99	10,32	12,55
Среднее значение	6,17	7,52	8,81	10,43	11,81

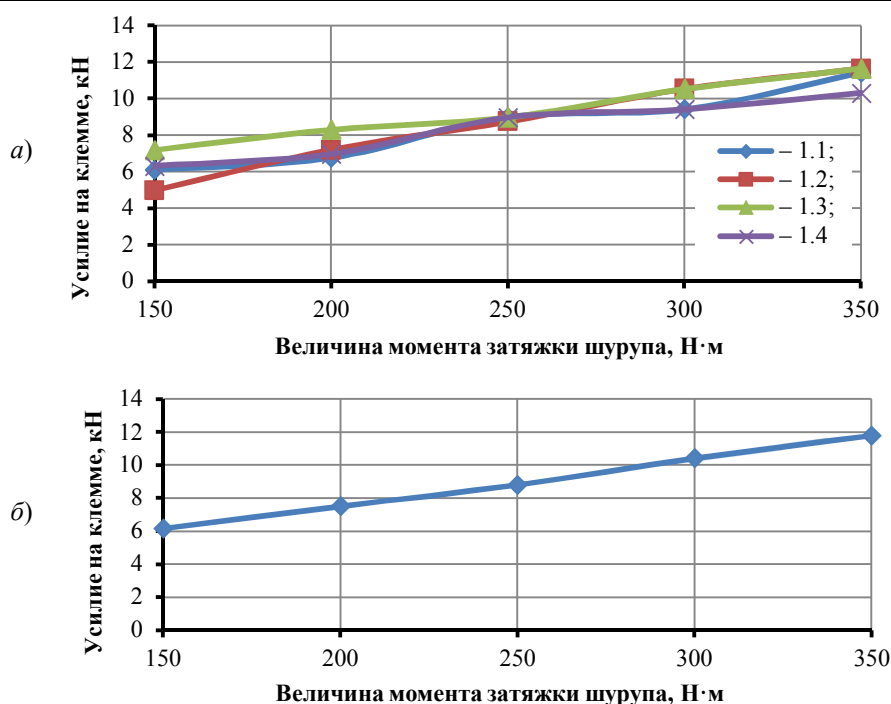


Рисунок 3 – Зависимость изменения усилия прижатия подошвы рельса к шпале от момента затяжки шурупа ЦП54 для разных клемм с одной шпалы (а) и по средним значениям для всех клемм (б)

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Таблица 2 – Характеристики кривой Р298 К506 на спуске 16,4 ‰ (перегон Ангасолка – Слюдянка-2)

Показатель	Значение показателя	
Местоположение кривой, км, ПК	5300 км ПК6 – 5301 км ПК2	
Радиус кривой, м	298	
Протяженность кривой / круговой части, м	506 / 325	
Возвышение наружного рельса, мм	105	
Продольный профиль пути, ‰: уклоны / средневзвешенный уклон круговой части кривой	Спуск: 15,3–17,3 / 16,4	
Ширина колеи с учетом износа, мм	1533,6	
Скорости движения поездов в кривой, установленные приказом, пасс./ груз., км/ч	70 / 60	
Рельс (тип – Р65, производитель – АО «ЕВРАЗ ЗСМК»): – местоположение – категория	Наружный ДТ350	Внутренний ДТ370ИК
Пропущенный тоннаж на дату исследований, млн т брутто	42,5	158,6
Путь	Бесстыковой	
Шпалы	Железобетонные 1-го срока службы	
Эпюра, шт. на 1 км пути	2000	
Тип промежуточного рельсового скрепления	ЖБР-65ПШМ	

На рисунках 4, 5 представлены осциллограммы бокового отжатия головки рельсов и синхронно действующих боковых сил от колес подвижного состава в кривом участке пути с радиусами R_{298} и R_{565} м на скреплениях ЖБР-65ПШМ.

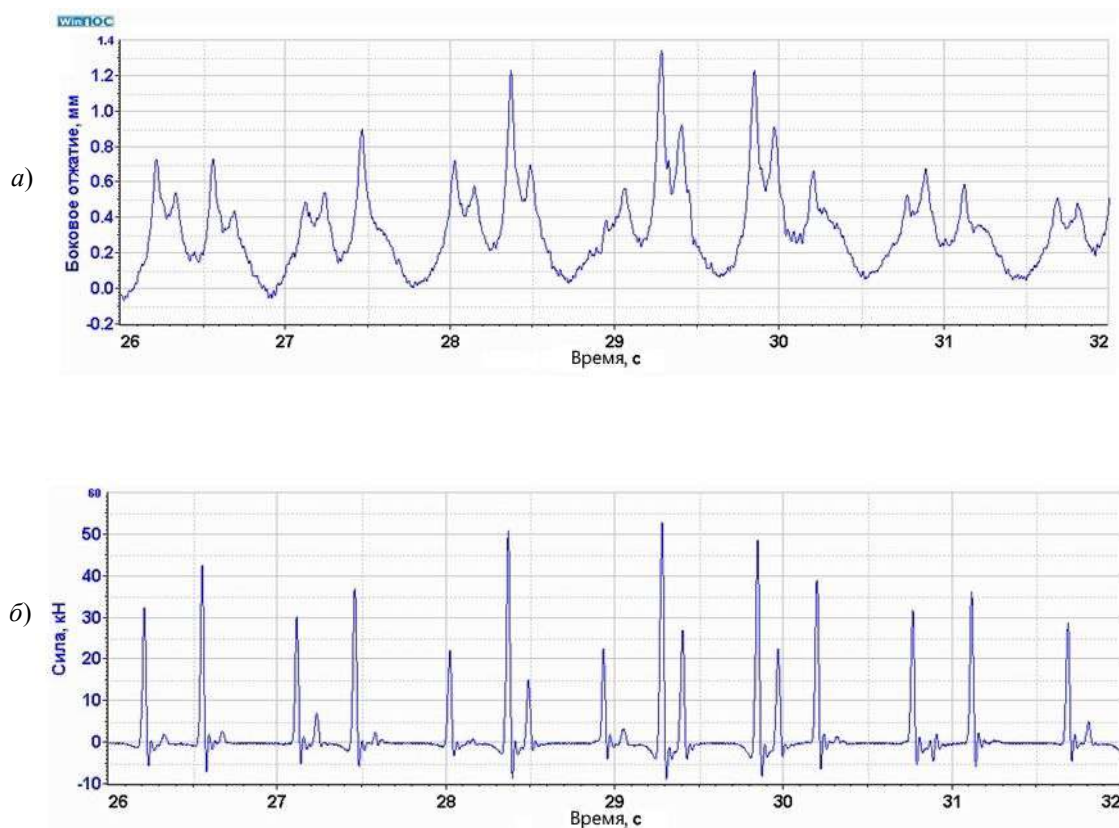


Рисунок 4 – Боковое отжатие головки наружного рельса (а) и боковые силы (б) от колес подвижного состава в кривом участке пути R_{298} м на скреплениях ЖБР-65ПШМ

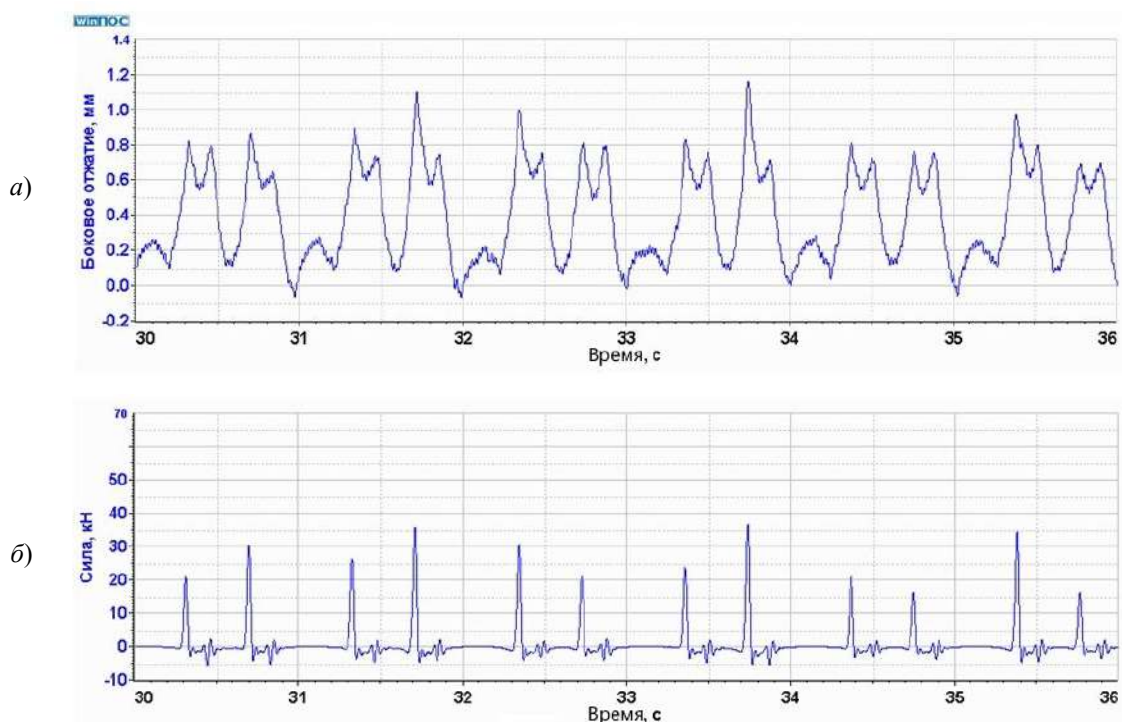


Рисунок 5 – Боковое отжатие головки наружного рельса (а) и боковые силы (б) от колес подвижного состава в кривом участке пути $R565$ м на скреплениях ЖБР-65ПШМ

Анализ величин бокового отжатия наружного рельса под проходящим поездом показал, что отжатие наружного рельса определяется не кратковременным воздействием на измерительное сечение набегающего колеса, а суммарным действием колес тележки, что определяет боковое отжатие рельса на базе тележки. Поэтому продолжительность динамической разуклонки определяется базой тележки и скоростью движения.

Величины бокового отжатия головки наружного и внутреннего рельсов носят вероятностный характер. Для определения параметров распределения бокового отжатия и соответствующих им боковых сил выполнен статистический анализ.

На рисунках 6 и 7 представлены гистограммы величин бокового отжатия и боковых сил, зарегистрированных в кривом участке пути $R298$ м.

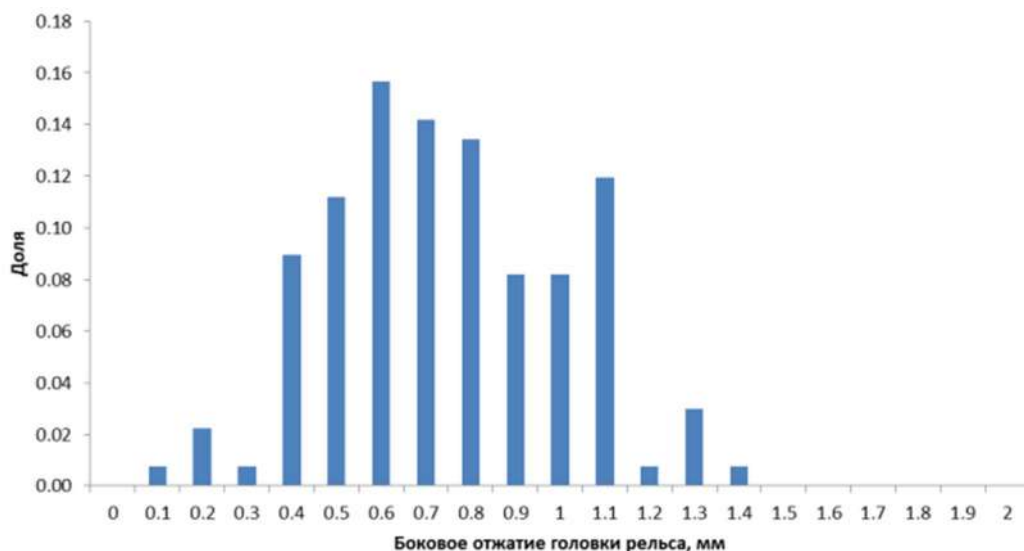


Рисунок 6 – Распределение бокового отжатия на наружном рельсе в кривом участке пути $R298$ м на скреплениях ЖБР-65ПШМ

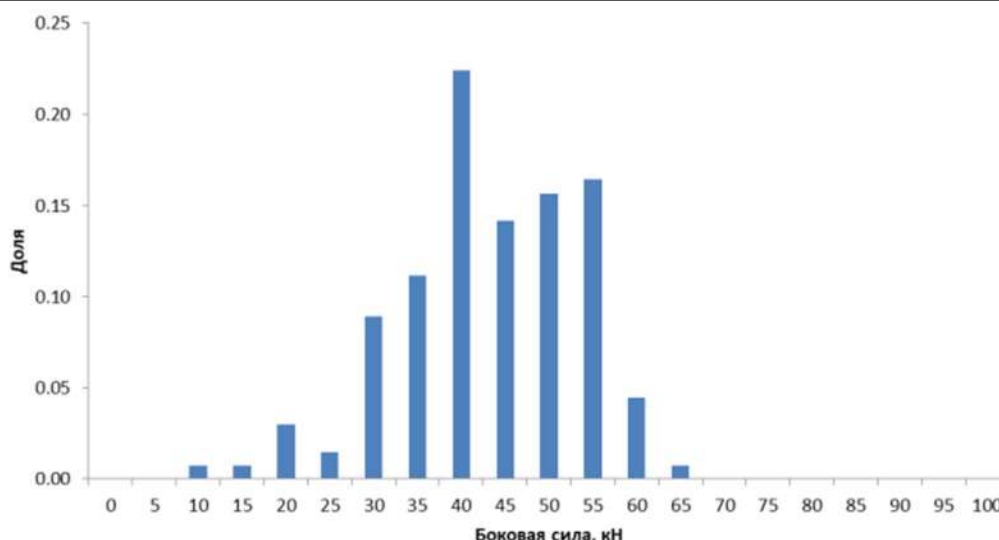


Рисунок 7 – Распределение боковых сил на наружном рельсе в кривом участке пути $R\ 298\ м$ на скреплениях ЖБР-65ПШМ

Статистические характеристики бокового отжатия и боковых сил на наружном рельсе от воздействия груженых полувагонов в кривых участках пути $R298$ и $R565\ м$ на скреплениях ЖБР-65ПШМ представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Статистические характеристики по величинам бокового отжатия и боковых сил на наружном рельсе от воздействия груженых полувагонов в кривых участках пути $R298$ и $R565\ м$

Параметр	Кривая $R298\ м$		Кривая $R565\ м$	
	боковые отжатия, мм	боковые силы, кН	боковые отжатия, мм	боковые силы, кН
Среднее значение	0,69	40,6	0,49	20,1
Стандартное отклонение	0,26	10,2	0,39	11,5
Дисперсия выборки	0,07	103,6	0,15	131,7
Минимальное значение	0,08	5,1	0,32	–10,8
Максимальное значение	1,33	61,9	1,28	59,7

Анализ вероятностных характеристик бокового отжатия и боковых сил, действующих на наружный рельс от проходящих поездов, показал следующее:

значения бокового отжатия наружного рельса при нагружении последнего поездной нагрузкой имеют существенные различия;

фактические величины бокового отжатия в кривых малого радиуса $298\ м$ не превышали $1,2...1,3\ мм$, средняя величина бокового отжатия составила $0,69\ мм$ при средних значениях боковых сил $40,6\ кН$ и среднеквадратических отклонениях $10,2\ кН$;

боковое отжатие головки рельса на $1,2\ мм$ приводит к увеличению подуклонки до $1/17,5$; с увеличением радиуса кривой до $565\ м$ величины боковых сил снизились, среднее значение составило $20,1\ кН$ при среднеквадратическом отклонении $11,5\ кН$, при этом средняя величина бокового отжатия составила $0,49\ мм$ при среднеквадратическом отклонении $0,39\ мм$.

Рассмотрим влияние динамической разуклонки рельсов на изменение точек контакта колеса с рельсом.

При нормативной подуклонке $1/20$ угол между линией горизонта шпалы и линией подошвы рельса составляет $2,86^\circ$ ($\text{tg } 2,86^\circ = 0,05$).

Для серийных груженых грузовых вагонов при движении в кривой $R300\ м$ для большинства современных типов скреплений характерно боковое усилие $40\ кН$. При воздействии бокового усилия на головку рельса происходит поворот рельса относительно внешнего края подошвы рельса на угол $0,009...0,011$ рад или на $0,5...0,65^\circ$. При повороте на 1° угол между линией горизонта шпалы и линией подошвы рельса будет составлять $1,86^\circ$,

что соответствует значению подуклонки 0,0325. Изменение динамической подуклонки рельсов под воздействием боковых сил от подвижного состава определяет изменение параметров взаимодействия колес и рельсов, приводит к изменению площади пятна контакта, нормальных и касательных напряжений в зоне контакта. Это может способствовать увеличению интенсивности износа поверхности рельсов и скорости образования контактно-усталостных дефектов.

Дополнительно проведено исследование изменения квазистатической подуклонки от пропущенной поездной нагрузки. Проведен анализ результатов измерения подуклонки наружного и внутреннего рельсов диагностическим комплексом инфраструктуры «Спринтер-Интеграл» (АО «Фирма Твема») на участках Слюдянской дистанции пути Восточно-Сибирской дирекции инфраструктуры.

Осциллограммы изменения подуклонки рельсов на наружном и внутреннем рельсах в кривых R300 м на подъеме 17 ‰ представлены на рисунке 8.

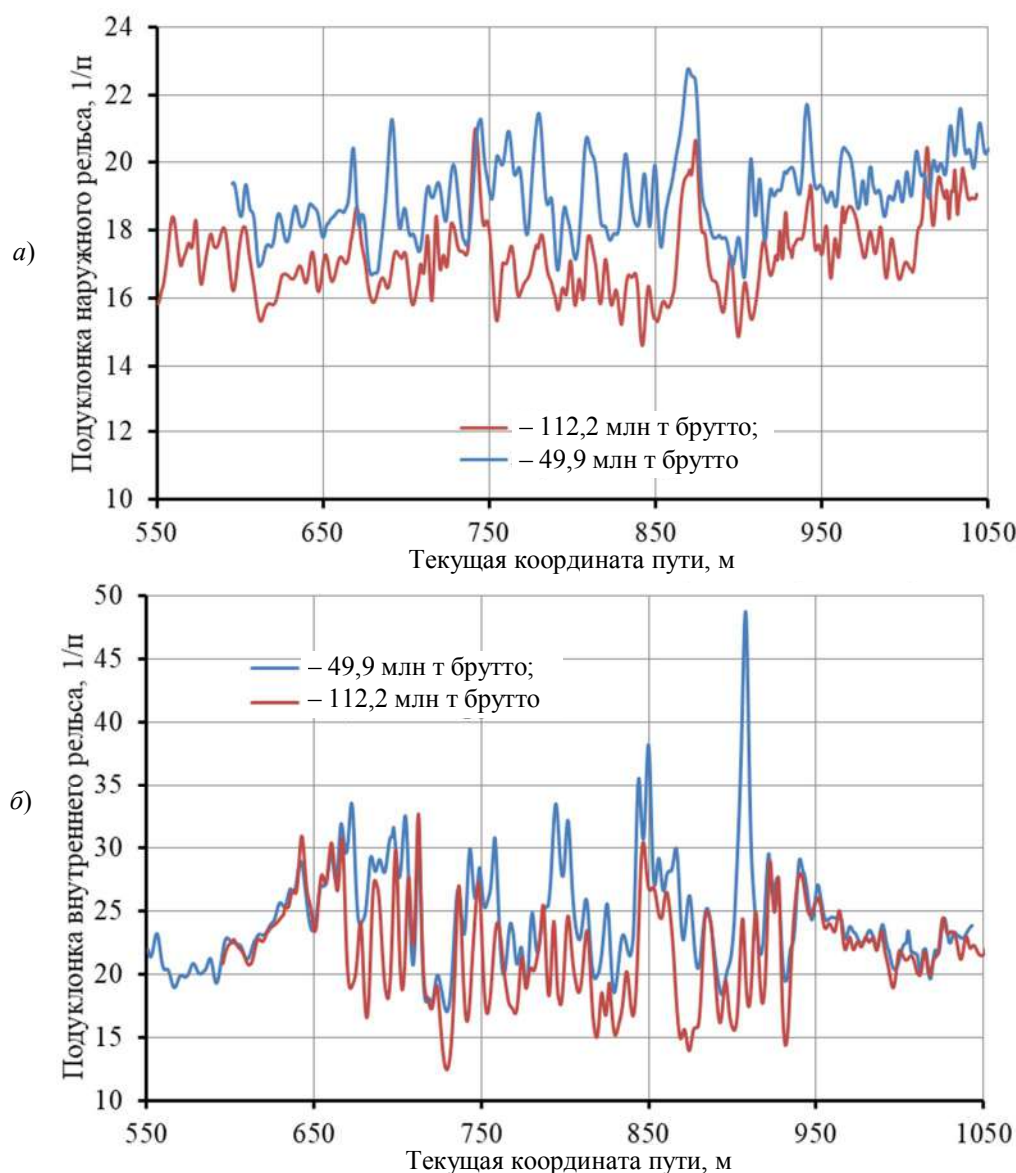


Рисунок 8 – Осциллограммы изменения подуклонки рельсов на наружном (а) и внутреннем (б) рельсах в кривом участке пути R298 м на скреплениях ЖБР-65ПШМ при отрицательных непогашенных ускорениях

Анализ изменения подуклонки рельсов показал, что данное изменение по длине круговой части кривой представляет собой случайный гармонический процесс с размахом от 1/18 до

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

1/23 и происходит при увеличении пропущенного тоннажа случайным образом с отклонением от номинальных параметров.

Возможно это связано с колебаниями виляния эксплуатирующегося подвижного состава, которые определяют гармоническое изменение подуклонки рельсов.

Тенденции изменения подуклонки наружного и внутреннего рельсов определялись главным образом доминированием уровней непогашенных ускорений: при нереализованных значениях скоростей (отрицательных непогашенных ускорениях) подуклонка наружного рельса увеличивается (рисунок 8, а), а на внутреннем рельсе снижается (рисунок 8, б).

При положительных непогашенных ускорениях наблюдается обратная тенденция: на наружном рельсе подуклонка уменьшается до 1/22...1/30, на внутреннем – возрастает.

На рисунке 9 приведены осциллограмма изменения подуклонки наружного рельса и спектр сигнала, который показал широкий набор частотных составляющих.

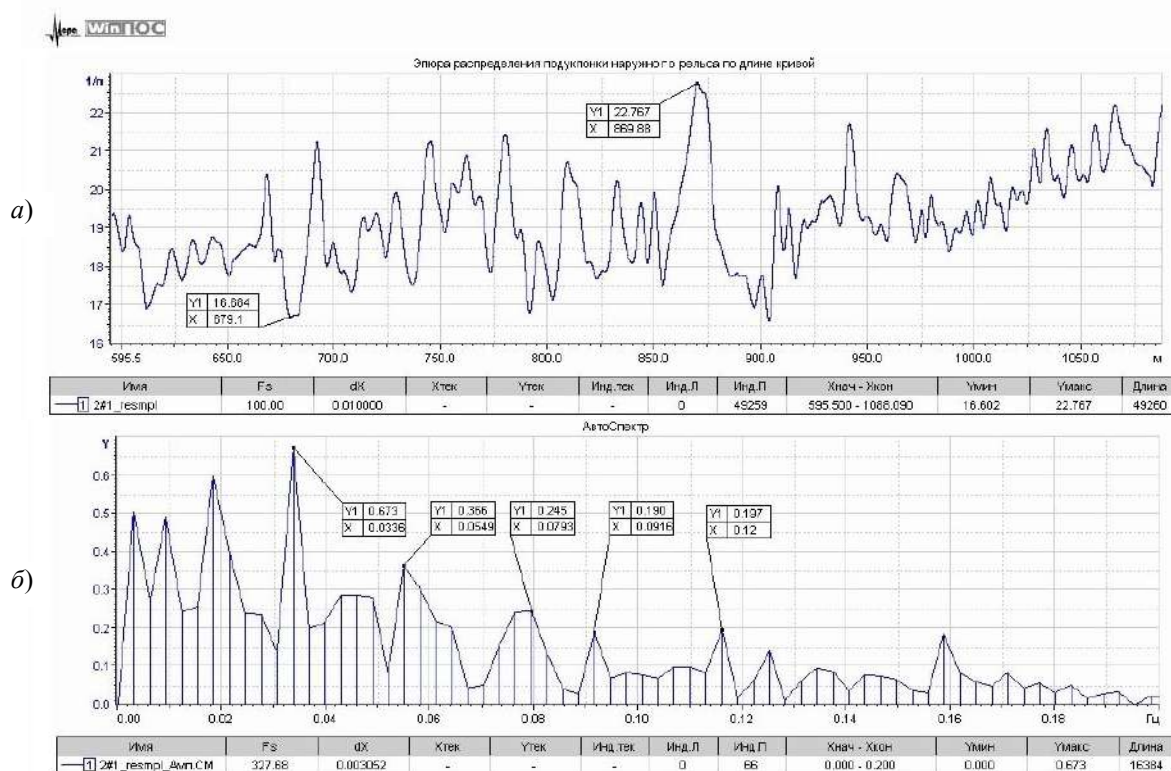


Рисунок 9 – Осциллограмма эпюры распределения подуклонки на наружном рельсе (а) и спектр сигнала (б)

В спектре геометрической линии подуклонки рельсов присутствуют гармонические составляющие, соизмеримые с базами подвижного состава, курсирующими по рассматриваемому участку. Получены длины основных гармонических составляющих: $1/0,0336 = 29,8$ м, $1/0,0549 = 18,2$ м, $1/0,0793 = 12,6$ м, $1/0,0916 = 10,9$ м и $1/0,1159 = 8,6$ м.

Исследование гармонического процесса изменения подуклонки рельсов при других моментах затяжки путевых шурупов в рамках данной работы не проводилось.

Таким образом, опыт эксплуатации современных промежуточных рельсовых скреплений показывает, что как квазистатическая подуклонка, так и динамическая разуклонка рельсов изменяются в процессе эксплуатации от пропущенного тоннажа и непогашенного ускорения, это оказывает негативное влияние на систему взаимодействия колес с рельсами.

Так как в процессе изменения подуклонки изменяются также условия взаимодействия колес с рельсами, то, как правило, изменяется и площадь пятна контакта колеса с рельсом, что определяет увеличение нормальных и касательных напряжений.

Исследования квазистатической и динамической подуклонки рельсов в кривых малого радиуса показали следующее:

- в процессе эксплуатации в кривых малого радиуса на подкладочных скреплениях ЖБР-65ПШМ под действием поездной нагрузки изменяется квазистатическая подуклонка рельсов;
- характер изменения подуклонки имеет случайный гармонический характер;
- изменение квазистатической подуклонки наружного и внутреннего рельсов в кривых участках пути определяется уровнями непогашенных ускорений, колебаниями влияния подвижного состава, эксплуатирующегося в пределах данного перегона.

Выводы и предложения:

1. Измерения усилия прижатия подошвы рельса к шпале клеммами скрепления ЖБР-65 ПШМ при одинаковых моментах затяжки шурупа ЦП54 имеют существенные различия: при $M_{\text{зат}} = 250 \text{ Н} \cdot \text{м}$ максимальный разброс достигал 3,8 кН (385 кгс). Это может быть связано как с нестабильностью режимов термообработки, так и с изменениями в моментах трения пары «путевой шуруп – дюбель».

2. Изменение квазистатической и динамической подуклонки рельсов определяет изменение параметров взаимодействия колес и рельсов, что приводит к изменению площади пятна контакта, нормальных и касательных напряжений в зоне контакта, а в дальнейшем – к увеличению интенсивности износа поверхности рельсов и скорости образования контактно-усталостных дефектов.

3. Для повышения качества определения усилия прижатия подошвы рельсов к шпалам при использовании скреплений типа ЖБР предлагается разработать методику контроля усилия прижатия вместо момента затяжки.

4. Для стабилизации параметров подуклонки рельсов предлагается проработать вопрос увеличения усилий прижатия клеммами подошвы рельса путем повышения момента затяжки путевых шурупов и применения подрельсовых прокладок повышенной жесткости (196...294 кН/мм) с одновременным использованием подшпальных подкладок для сохранения перерабатывающей способности гашения высокочастотных вибраций.

Список литературы

1. Прокопенко, О. С. Перспективные решения для инфраструктурного комплекса / О. С. Прокопенко, С. Ю. Радыгин, М. Р. Низамиев. – Текст : непосредственный // Путь и путевое хозяйство. – 2022. – № 8. – С. 6–7.
2. Петров, А. В. Анализ требований российских и европейских стандартов к рельсовым скреплениям / А. В. Петров, А. В. Савин, А. В. Лебедев. – Текст : непосредственный // Путь и путевое хозяйство. – 2016. – № 9. – С. 22–27.
3. ГОСТ Р 55050–2012. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 19 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Prokopenko O.S., Radygin S.Yu., Nizamiev M.R. Promising solutions for the infrastructure complex. *Put' i putevoye khozyaystvo – Track and track facilities*, 2022, no. 8, pp. 6-7 (In Russian).
2. Petrov A.V., Savin A.V., Lebedev A.V. Analysis of the requirements of Russian and European standards for rail fastenings. *Put' i putevoye khozyaystvo – Track and track facilities*, 2016, no. 9, pp. 22-27 (In Russian).
3. National Standard 55050–2012. Railway rolling stock. Standards for permissible impact on railway track and test methods. Moscow, Standartinform Publ., 2019, 19 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Коссов Валерий Семенович

АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»).

Октябрьской революции ул., д. 410, г. Коломна, Московская область, 140402, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, генеральный директор.

Тел.: +7 (496) 618-82-39.

E-mail: info@vnikti.com

Краснов Олег Геннадьевич

АО «ВНИКТИ».

Октябрьской революции ул., д. 410, г. Коломна, Московская область, 140402, Российская Федерация.

Доктор технических наук, заведующий отделом.

Тел.: +7 (496) 618-82-48, доб. 11-14.

E-mail: krasnov-og@vnikti.com

Ноздрачев Геннадий Сергеевич

АО «ВНИКТИ».

Октябрьской революции ул., д. 410, г. Коломна, Московская область, 140402, Российская Федерация.

Заведующий лабораторией.

Тел.: +7 (496) 618-82-48, доб. 11-96.

E-mail: nozdrachev-gs@vnikti.com

Богданов Олег Константинович

АО «ВНИКТИ».

Октябрьской революции ул., д. 410, г. Коломна, Московская область, 140402, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник.

Тел.: +7 (496) 618-82-48, доб. 11-23.

E-mail: bogdanov-ok@vnikti.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Влияние характеристик креплений на подуклонку рельсов / В. С. Коссов, О. Г. Краснов, Г. С. Ноздрачев, О. К. Богданов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 2 (54). – С. 79 – 89.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kossov Valery Semenovich

JSC «Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock» (JSC «VNIKTI»).

410, Oktyabrskoy Revolyutsii st., Kolomna, 140402, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor, general director.

Phone: +7 (496) 618-82-39.

E-mail: info@vnikti.com

Krasnov Oleg Gennadyevich

JSC «VNIKTI».

410, Oktyabrskoy Revolyutsii st., Kolomna, 140402, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, head of the department.

Phone: +7 (496) 618-82-48, ext.: 11-14

E-mail: krasnov-og@vnikti.com

Nozdrachev Gennady Sergeevich

JSC «VNIKTI».

410, Oktyabrskoy Revolyutsii st., Kolomna, 140402, the Russian Federation.

Head of the laboratory.

Phone: +7 (496) 618-82-48, ext.: 11-96.

E-mail: nozdrachev-gs@vnikti.com

Bogdanov Oleg Konstantinovich

JSC «VNIKTI».

410, Oktyabrskoy Revolyutsii st., Kolomna, 140402, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, leading researcher.

Phone: +7 (496) 618-82-48, ext.: 11-23.

E-mail: bogdanov-ok@vnikti.com

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kossov V.S., Krasnov O.G., Nozdrachev G.S., Bogdanov O.K. The influence of fastening characteristics on rail inclination. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 2 (54), pp. 79-89 (In Russian).

УДК 656.212.5

Ю. Б. Тихонов

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

ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТЫ КОЗЛОВЫХ КРАНОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЯХ И СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРКАХ

Аннотация. В данной статье предметом исследования является безопасность работ, проводимых козловым краном над железнодорожными путями, в том числе и на сортировочных горках. Целью исследования является введение автоматического ограничения рабочей зоны козлового крана с таким расчетом, чтобы

грузовая тележка в процессе работы крана не могла выкатиться за пределы рабочей зоны в пространство над теми путями, по которым могут проезжать составы.

Различные системы безопасности козловых кранов содержат в своем составе целый ряд систем и приборов безопасности, предусмотренных нормативными документами.

Автором предложено дополнить имеющиеся системы безопасности ограничителем рабочей зоны, для чего необходимо дополнительно использовать датчик положения грузовой тележки на мосту козловой крана. За основу, как вариант, взят прибор ОНК-140 модификаций 50, 60, предназначенный для установки на мостовые и козловые краны с двумя грузовыми лебедками. Схема ограничителя рабочей зоны построена по аналогии со схемой координатной защиты на автокранах с телескопической стрелой.

Ограничения рабочей зоны задаются двумя координатами, определяющими границы положения грузовой тележки на мосту козловой крана, каждый раз перед началом работы оператором козловой крана и заносятся в оперативную память. Для реализации данной функции в однокристальный микроконтроллер ОНК-140 должно быть внесено соответствующее программное изменение. В качестве датчика положения грузовой тележки предложен более надежный и долговечный по сравнению с потенциометром энкодер тросиковый, рассчитанный на максимальный диапазон измерений 60 м. Реализация функции автоматического ограничения рабочей зоны козловой крана позволит повысить безопасность работы самого козловой крана и безопасность движения на железнодорожных путях, которые им обслуживаются.

Ключевые слова: козловой кран, системы безопасности, сортировочная горка, рабочая зона, грузовая тележка, датчик положения.

Yuri B. Tikhonov

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

IMPROVING THE SAFETY OF GANTRY CRANES AT RAILWAY STATIONS AND MARSHALLING YARDS

Abstract. In this article, the subject of research is the safety of work carried out by a gantry crane over railway tracks, including on sorting slides. The purpose of the study is to introduce an automatic restriction of the working area of the gantry crane so that the cargo truck during the operation of the crane could not roll out of the working area into the space above the tracks on which trains can pass. Various safety systems of a gantry crane contain a number of safety systems and devices provided for by regulatory documents. The author proposed to supplement the existing security systems with a limiter of the working area, for which it is necessary to additionally use the position sensor of the cargo truck on the gantry crane bridge. As a basis, as an option, the ONK-140 device of modifications 50, 60 is taken, intended for installation on bridge and gantry cranes with two cargo winches. The scheme of the limiter of the working area is constructed by analogy with the scheme of coordinate protection on cranes with a telescopic boom. The limits of the working area are set by two coordinates defining the boundaries of the position of the cargo truck on the gantry crane bridge, each time before the operator of the gantry crane starts working and are entered into RAM. To implement this function, a corresponding software change must be made to the ONK-140 single-chip microcontroller. As a sensor for the position of the cargo truck, a cable encoder, more reliable and durable compared to a potentiometer, is proposed, designed for a maximum measuring range of 60 meters. The implementation of the automatic restriction function of the gantry crane's working area will improve the safety of the gantry crane itself and the safety of traffic on the railway tracks that it serves.

Keywords: gantry crane, safety systems, sorting slide, working area, cargo trolley, position sensor.

На железной дороге в путевом хозяйстве козловые краны применяются на открытых площадках звеносборочных баз, погрузочных площадках дистанций пути, шпалопропиточных заводах для погрузки, выгрузки и транспортирования в пределах площадки различных материалов и прежде всего материалов верхнего строения пути – рельсов, скреплений, шпал. Они широко применяются при сборке рельсошпальной решетки. Основное преимущество этих кранов – простота изготовления и эксплуатации [1].

Обоснована целесообразность объединения сортировочной и грузовой операций и организации обработки грузов в технологический процесс работы сортировочной горки, что позволяет использовать козловые краны как при замене замедлителей, так и на погрузо-разгрузочных операциях и других работах. В частности, вопрос поточной обработки контейнеров за счет включения контейнерного терминала в технологический процесс работы сортировочной горки рассмотрен в изобретении [2].

Для обеспечения безопасной работы козловой кран в соответствии с действующими нормативными документами [3] оснащается системами безопасности.

На козловых кранах общего назначения устанавливаются следующие приборы безопасности:

- звуковой сигнал;
- ограничитель хода крана по крановым путям;
- ограничитель движения крановой тележки;
- ограничитель подъема крюка;
- упоры: устанавливаются на концах рельсового пути для предупреждения схода с них грузоподъемных машин;
- ограничители перекоса: должны отключать механизмы передвижения козловых кранов при недопустимом забеге одной из опор;
- прибор по защите от обрыва одной из фаз питающего напряжения; при отключении электродвигателя подъема груза прибор снимает напряжение с катушек электромагнита тормоза или обмоток двигателя гидротолкателя.

Дополнительно на козловых кранах устанавливаются:

- противоугонные устройства для предупреждения угона крана ветром (при наличии автоматических устройств должны быть предусмотрены ручные);
- анемометр, предназначенный для козловых кранов с пролетом более 16 м; при достижении скоростью ветра предельного значения включает звуковой сигнал;
- регистратор параметров (черный ящик);
- захваты, предотвращающие угон крана при стоянке; все четыре ходовые тележки снабжаются ручными захватами, по окончании работы крановщик обязан установить все ручные захваты.

Существует множество конструкций приборов и устройств безопасности, от надежности которых во многом зависит обеспечение безаварийной работы крана.

На козловых кранах используются такие системы безопасности [4 – 7]:

- ОНК-140 модификаций 40, 59 для кранов с одной грузовой лебедкой;
- ОНК-140 модификаций 50, 60 для кранов с двумя грузовыми лебедками;
- ОНК-160М для мостовых и козловых кранов;
- ОГШ-2.10;
- «Волна» ОГМК 2-01.

Наиболее распространенными являются системы безопасности ОНК-140, они насчитывают несколько десятков модификаций для различных типов кранов.

Системы безопасности ОНК-140 модификаций 40, 59 предназначены для установки на мостовые и козловые краны с одной грузовой лебедкой, ОНК-140 модификаций 50, 60 предназначены для установки на мостовые и козловые краны с двумя грузовыми лебедками.

Эти приборы выполняют функции ограничителя грузоподъемности, ограничителя подъема крюка, анемометра, регистратора параметров.

Встроенный в ОНК регистратор параметров (блок телеметрической памяти (БТП)) обеспечивает запись и долговременное хранение информации о рабочих параметрах крана (моточасы, циклы, характеристическое число) и о последних часах работы крана. Данный регистратор разрешен к применению на всех типах грузоподъемных кранов.

Проводимые козловым краном над железнодорожными путями работы, как правило, занимают часть его пролета. Под остальной частью пролета движение по железнодорожным путям прерываться не должно.

Для повышения безопасности проводимых работ прибор ОНК-140 целесообразно дополнить автоматическим ограничителем рабочей зоны, в границах которой работает козловой кран, чтобы тележка с грузозахватным органом не могла переместиться (случайно) в зону тех путей, по которым может проезжать подвижной состав.

Ограничитель рабочей зоны целесообразно построить по такому же принципу, по которому построены ограничения системы координатной защиты в приборах ОНК-140 для автокранов с телескопической стрелой [8], где может задаваться четыре вида ограничений: потолок, стена, левый угол, правый угол.

Ограничение рабочей зоны должно задаваться двумя координатами – $L_{л.г}$ и $L_{п.г}$, определяющими положение грузовой тележки на мосту козлового крана на границах рабочей зоны.

В настоящее время системами безопасности козловых кранов не контролируются координаты положения грузовой тележки на мосту крана. Контролируются только ее крайние положения.

Блок-схема ОНК-140, дополненная датчиком положения ДП грузовой тележки на мосту козлового крана для реализации функции ограничения рабочей зоны, представлена на рисунке 1. При этом в программу функционирования однокристального микроконтроллера (ОМК) прибора ОНК-140 должно быть внесено соответствующее изменение.

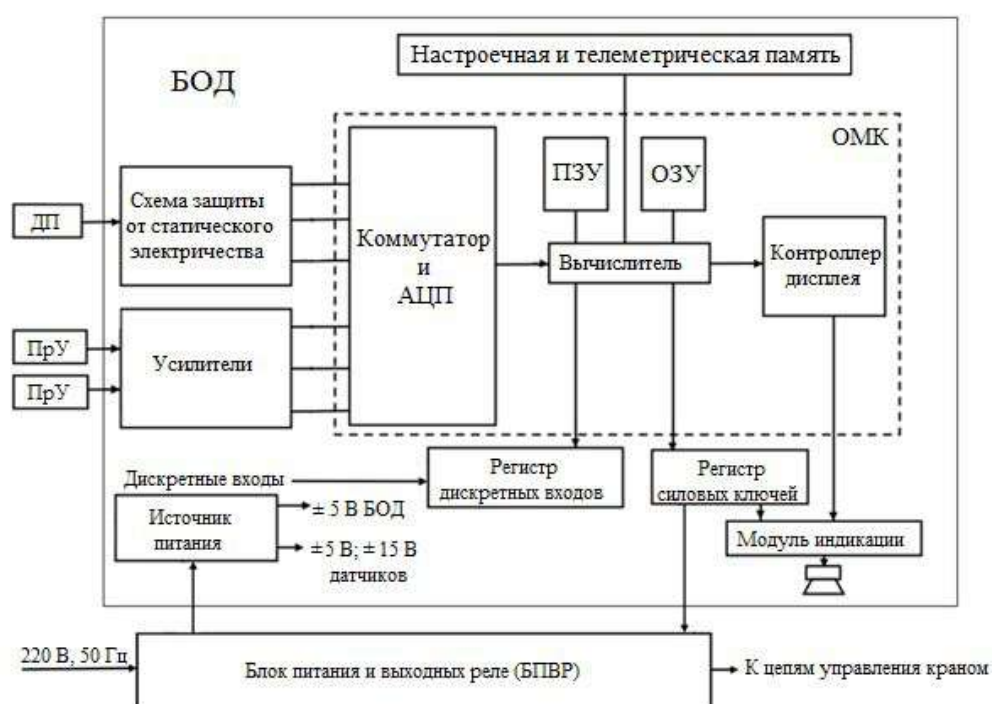


Рисунок 1 – Блок-схема усовершенствованного ограничителя ОНК-140 для козлового крана

Основные технические характеристики изображенного на рисунке 2 двухбалочного козлового крана ККД с решетчатой конструкцией моста [9] приведены в таблице 1.

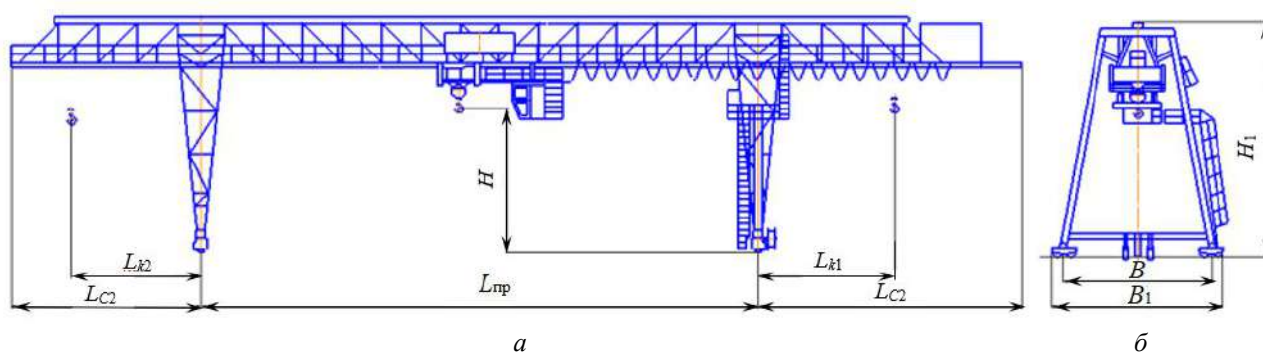


Рисунок 2 – Схема двухбалочного козлового крана ККД с решетчатой конструкцией моста:
а – вид спереди; б – вид сбоку

Таблица 1 – Основные технические характеристики козлового крана ККД

Характеристика		
наименование	обозначение	численное значение
Грузоподъемность, т	Q	10; 12,5; 16; 20; 25; 32; 50
Пролет крана, м	$L_{пр}$	11,3; 16,0 (18,0); 20; 25; 32; 42
Высота подъема, м	H	До 14
Рабочий вылет консолей, м	L_{k1}, L_{k2}	6,3; 8,0
Высота крана, м	H_1	14,5; 16,25
Ширина крана, м	B_1	12,5; 17,03
Длина крана, м	$L_{пр} + L_{C1} + L_{C2}$	До 59,5

Диапазон перемещения грузовой тележки козлового крана при длине пролета $L_{пр} = 42$ м с учетом консолей составит

$$L = L_{пр} + L_{k2} + L_{k1};$$

$$L = 42 + 6,3 + 8 = 56,3 \text{ м.}$$

Таким образом, для определения положения грузовой тележки необходим датчик, позволяющий измерять длину до 60 м.

Основным элементом датчика длины стрелы (ДДС) автокранов в приборах безопасности ОНК-140 является проволочный переменный резистор типа СП5-21-1-6,8 кОм $\pm 0,5$ %. Кабель ДДС при выдвижении стрелы вращает пружинный барабан и связанный с ним через редуктор вал потенциометра. Возврат потенциометра в исходное состояние осуществляется пружинным барабаном.

Максимальная длина вытягиваемого троса, вращающего подпружиненный барабан, составляет только 34 м [10]. Усложнять подобную конструкцию увеличением передаточного числа редуктора нецелесообразно из-за снижения точности измерений. К тому же потенциометр имеет ограниченное число рабочих циклов.

Известные устройства для контроля положения грузовой тележки на мосту крана [11] и для определения местоположения грузовой тележки на мосту крана [12] являются механическими и поэтому не могут использоваться в современных системах автоматики.

В качестве датчика положения грузовой тележки предложено использовать энкодер с тросовым барабаном HighLine BTF19-J1QM6064 [13].

Благодаря компактной конструкции тросовые датчики линейных перемещений легко монтируются в труднодоступных местах. В промышленности востребованы названные приборы, в том числе и на подъемно-транспортном оборудовании [14].

Основные технические характеристики энкодера приведены в таблице 2.

По аналогии с ограничениями по координатной защите автокранов с телескопической стрелой координаты ограничения рабочей зоны козлового крана $L_{л.г}$ и $L_{п.г}$ поочередно заносятся крановщиком в оперативную память. Загорание соответствующих светодиодов свидетельствует о вводе данных ограничений.

В процессе работы при достижении грузовой тележкой одного из граничных положений движение тележки автоматически прекращается, загорается индикатор «СТОП», включается звуковой сигнал, соответствующий светодиод переходит в мигающий режим.

После отмены ограничений свечение соответствующих светодиодов прекращается.

Учитывая многообразие работы козлового крана в связи с перспективой объединения сортировочной и грузовой операций и организации обработки грузов в технологический процесс работы сортировочной горки, вопросам безопасности проводимых работ должно придаваться первостепенное значение.

Таблица 2 – Основные технические характеристики энкодера с тросовым барабаном HighLine BTF19-J1QM6064

Наименование параметра	Значение параметра
Диапазон измерения, м	0 – 60
Энкодеры	Абсолютные
Погрешность воспроизведения, мм, не более	5
Отклонение от линейности, мм, не более	2
Напряжение питания, В	10 – 30
Потребляемая мощность, Вт, не более	1,5
Вес, кг	16,62
Материал измерительного троса	Стальной гибкий многопроволочный провод, нержавеющая сталь 1.4401 V4A
Средний срок службы тросового механизма в зависимости от типа нагрузки, циклы	1000000
Фактическая длина вытянутого троса, м	60,2
Тип защиты	IP64
Диапазон рабочей температуры, °C	От минус 30 до плюс 70

Внешний вид лицевой панели доработанного прибора ОНК-140 приведен на рисунке 3.

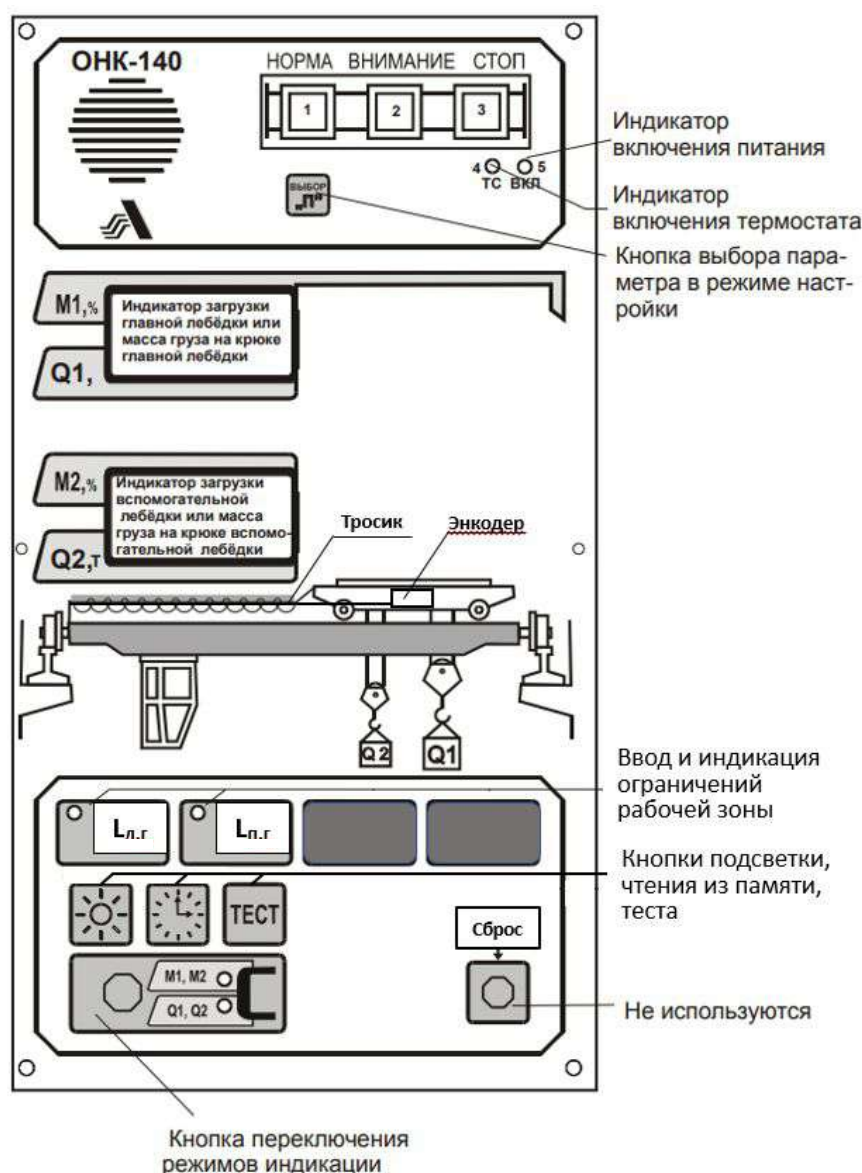


Рисунок 3 – Внешний вид лицевой панели доработанного прибора ОНК-140

Предложенные технические решения по доработке системы безопасности с использованием современных измерительных средств обеспечивают возможность надежной работы при длине пролета козловых кранов до 60 м.

Реализация предложенных в данной статье технических решений позволит не только повысить безопасность погрузо-разгрузочных работ, но и минимально уменьшить основные работы на сортировочных станциях, обеспечивая на свободных путях безопасный роспуск составов.

Список литературы

1. Персональный сайт – Главная. Козловые краны // kozlovye-kranu.narod.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://www.kozlovye-kranu.narod.ru> (дата обращения: 24.10.22).
2. Патент № 2388680 Российская Федерация, МПК В65G 63/04 (2006.01), В65G 67/60 (2006.01). Терминал для поточной обработки контейнеров на основе сортировочной горки Кузовкова : № 2008123074/11 : заявлено 10.06.2008 : опубликовано 10.05.2010 / Кузовков А. М. – 19 с. : 15 ил. – Текст : непосредственный.
3. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения» (в ред. приказа от 12.04.2016 № 146). – Москва : ЗАО «НТЦ ПБ», 2014. – 144 с. – Текст : непосредственный.
4. Ограничитель нагрузки крана (ограничитель грузоподъемности) ОНК-140 : Руководство по эксплуатации ЛГФИ.408844.009-40 РЭ. – Арзамас : ОАО «Арзамасский электро-механический завод», 2003. – 39 с. – Текст : непосредственный.
5. Ограничитель нагрузки крана мостового типа ОНК-160М : Руководство по эксплуатации НПКУ.408844.029 РЭ. – Арзамас : ОАО «Арзамасский электро-механический завод», 2010. – 79 с. – Текст : непосредственный.
6. Ограничитель грузоподъемности крана ОГШ-2. ЗАО «ИТЦ «КРОС». – Ивanteeвка, 2018 // itc-kros.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://itc-kros.ru/ogranichiteligrupozopodemnosti/ogranichitel-grupozopodemnosti-krana-ogsh-2.html> (дата обращения: 11.12.2022).
7. Ограничитель грузоподъемности мостовых и козловых кранов «Волна ОГМК2-01-ХЛ» : Руководство по эксплуатации ИВАМ.484469.021-01 РЭ. – Новосибирск : АО «НИИ измерительных приборов» – Новосибирский завод им. Коминтерна, 2004. – 37 с. – Текст : непосредственный.
8. Ограничитель нагрузки крана (ограничитель грузоподъемности) ОНК-140 : Руководство по эксплуатации ЛГФИ.408844.009-32 РЭ. – Арзамас : ОАО «Арзамасский электро-механический завод», 2003. – 37 с. – Текст : непосредственный.
9. Грузоподъемное оборудование. Кран козловой трубчатой и решетчатой конструкции типа ККТ, КК, ККД. Главная – ООО «ВологдаТочМаш» – Производство... // tochmash35 : сайт. – Текст : электронный. – URL: www.tochmash35 (дата обращения: 05.08.2022).
10. Датчик длины стрелы ДДС-01, ДДС-02, ДДС-03, ДДС-04 (ЛГФИ.401.161.002-01; -02, -03) для прибора безопасности ОНК-140 // kran-master74.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: https://kran-master74.ru/spares/sistemy_kontrolya_i_upravleniya_stroitelno_dorozhnoy_tekhniko/ogranichiteli_nagruzki_krana_onk_140_onk_160_onk_160s/bloki_i_datchiki/datchiki_dlin_y_strely/datchik_dlin_y_strely_dds_01_dds_02_dds_03_dds_04_lgfi_401_161_002_01_02_03_dlya_pribora_bezopasnosti (дата обращения: 12.12.2022).
11. Патент № SU 1171412 A1, МПК В66С 13/46 (23.12.80). Устройство для контроля положения грузовой тележки на мосту крана : № 3700125/29-11 : заявлено 13.02.1984 : опубликовано 07.08.1985. – 2 с. : 2 ил. – Текст : непосредственный.
12. Патент № SU 624872 A1, МПК В66С 13/18 (2006.01). Устройство для определения местоположения грузовой тележки на мосту крана : № 2383323/29-11 : заявлено 05.07.1976. : опубликовано 25.09.1978. – 2 с. : 2 ил. – Текст : непосредственный.

13. Энкодеры с тросовым барабаном HighLine BTF19-J1QM6064 // www.sick.com : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://www.sick.com/ru/ru/encoders/wire-draw-encoders/highline/c/g287466> (дата обращения: 28.10.2022).

14. Тросиковые датчики линейных перемещений // shamrin.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://shamrin.ru/trosikovye-datchiki-lineynyh-peremescheniy> (дата обращения: 25.11.2022).

References

1. *Personal'nyj sajt – Glavnaya | Kozlovye krany* [Personal website – Home | Gantry Cranes]. Available at: <http://www.kozlovye-krany.narod.ru/> (accessed 24.10.2022).

2. Kuzovkov A.M. *Patent RU 2388680 C2*, 10.05.2010.

3. Federal Norms and Rules in the field of industrial safety «Safety Rules for hazardous production Facilities where Lifting structures are used» (as amended by Order No. 146 of 12.04.2016), Moscow, ZAO «NTC PB» Publ., 2003, 144 p. (In Russian).

4. Crane Load Limiter (Load capacity limiter) ONK-140 : Operating Manual LGFI.408844.009-40 RE, Arzamas, OAO «Arzamasskij Elektromekhanicheskij zavod» Publ., 2003, 39 p. (In Russian).

5. ONK-160M bridge type crane Load Limiter : Operating Manual NPKU.408844.029 RE, Arzamas, JSC «Arzamas Electromechanical Plant» Publ., 2010, 79 p. (In Russian).

6. *Ogranichitel' gruzopod'yomnosti krana OGSН-2*. ZAO «ITC «KROS». – Ivanteevka, 2018 [Load capacity limiter of the OGSН-2 crane. CJSC «ITC «KROS». – Ivanteevka, 2018]. Available at: <http://itc-kros.ru/ogranichiteligruzopodemnosti/ogranichitel-gruzopodemnosti-krana-ogsh-2.html> (accessed 11.12.2022).

7. Load capacity limiter of bridge and gantry cranes «Wave OGMK2-01-XL» : Operating manual IVAM.484469.021-01 RE., Novosibirsk, SC «Research Institute of Measuring Instruments Novosibirsk Plant named after Komintern» Publ., 2004, 37 p. (In Russian).

8. Crane Load Limiter (Load capacity limiter) ONK-140 : Operating Manual LGFI.408844.009-32 RE, Arzamas, SC «Arzamas Electromechanical Plant» Publ., 2003, 37 p. (In Russian).

9. *Gruzopod'emnoe oborudovanie. Kran kozlovoj trubchatoj i reshetchatoj konstrukcii tipa KKT, KK, KKD. Glavnaya – ООО «VologdaTochMash»* [Lifting equipment. Gantry crane of tubular and lattice construction type KKT, KK, CD. Home – LLC «Vologdatochmash»]. Available at: www.tochmash35 (accessed 05.08.2022).

10. *Datchik dliny strely DDS-01, DDS-02, DDS-03, DDS-04 (LGFI.401.161.002-01; -02, -03) dlya pribora bezopasnosti ONK-140* [Boom Length Sensor DDS-01, DDS-02, DDS-03, DDS-04 (LGFI.401.161.002-01; -02, -03) for ONK-140 safety device]. Available at: https://kran-master74.ru/spares/sistemy_kontrolya_i_upravleniya_stroitelno_dorozhnoy_tekhniko/ogranichiteli_nagruzki_krana_onk_140_onk_160_onk_160s/bloki_i_datchiki/datchiki_dlina_strely/datchik_dlina_strely_dds_01_dds_02_dds_03_dds_04_lgfi_401_161_002_01_02_03_dlya_pribora_bezopasnosti (accessed 12.12.2022).

11. Kuprijanov A.K. *Patent SU 1171412 A1*, 07.08.1985.

12. Marichev D.M., Il'chenko E.N., Makarov Ju.P. *Patent SU 624872 A1*, 25.09.1978.

13. *Enkodery s trosovym barabanom HighLine BTF19-J1QM6064* [Encoders with cable drum HighLine BTF19-J1QM6064]. Available at: <https://www.sick.com/ru/ru/encoders/wire-draw-encoders/highline/c/g287466> (accessed 28.10.2022).

14. *Trosikovye datchiki lineynyh peremeshchenij* [Cable sensors of linear movements]. Available at: <https://shamrin.ru/trosikovye-datchiki-lineynyh-peremescheniy> (accessed 25.11.2022).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Тихонов Юрий Борисович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 44-39-01.

E-mail: tichonov_ub@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Tikhonov Yuri Borisovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

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

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

E-mail: tichonov_ub@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Тихонов, Ю. Б. Повышение безопасности работы козловых кранов на железнодорожных станциях и сортировочных горках / Ю. Б. Тихонов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 2 (54). – С. 89 – 97.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Tikhonov Yu.B. Improving the safety of gantry cranes at railway stations and marshalling yards, 2023, no. 2 (54), pp. 89-97 (In Russian).

УДК 656.073.7+004.94

Р. Г. Король, А. С. Акельев

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС),
г. Хабаровск, Российская Федерация

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ПОГРАНИЧНЫХ ПЕРЕХОДОВ ТРАНСПОРТНОГО КОРИДОРА «ПРИМОРЬЕ-1» В УСЛОВИЯХ УВЕЛИЧЕНИЯ ГРУЗОПОТОКА

Аннотация. Переориентация грузопотоков на «восточное» направление транспортировки и увеличение загруженности объектов транспортного комплекса Дальнего Востока акцентировали внимание на необходимости ускоренного развития транспортной и терминально-логистической инфраструктуры. Динамика объемов внешней торговли России и Китая прогнозируется на двукратном увеличении, что потребует усиления пропускной способности отдельных элементов дальневосточных транспортных коридоров. Резервы пропускной способности транспортно-логистических объектов ограничены, поэтому актуальным вопросом является инфраструктурное развитие при прогнозируемом увеличении грузопотока на отдельных участках транспортных коридоров. Целью исследования является оценка пропускной способности пограничных пунктов пропуска международного транспортного коридора «Приморье-1» с учетом развития железнодорожной инфраструктуры и совершенствования технологических процессов. Объект исследования – железнодорожный и автомобильный пункты пропуска «Пограничный». Предмет исследования – инфраструктура и технология работы пунктов пропуска на направлении «Пограничный (РФ) – Суйфэнхэ (КНР)». В работе использованы математические и теоретические методы исследования, включая визуализацию и моделирование. В статье визуально представлены объекты транспортно-логистической инфраструктуры пограничного перехода «Пограничный», а также разработана функционально-технологическая схема работы программы имитационного моделирования работы совмещенного (железнодорожно-автомобильного) пограничного пункта пропуска. В 2026 г. планируется построить в Приморском крае транспортно-логистический центр «Контейнерный терминал Гродеково» с плановой мощностью 230 тыс. контейнеров. В условиях увеличения объемов грузопотока было произведено моделирование функционирования железнодорожного пункта пропуска «Пограничный» при развитии железнодорожной инфраструктуры станции Гродеково и моделирование функционирования автомобильного пункта пропуска «Пограничный» при переходе на круглосуточный режим работы. Результаты моделирования показали, что суточная пропускная способность железнодорожного и автомобильного пунктов пропуска увеличилась до 650 вагонов и 300 автомобилей соответственно, но при дальнейшем увеличении объемов грузопотока на направлении «Россия – Китай – Россия» потребуется комплексный подход к развитию трансграничной инфраструктуры.

Ключевые слова: имитационное моделирование, пограничные станции, международные транспортные коридоры, пограничные пункты пропуска, трансграничные переходы.

Roman G. Korol, Andrey S. Akeliev

Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, the Russian Federation

MODELING OF THE CAPACITY OF BORDER CROSSINGS OF THE «PRIMORYE-1» TRANSPORT CORRIDOR IN CONDITIONS OF INCREASING CARGO TRAFFIC

Abstract. The reorientation of cargo flows to the «eastern» direction of transportation and the increase in the workload of the objects of the transport complex of the Far East focused attention on the need for accelerated development of transport and terminal logistics infrastructure. The dynamics of the volume of foreign trade between Russia and China is projected to double, which will require strengthening the capacity of individual elements of the Far Eastern transport corridors. The reserves of the capacity of transport and logistics facilities are limited, therefore, infrastructure development is an urgent issue with a projected increase in cargo traffic on certain sections of transport corridors. The purpose of the study is to assess the capacity of border checkpoints of the «Primorye-1» international transport corridor, taking into account the development of railway infrastructure and improvement of technological processes. The object of the study is the railway and automobile «Pogranichny» crossing points. The subject of the study is the infrastructure and technology of the checkpoints in the direction «Pogranichny (Russia) – Suifenhe (China)». The paper uses mathematical and theoretical research methods, including visualization and modeling. The article visually presents the objects of the transport and logistics infrastructure of the border crossing «Pogranichny», and also developed a functional and technological scheme of the simulation program of the combined (railway-automobile) border checkpoint. In 2026, it is planned to build a transport and logistics center «Container Terminal Grodekovo» in Primorsky Krai with a planned capacity of 230 thousand containers. In the conditions of increasing cargo traffic, the simulation of the functioning of the railway checkpoint «Pogranichny» was carried out during the development of the railway infrastructure of the Grodekovo station and the simulation of the functioning of the automobile checkpoint «Pogranichny» during the transition to round-the-clock operation. The simulation results showed that the daily capacity of railway and automobile checkpoints has increased to 650 wagons and 300 cars, respectively, but with a further increase in the volume of cargo traffic on the Russia – China – Russia route, an integrated approach to the development of cross-border infrastructure will be required.

Keywords: simulation modeling, border stations, international transport corridors, border checkpoints, cross-border crossings.

Геополитическая ситуация, санкционное давление и глобальная перестройка экономических отношений оказали значительное влияние на функционирование мирового транспортно-логистического рынка, в том числе произошло перенаправление внешнеторговых грузопотоков [1]. По итогам 2022 г. объем внешней торговли России с Евросоюзом увеличился на 2,3 %, достигнув 258,6 млрд евро, при этом экспорт продукции в Европу составил 203,4 млрд евро, импорт товаров в Россию сократился на 38,1 % до 55,2 млрд евро. Это обусловлено ростом цен на поставляемые российской стороной энергоносители. Некоторые грузопотоки были перенаправлены из России в дружественные и нейтральные страны. В 2022 г. основными торговыми партнерами России были Турция, Белоруссия, Индия и Китай. В 2022 г. товарооборот России и Китая увеличился на 29,3 %, что составило 190,27 млрд долларов по сравнению со 147,2 млрд долларов в 2021 г. В текущих условиях Китай занимает 35,5 % от общего внешнеторгового оборота России. В январе – феврале 2023 г. товарооборот России и Китая увеличился на 25,9 % в сравнении с аналогичным периодом 2022 г., составив 33,7 млрд долларов. Тенденция увеличения объемов внешней торговли России и Китая и соответственно экспортно-импортных грузопотоков отражается на загруженности транспортной и терминально-логистической инфраструктуры Дальнего Востока [2]. Южные дальневосточные регионы имеют речные, морские и сухопутные трансграничные переходы с Китаем, которые формируют международные транспортные коридоры [3]. По территории Дальнего Востока проходят два международных транспортных коридора – «Приморье-1» и «Приморье-2», связывающих сухопутную российско-китайскую границу и морские порты Приморского края [4].

В рамках XVI международного форума и выставки «Транспорт России» под председательством Российской Федерации состоялось 11-е заседание Транспортного совета Расширенной туманганской инициативы (РТИ), на котором была представлена Транспортная

стратегия Российской Федерации до 2030 г. с прогнозом на период до 2035 г. В данной стратегии предусматривается следующее:

- ускоренное развитие международных транспортных коридоров по всей России, включая транспортные коридоры «Приморье-1» и «Приморье-2»;
- модернизация Транссибирской и Байкало-Амурской железнодорожных магистралей;
- развитие морских портов Дальневосточного бассейна.

На заседании Транспортного совета РТИ были определены задачи, стоящие перед транспортным комплексом, включающие в себя этапное увеличение пропускных и провозных способностей железной дороги до 180 млн т к 2024 г. и наращивание производственных и терминальных мощностей портов Дальнего Востока до 350 млн т к 2025 г. и до 450 млн т к 2030 г.

Международный транспортный коридор «Приморье-1» включает в себя железнодорожный пограничный переход Гродеково – Суйфэнхэ, многосторонний автомобильный пункт пропуска «Пограничный», двухсторонний автомобильный пункт пропуска «Полтавка», морские порты Владивосток, Восточный и Находка. Пограничный переход «Пограничный» соединяет провинцию Хэйлунцзян (КНР) с регионами Дальнего Востока и дает возможность через Китайско-Восточную железную дорогу доставлять грузы к дальневосточным морским портам России [5].

Согласно информации, размещенной на сайте Дальневосточного таможенного управления, проектная пропускная способность многостороннего автомобильного пункта пропуска (МАПП) «Пограничный» ежедневно составляет 160 транспортных средств в сутки в оба направления движения транспорта (80 из РФ, 80 из КНР). Расположенный в 95 км от поселка Пограничный автомобильный пункт пропуска «Полтавка» с пропускной способностью 130 транспортных средств (65 из РФ, 65 из КНР) выполняет функцию вспомогательного пограничного перехода для пассажирского транспортного потока.

Инфраструктурное развитие железнодорожного пункта пропуска (ЖДПП) «Пограничный» включает в себя следующие объекты: грузовая станция Гродеково, участковая станция третьего класса Гродеково II, промежуточные станции пятого класса Сосновая Падь и Рассыпная Падь (рисунок 1). Пропускная способность ЖДПП «Пограничный» составляет 32 грузовых состава и четыре пассажирских поезда в сутки.

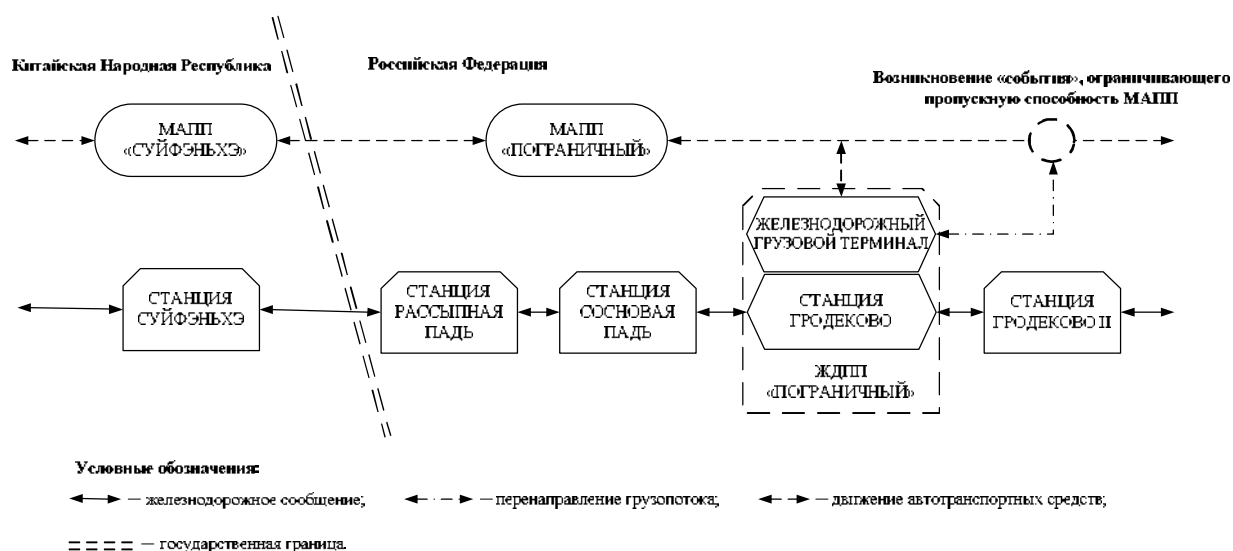


Рисунок 1 – Объекты транспортно-логистической инфраструктуры пограничного перехода «Пограничный»

По характеру работы станция Гродеково является грузовой межгосударственной передаточной и отнесена к категории внеклассной станции. Расположена станция на однопутном участке Уссурийск – Суйфэньхэ. Железнодорожный участок Гродеково – Суйфэньхэ имеет совмещенную колею 1435 – 1520 мм.

Основными операциями, выполняемыми на станции Гродеково, является передача грузов, подвижного состава и пассажиров через государственную границу. Импортный груз на станцию Гродеково поступает в вагонах колеи 1435 мм. При транзитной перевозке груз перегружается в вагоны колеи 1520 мм. При этом порожние вагоны после выгрузки отправляются на станцию Суйфэньхэ. Формирование поездов с экспортными грузами происходит на станции Гродеково II, поезда станцию Гродеково проходят транзитом, после выгрузки порожние вагоны отправляются со станции Суйфэньхэ на станцию Гродеково для дальнейшего формирования поездов назначением на станции Хабаровск II и Уссурийск в соответствии с планом формирования поездов. Формирование поездов на станции Гродеково происходит с помощью одного вытяжного пути, условная длина которого составляет 33 вагона. Станция Гродеково имеет развитое терминально-складское хозяйство, которое включает в себя контейнерные площадки, крытый склад, открытые площадки для навалочных и тяжеловесных грузов, а также таможенную зону [6].

Модернизация железнодорожного пограничного перехода Гродеково – Суйфэньхэ с учетом растущего грузопотока в «восточном» направлении является одной из ключевых задач, что подтверждается стратегией социально-экономического развития Приморского края до 2025 г. Согласно данной стратегии необходимы комплексная модернизация инфраструктуры железнодорожного транспорта, развитие терминально-логистических мощностей и увеличение пропуска груза до 30 млн т в год через пограничный переход Гродеково – Суйфэньхэ.

Недостаточное инфраструктурное развитие пограничных переходов является одним из основных ограничивающих факторов пропускной способности международных транспортных коридоров. В рамках продвигаемой Китайской Народной Республикой стратегии нового шелкового пути «Один пояс – один путь» требуется не только модернизация инфраструктурной составляющей международных транспортных коридоров, но и совершенствование технологических процессов. Разработка проектов по увеличению пропускной способности железнодорожных станций Гродеково и Суйфэньхэ для освоения перспективных объемов перевозок внешнеторговых грузов осуществляется специалистами России и Китая. Со стороны Китая рассматривается возможность перевода пункта пропуска Суйфэньхэ на круглосуточный режим работы. Правительством Российской Федерации и ОАО «РЖД» для увеличения провозной способности железнодорожного участка Гродеково – Суйфэньхэ выделено финансирование на реконструкцию двух существующих путей и прокладку двух дополнительных путей на станции Гродеково, что позволит формировать длинносоставные поезда в 71 условный вагон, соответственно увеличится максимальный вес поезда с 3,6 тыс. т до 5,2 тыс. т. Реализация обозначенных мероприятий и переход ЖДПП «Пограничный» на круглосуточный режим работы обеспечит рост провозной способности железнодорожного участка Гродеково – Суйфэньхэ с 11,2 млн т в текущих условиях до 17,7 млн т грузов в год.

Во время пандемии автомобильный пункт пропуска «Пограничный» функционировал нестабильно, увеличилась продолжительность контрольных процедур, что повлияло на пропускную способность пограничного перехода и приводило к образованию очереди автомобильных транспортных средств в ожидании пропуска через государственную границу. В определенные периоды транспортные компании были вынуждены перенаправлять грузопотоки на доставку железнодорожным транспортом (см. рисунок 1). Сегодня МАПП «Пограничный» занимает лидирующие позиции в регионе по грузообороту, при этом инфраструктурное обустройство пункта пропуска не соответствует современным требованиям, сооружения нуждаются в модернизации, недостаточное количество оборудования, терминалов, досмотровых площадок и т. д. В феврале 2023 г. на встрече российской и китайской делегаций обсуждался вариант увеличения количества пропуска автомобилей через границу путем перевода автомобильных пунктов пропуска на круглосуточный режим работы.

В 2024 г. после завершения проекта модернизации инфраструктуры МАПП «Пограничный» пропускная способность пограничного перехода составит 1300 автотранспортных средств.

Существуют методики определения пропускной способности железнодорожных и автомобильных пунктов пропуска, не учитывающие взаимного влияния и изменений объемов грузопотока при возмущающем воздействии внешней среды [7]. С целью анализа инфраструктурных возможностей и выявления резервов пропускной способности железнодорожных и автомобильных пограничных пунктов пропуска в рамках одного международного транспортного коридора при возникновении различных «событий», влияющих на ограничение пропускной способности трансграничных переходов, была разработана программа имитационного моделирования работы совмещенного (железнодорожно-автомобильного) пограничного пункта пропуска, позволяющая при перераспределении транспортных средств и соответствующих объемов грузопотока между пограничными пунктами пропуска оценить загруженность терминально-складской инфраструктуры и зон таможенно-пограничного контроля участвующих видов транспорта. Принцип работы программы представлен на рисунке 2 в виде функционально-технологической схемы.

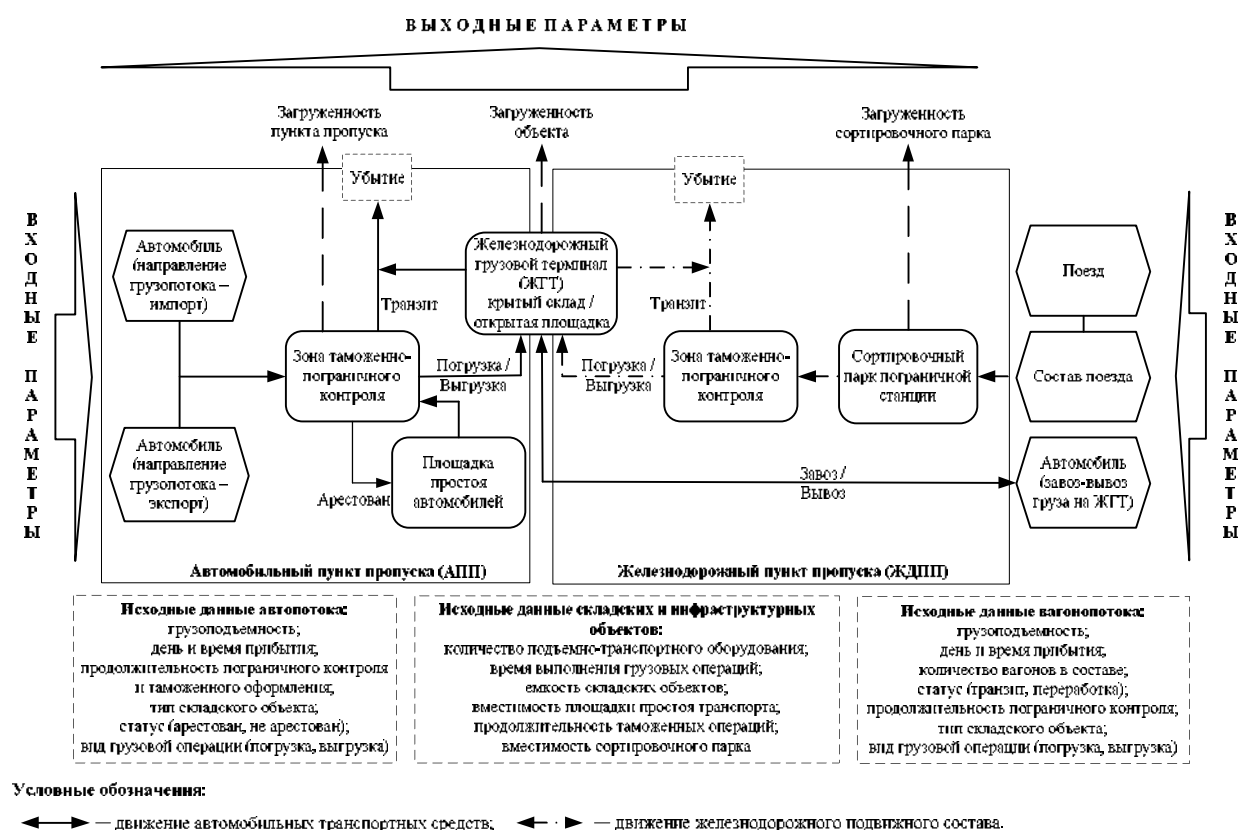


Рисунок 2 – Функционально-технологическая схема работы программы имитационного моделирования

Программа позволяет моделировать различные сценарии движения грузопотока в экспортном и импортном направлениях с учетом временно арестованных контролирующими органами транспортных средств, модификация характеристик технических устройств и инфраструктурных параметров при изменении объемов работы. В режиме реального времени отображается количество подвижного состава, находящегося в ожидании технологических операций, и количество занятых грузовых мест складских объектов железнодорожного грузового терминала (ЖГТ). По окончании процесса имитации программа формирует графическое представление загруженности автомобильного и железнодорожного пунктов пропуска.

Согласно федеральному проекту «Транспортно-логистические центры» и ведомственному проекту «Формирование сети транспортно-логистических центров» с целью снижения логистических издержек переработки грузопотоков на пограничном переходе «Гродеково – Суйфэньхэ (КНР)» и увеличения скорости доставки грузов планируется до 2026 г. построить в Приморском крае транспортно-логистический центр «Контейнерный терминал Гродеково» с плановой мощностью 230 тыс. контейнеров, который включает в себя складской комплекс, контейнерную площадку, склад временного хранения и таможенные зоны. Финансирование проекта создания ТЛЦ «Контейнерный терминал Гродеково» осуществляется компанией ОАО «РЖД» совместно с Министерством транспорта Российской Федерации и правительством Приморского края.

Для эффективного функционирования и обслуживания создаваемого ТЛЦ «Контейнерный терминал Гродеково» требуется усиление железнодорожной инфраструктуры железнодорожного пункта пропуска пограничной станции Гродеково. С помощью разработанной программы имитационного моделирования в работе произведен анализ загруженности путей ЖДПП «Пограничный» сортировочного парка пограничной станции Гродеково (рисунок 3) при удлинении железнодорожных путей до 71 условного вагона, укладке двух дополнительных путей и увеличении поступающего вагонопотока с учетом прогнозных значений внешнеторгового грузооборота [8].

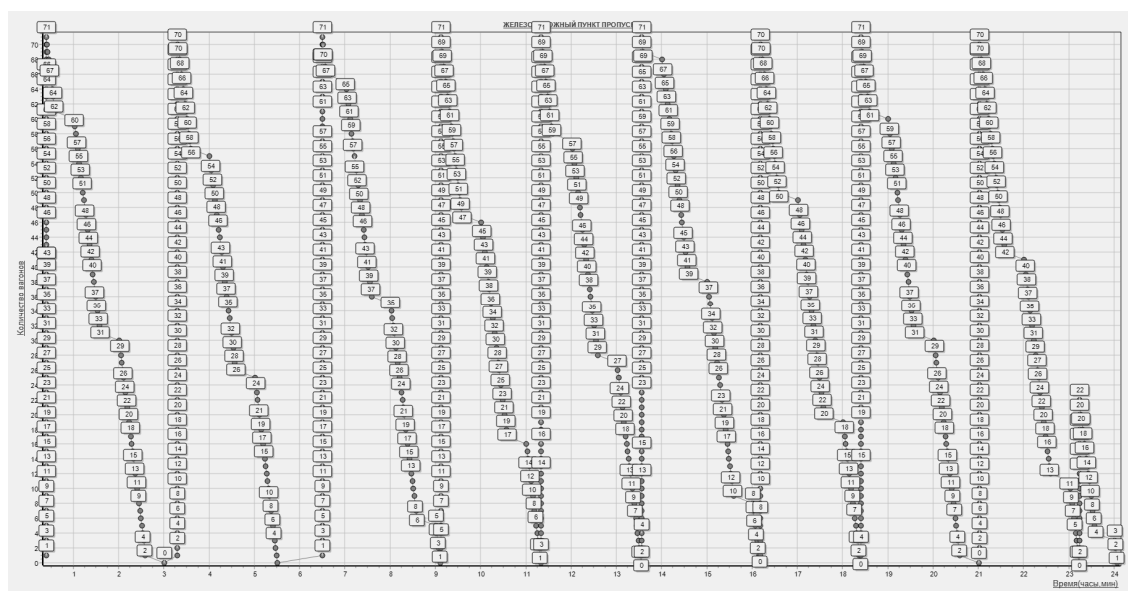


Рисунок 3 – Визуальное представление результатов моделирования функционирования ЖДПП «Пограничный» при развитии железнодорожной инфраструктуры станции Гродеково

Результаты моделирования показывают максимальную суточную загруженность ЖДПП «Пограничный» при обработке 652 вагонов, проходящих на участке Гродеково – Суйфэньхэ (КНР) без увеличения количества отправляемых поездов, при этом пропускная способность направления увеличилась на 50 %. Контролирующие органы осуществляют осмотр подвижного состава в круглосуточном режиме работы, что требует увеличения количества сотрудников пограничной и таможенной служб.

Отправка грузов железнодорожным транспортом на направлении «Россия – Китай – Россия» является более надежной и стабильной в сравнении с отправками автомобильным транспортом. При возникновении различных «событий», ограничивающих перемещение автотранспортных средств и грузов, создаваемая терминально-логистическая инфраструктура и развитие железнодорожной инфраструктуры позволят дополнительно принимать и обрабатывать внешнеторговый грузопоток.

В настоящее время пропуск автомобильных транспортных средств через российско-китайскую государственную границу происходит в штатном режиме. МАПП «Пограничный»

осуществляет таможенное оформление ежедневно с 9.00 до 21.00. В программе смоделирован сценарий при увеличении объемов пропуска автотранспорта и переходе таможенного поста на круглосуточный режим работы (рисунок 4).

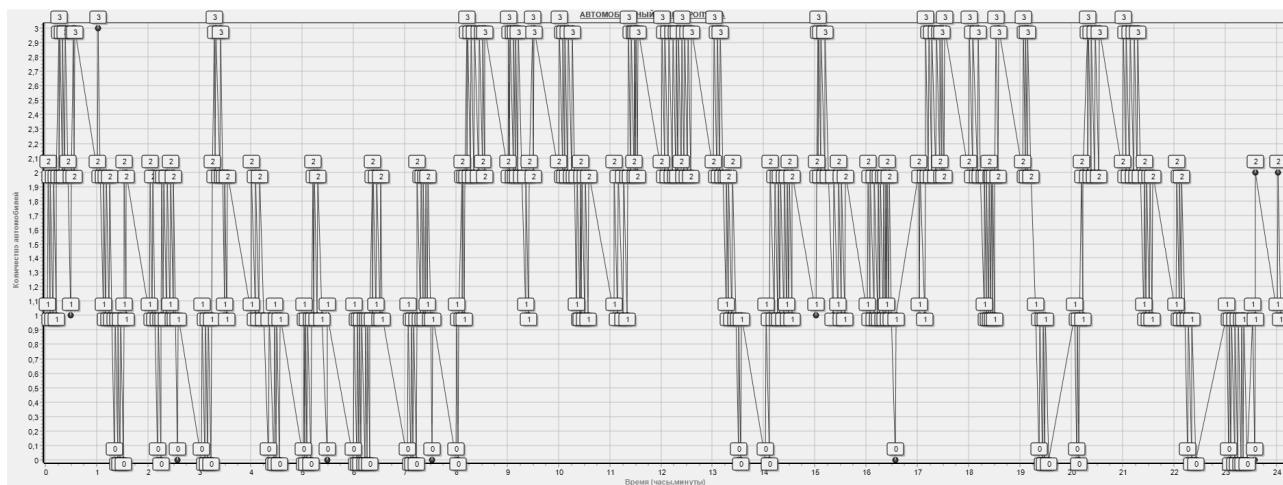


Рисунок 4 – Визуальное представление результатов моделирования функционирования МАПП «Пограничный» при переходе на круглосуточный режим работы

Результаты моделирования показывают суточную загруженность МАПП «Пограничный» при одновременной обработке на таможенном посту до трех автомобилей. Пропускная способность МАПП «Пограничный» при переходе на круглосуточный режим работы увеличилась до 300 автомобилей в обоих направлениях движения транспорта. Для реализации данного мероприятия необходимы изменение штатного расписания и дополнительное финансирование. В текущих условиях изменение режима работы автомобильного пункта пропуска позволит оперативно увеличить пропускную способность без модернизации существующей инфраструктуры, но данное технологическое решение имеет ограниченный положительный эффект и при увеличении объемов грузопотока в рамках МТК «Приморье-1» потребует комплексного подхода к развитию инфраструктуры и внедрения цифровых сервисов, объединяющих всех участников внешнеэкономической деятельности.

При проведении научных исследований, посвященных анализу загруженности пограничных пунктов пропуска с помощью инструментов имитационного моделирования, для приближенности результатов к реальным условиям функционирования транспортно-логистических объектов и пунктов пропуска требуется доступ к сбору статистической информации и ее дальнейшей экстраполяции на прогнозируемый период: интервалы прибытия поездов и автотранспорта, продолжительность грузовых операций, пограничного контроля и таможенного оформления транспорта.

В условиях «параллельного» импорта товаров и усиления внешнеэкономических связей со странами Азиатско-Тихоокеанского региона фиксируется рост грузоперевозок через Дальний Восток, поэтому в федеральных и региональных повестках акцентируется внимание на проектах развития транспортного комплекса региона. Сегодня необходимо решать вопросы оптимизации работы пограничных пунктов пропуска, физической и технологической модернизации инфраструктуры пограничных переходов, обеспечения резерва пропускной способности на максимальные объемы перемещения транспорта при международных перевозках [9].

В рамках государственной программы «Приоритет-2030» дальнейшие исследования Дальневосточного государственного университета путей сообщения совместно с Морским государственным университетом им. адмирала Г. И. Невельского направлены на разработку «цифровых двойников» пограничных пунктов пропуска [10] и апробацию на дальневосточных пограничных переходах с целью детального анализа пропускной способности транспортной и

терминально-логистической инфраструктуры международных транспортных коридоров и выявление ограничивающих элементов при поступлении различных объемов грузопотока.

Список литературы

1. Покровская, О. Д. Логистические транспортные системы России в условиях новых санкций / О. Д. Покровская. – Текст : непосредственный // Бюллетень результатов научных исследований. – 2022. – № 1. – С. 80–94.
2. Транспортно-логистические системы в условиях системных изменений в экономике / Э. А. Мамаев, А. Н. Гуда, В. А. Финоченко, К. А. Годованый. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 2 (86). – С. 145–154.
3. Пугачев, И. Н. Стратегия развития транспортных коридоров России : монография / И. Н. Пугачев, Ю. И. Куликов, А. С. Балалаев. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеанского гос. ун-та, 2014. – 243 с. – Текст : непосредственный.
4. Прокофьева, Т. А. Развитие транспортно-логистической инфраструктуры в Азиатской части России – стратегическое направление реализации транзитного потенциала / Т. А. Прокофьева. – Текст : непосредственный // Вестник транспорта. – 2011. – № 3. – С. 11–19.
5. Проблемы и перспективы развития транзитного потенциала МТК «Приморье-1» и «Приморье-2» / С. М. Гончарук, Вл. А. Анисимов, Н. С. Нестерова, М. В. Холоша. – Текст : непосредственный // Материалы всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Повышение эффективности транспортной системы региона: проблемы и перспективы». – Хабаровск : Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 2015. – С. 30–33.
6. Король, Р. Г. Моделирование терминально-логистических процессов переработки внешнеторговых грузов на пограничной станции Гродеково / Р. Г. Король, О. Н. Числов. – Текст : непосредственный // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТа). – 2022. – Т. 81. – № 3. – С. 258–266.
7. Методика определения пропускной и перерабатывающей способности железнодорожных пограничных пунктов / С. П. Вакуленко, П. В. Куренков [и др.]. – Текст : непосредственный // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2022. – № 3. – С. 8–13.
8. Маловецкая, Е. В. Применение принципов системного моделирования для построения прогнозных моделей вагонопотоков / Е. В. Маловецкая. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 3 (71). – С. 171–178.
9. Володькин, П. П. Исследование эффективности транспортно-логистических операций автомобильного транспорта в Приморском крае / П. П. Володькин, А. С. Рыжова, С. А. Архипов. – Текст : непосредственный // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2021. – № 1. – С. 17–22.
10. Имитационные модели в цифровых двойниках железнодорожных узлов / А. Н. Рахмангулов, С. Н. Корнилов, П. Н. Мишкурин, Д. В. Александрин. – Текст : непосредственный // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 3 (55). – С. 43–59.

References

1. Pokrovskaya O.D. Russia's logistics transport systems under new sanctions. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy – The Bulletin of Scientific Research Results*, 2022, no. 1, pp. 80-94 (In Russian).
2. Mamaev E.A., Guda A.N., Finochenko V.A., Godovany K.A. Transport and logistics systems in the context of systemic changes in the economy. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya – The scientific-technical journal «Vestnik Rostovskogo*

Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya» (Vestnik RGUPS), 2022, no. 2 (86), pp. 145-154 (In Russian).

3. Pugachev I.N., Kulikov Yu.I., Balalaev A.S. *Strategiya razvitiya transportnykh koridorov Rossii* [Strategy of development of transport corridors of Russia]. Khabarovsk, Pacific State University Publ., 2014, 243 p. (In Russian).

4. Prokof'eva T.A. Development of transport and logistics infrastructure in the Asian part of Russia – a strategic direction for the realization of transit potential. *Vestnik transporta – The Transport Massanger*, 2011, no. 3, pp. 11-19 (In Russian).

5. Goncharuk S.M., Anisimov V.I.A., Nesterova N.S., Kholosha M.V. Problems and prospects of the transit potential ITC «Primorye-1» and «Primorye-2». *Povyshenie effektivnosti transportnoj sistemy regiona: problemy i perspektivy: materialy vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferenciya s mezhdunarodnym uchastiem* [Improving the efficiency of the transport system of the region: problems and prospects: materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation]. Khabarovsk, 2015, pp. 30-33 (In Russian).

6. Korol R.G., Chislov O.N. Simulation of terminal and logistics processes of foreign trade cargo processing at the Grodekovo border station. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZHT) – The Russian Railway Science Journal*, 2022, vol. 81, no. 3, pp. 258-266 (In Russian).

7. Vakulenko S.P., Kurenkov P.V., Lyovin S.B., Astafiev A.V., Sadchikova V.A. Procedure for determining the passage and processing capacity of railways border points. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyy informacionnyy sbornik – The Transport: science, equipment, management (Scientific Information Collection)*, 2022, no. 3, pp. 8-13 (In Russian).

8. Malovetskaya E.V. Application of system modeling principles for the construction of forecast models of car traffic. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie – The Journal «Modern technologies. System analysis. Modeling»*, 2021, no. 3 (71), pp. 171-178 (In Russian).

9. Volodkin P.P., Ryzhova A.S., Arkhipov S.A. Analysis of the efficiency of transportation and logistics operations automobile transport in the Primorye territory. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyy informacionnyy sbornik – The Transport: science, equipment, management (Scientific Information Collection)*, 2021, no. 1, pp. 17-22 (In Russian).

10. Rakhmangulov A.N., Kornilov S.N., Mishkurov P.N., Alexandrin D.V. Simulation models in digital twins of railway junctions. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya – The Journal «Gerald of USURT»*, 2022, no. 3 (55), pp. 43-59 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Король Роман Григорьевич

Дальневосточный государственный университет
путей сообщения (ДВГУПС).

Серышева ул., д. 47, г. Хабаровск, 680021,
Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Технология транспортных
процессов и логистика», ДВГУПС.

Тел.: +7 (4212) 40-76-28.

E-mail: kingkhv27@mail.ru

Акельев Андрей Сергеевич

Дальневосточный государственный университет
путей сообщения (ДВГУПС).

Серышева ул., д. 47, г. Хабаровск, 680021,
Российская Федерация.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Korol Roman Grigorievich

Far Eastern State Transport University (FESTU).

47, Serysheva st., Khabarovsk, 680021, the Russian
Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor, head of
the department «Technology of transport processes and
logistics», FESTU.

Phone: +7 (4212) 40-76-28.

E-mail: kingkhv27@mail.ru

Akeliev Andrey Sergeevich

Far Eastern State Transport University (FESTU).

47, Serysheva st., Khabarovsk, 680021, the Russian
Federation.

Аспирант кафедры «Технология транспортных процессов и логистика», ДВГУПС.
Тел.: +7 (4212) 46-73-75.
E-mail: andrei.akelev@mail.ru

Postgraduate student of the department «Technology of transport processes and logistics», FESTU.
Phone: +7 (4212) 46-73-75.
E-mail: andrei.akelev@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Король, Р. Г. Моделирование пропускной способности пограничных переходов транспортного коридора «Приморье-1» в условиях увеличения грузопотока / Р. Г. Король, А. С. Акельев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 2 (54). – С. 97 – 106.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Korol R.G., Akeliev A.S. Modeling of the capacity of border crossings of the «Primorye-1» transport corridor in conditions of increasing cargo traffic. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 2 (54), pp. 97-106 (In Russian).

УДК 621.311

**Н. П. Местников^{1,2}, П. Ф. Васильев^{1,2}, В. З. Манусов³,
А. К. Корякин⁴, А. М.-Н. Альзаккар⁵**

¹Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова (СВФУ),
г. Якутск, Российская Федерация;

²Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН (ИФТПС СО РАН),
г. Якутск, Российская Федерация;

³Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), г. Новосибирск, Российская Федерация;

⁴Арктический государственный агротехнологический университет (АГАТУ), г. Якутск, Российская Федерация;

⁵Университет Аль-Баас, г. Хомс, Сирийская Арабская Республика

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ КОНЦЕНТРАЦИИ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ

Аннотация. Статья посвящена исследованию эффекта системы концентрации солнечного излучения, состоящей из линз Френеля, для фотоэлектрических электростанций. В работе применены ключевые требования по выполнению натурных исследований в объектах гелиоэнергетики в соответствии с теорией планирования экспериментальных исследований. Использованы методы обработки экспериментальных данных путем вычисления среднестатистических показателей генерирующей мощности фотоэлектрической электростанции. Натурные исследования выполнены в центральной части Республики Саха (Якутия) в течение февраля – марта. Сущностью исследования является идентификация характера влияния системы концентрации солнечного излучения на выработку электроэнергии от фотоэлектрической электростанции в зимне-весенний период эксплуатации. Получены контрольные параметры изменения величины генерирующей мощности фотоэлектрической электростанции до и после применения системы концентрации солнечного излучения. Установлено, что в случае применения данной системы выработка электроэнергии от фотоэлектрической электростанции увеличивается на 16...17 % при условии отсутствия факторов, снижающих интенсивность солнечного излучения. Зафиксировано, что в случае наличия малой облачности выработка электроэнергии от фотоэлектрической электростанции уменьшается на 6 % без применения системы концентрации солнечного излучения. В случае применения данной системы в условиях малой облачности выработка электроэнергии уменьшается на 7...8 %. Обоснована неэффективность применения линз Френеля для фотоэлектрической электростанции в условиях облачной погоды вследствие низкой активности солнечного излучения. Дополнительно зафиксировано незначительное увеличение температуры поверхности панели в случае применения данных линз. В этой связи рекомендуется внедрение системы концентрации солнечного излучения для фотоэлектрических электростанций только в зимне-весенний период в целях повышения выработки электроэнергии от фотоэлектрической электростанции и предотвращения риска скачкообразного повышения поверхностной температуры фотоэлектрических панелей. Полученные результаты исследований могут быть применены в целях актуализации комплекса мероприятий по повышению энергоэффективности объектов гелиоэнергетики на территории Северо-Востока России.

Данные исследования проведены в рамках выполнения государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Рег. № 121032200059-7, научная тема FWRS-2021-0003). Работа

выполнена с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН. Выражаем благодарность ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН за возможность проведения исследований на научном оборудовании Центра.

Ключевые слова: линза Френеля, фотоэлектрическая панель, фотоэлектрическая электростанция, выработка электроэнергии, Север.

**Nikolay P. Mestnikov^{1,2}, Pavel F. Vasilyev^{1,2}, Vadim Z. Manusov³,
Alexander K. Koryakin⁴, Ahmad M-N. Alzakkar⁵**

¹North-Eastern Federal University named M.K. Ammosov (NEFU), Yakutsk, the Russian Federation;

²Institute of Physical and Technical Problems of the North named V.P. Larionov SB RAS, Yakutsk, the Russian Federation;

³Novosibirsk State Technical University (NSTU), Novosibirsk, the Russian Federation;

⁴Arctic State Agrotechnological University (ASAU), Yakutsk, the Russian Federation;

⁵Al Baath University, Homs, Syrian Arab Republic

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF INTRODUCING A SOLAR RADIATION CONCENTRATION SYSTEM FOR PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS IN THE CONDITIONS OF THE NORTH-EAST OF RUSSIA

Abstract. The paper is devoted to the study of the effect of the solar radiation concentration system, consisting of Fresnel lenses, for photovoltaic power plants. The paper applies the key requirements for the implementation of full-scale research in solar power facilities in accordance with the theory of experimental research planning. Methods for processing experimental data were used by calculating the average statistical indicators of the generating power of a photovoltaic power plant. Field studies were carried out in the central part of the Republic of Sakha (Yakutia) during February – March. The essence of the study is to identify the nature of the influence of the solar radiation concentration system on the generation of electricity from a photovoltaic power plant in the winter-spring period of operation. The control parameters of the change in the value of the generating power of the photovoltaic power plant before and after the application of the solar radiation concentration system are obtained. It has been established that in the case of using this system, the generation of electricity from a photovoltaic power plant increases by 16 ... 17 % provided there are no factors that reduce the intensity of solar radiation. It has been recorded that in the case of low cloudiness, electricity generation from a photovoltaic power plant is reduced by 6% without the use of a solar concentration system. In the case of using this system in conditions of low cloudiness, power generation is reduced by 7 ... 8 %. The inefficiency of using Fresnel lenses for a photovoltaic power plant in cloudy weather due to the low activity of solar radiation is substantiated. Additionally, a slight increase in the panel surface temperature was recorded in the case of using these lenses. In this regard, it is recommended to introduce a solar concentration system for photovoltaic power plants only in the winter-spring period in order to increase electricity generation from a photovoltaic power plant and prevent the risk of an abrupt increase in the surface temperature of photovoltaic panels. The obtained research results can be applied in order to update the set of measures to improve the electric power efficiency of solar power facilities in the North-East of Russia.

These studies were carried out as part of the implementation of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Reg. No. 121032200059-7, scientific topic FWRS-2021-0003). The work was carried out using the scientific equipment of the Center for Collective Use of the Federal Research Center of the YaNC SB RAS. We would like to express our gratitude to the Center for Collective Use of the FRC YSC SB RAS for the opportunity to conduct research using the scientific equipment of the Center.

Keywords: fresnel lens, PV-panel, solar power plant, power generation, North.

Электроснабжение отдаленных населенных пунктов Северо-Востока России производится посредством эксплуатации объектов автономной генерации. Под данными объектами подразумеваются дизель-генераторные, газопоршневые, бензогенераторные, парогенераторные установки, требующие бесперебойного обеспечения комплектующими и горюче-смазочными материалами (ГСМ) [1]. Территория Северо-Востока России имеет слаборазвитую инфраструктуру, где отсутствуют железнодорожное сообщение и круглогодичные автомобильные дороги. Вследствие этого фактическая стоимость комплектующих и ГСМ для объектов автономной генерации увеличивается на 150...200 %, при сроках доставки до двух лет [2].

В этой связи с начала 2000-х гг. на территории Республики Саха (Якутия) начата реализация проектов строительства ветровых и фотоэлектрических электростанций (далее – ветровые и фотоэлектрические ЭС) в целях уменьшения потребления дорогостоящих ГСМ и изношенности ключевых генерирующих мощностей. На территории региона эксплуатируются 23 фотоэлектрических ЭС [3] с суммарной установленной мощностью более 3 МВт. Главный

результат внедрения фотоэлектрических ЭС – это экономия дизельного топлива и снижение выбросов вредных веществ в окружающую среду. В течение 2016 – 2017 гг. на территории региона годовое потребление дизельного топлива уменьшилось на 474 т ($\downarrow 1\,493,1$ т CO_2) с общим экономическим эффектом 26 млн руб.

Определенные климатические факторы Северо-Востока России негативно влияют на выработку электроэнергии от фотоэлектрических ЭС [4, 5]. Вследствие влияния поверхностного загрязнения, вызванного образованием слоя мелкодисперсных фракций пыли, генерирующая мощность фотоэлектрических панелей (ФЭП) уменьшается на 44...46 % [6]. Существует другой вид поверхностного загрязнения, вызванного образованием снегового покрова, при этом генерирующая мощность ФЭП уменьшается на 13...87 % в зависимости от слоя снега [7].

Известно, что значительная доля выработки электроэнергии от фотоэлектрических ЭС на территории Северо-Востока России фиксируется в весенне-летний период вследствие значительной солнечной инсоляции ($2,09...5,99$ кВт·ч/м² в сутки). В данный период эксплуатации объем потребления электроэнергии уменьшается в два – три раза на фоне окончания отопительного сезона. В связи с этим появляются значительные излишки электроэнергии от фотоэлектрических ЭС, которые зачастую не потребляются.

В зимний период на фоне низких показателей солнечной инсоляции ($0,04...0,95$ кВт·ч/м² в сутки) фотоэлектрические ЭС практически не вырабатывают электроэнергию. Однако значительная доля потребления электроэнергии в населенных пунктах Северо-Востока России приходится на зимний период ввиду функционирования котельных установок для отопления зданий и сооружений. На арктической территории практически весь необходимый объем электроэнергии вырабатывается от объектов автономной генерации с высоким потреблением дорогостоящих ГСМ и изношенностью ключевых генерирующих мощностей – дизель-генераторных установок. Резервирование объектов автономной генерации на территории Северо-Востока России составляет 200...300 %, что является одним из основных требований в целях обеспечения требуемой надежности при проектировании, строительстве и эксплуатации данных объектов. При выполнении данного требования пропорционально снижается коэффициент использования установленной мощности объекта автономной генерации.

На основании изложенного выше поиск и исследование способов повышения выработки электроэнергии от фотоэлектрических ЭС в зимний период эксплуатации на территории Северо-Востока России имеет высокую актуальность и прикладную востребованность.

В источнике [8] описаны исследования возможности внедрения плоских фотоэлектрических концентраторов для фотоэлектрической ЭС. Данный концентратор позволяет увеличить коэффициент отражения энергии солнечного излучения на поверхность ФЭП. В качестве концентраторов применялись материалы, имеющие высокую долю отражения солнечного излучения. Положительный эффект внедрения в виде повышения выработки электроэнергии получен только в случае равномерного отражения энергии солнечного излучения на переднюю поверхность ФЭП. Однако вследствие размещения концентраторов на горизонтальной поверхности земли значительно увеличивается риск их ускоренного загрязнения мелкодисперсными фракциями пыли.

Известно изобретение [9], где предлагается применение линз Френеля в качестве концентратора энергии солнечного излучения в целях повышения направляемой солнечной инсоляции на поверхность ФЭП с последующим увеличением ее выработки электроэнергии. Сущность данного изобретения заключается в применении линз Френеля на основе размещения их на поддерживающих механических системах. Зафиксировано, что линзы Френеля имеют значительную эффективность только в случае обеспечения автоматизированной ориентации ФЭП к источнику солнечного излучения. Известно, что данное условие выполняется посредством применения трекерных установок.

Концентраторы энергии солнечного излучения применяются не только для ФЭП, но и в фотоэлектрических коллекторах [10], где на территории южной части Урала идентифицирована зависимость выработки электроэнергии фотоэлектрической ЭС от величины солнечной инсоляции при использовании данных концентраторов и вакуумных солнечных коллекторов. Доказана целесообразность использования вакуумных солнечных коллекторов для бытового потребителя на территории России. Обоснована дополнительная возможность применения концентраторов в различных направлениях развития гелиоэнергетики.

Известны прикладные исследования [11 – 14] по изучению возможности внедрения концентраторов энергии солнечного излучения, функционирующих на основе отражения излучения на поверхность ФЭП. Отличительной чертой данного исследования является то, что в качестве концентраторов применены полувогнутые гибкие зеркала, размещенные напротив ФЭП. Установлено, что посредством внедрения данных концентраторов установленная мощность фотоэлектрической ЭС может быть сокращена с последующим уменьшением ее капитальной стоимости в 1,20...1,46 раза.

Возможность внедрения линз Френеля и других видов концентраторов солнечного излучения в некоторой степени исследованы для внедрения в фотоэлектрические ЭС. Однако при этом в известных исследованиях незначительно исследован характер влияния поверхностной температуры ФЭП, которая увеличивается вследствие применения данных концентраторов. Не изучены особенности функционирования фотоэлектрических ЭС с концентраторами солнечного излучения и в климатических условиях Северо-Востока России. Климат Северо-Востока России отличается тем, что в весенний период сохраняется отрицательная температура окружающей среды со значительным увеличением суточной солнечной инсоляции ($0,13 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2 \rightarrow 4,54 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$). Специфические условия Северо-Востока России могут обеспечить возможность повышения выработки электроэнергии от объектов гелиоэнергетики с применением указанных выше концентраторов солнечного излучения при минимальном увеличении поверхностной температуры ФЭП за счет естественного охлаждения окружающей средой.

В ходе выполнения натурных исследований применено следующее оборудование: поликристаллические ФЭП установленной мощностью 8 Вт с 16 ед. фотоэлементов, имеющие единичную площадь $27,04 \text{ см}^2$ ($52 \text{ мм} \times 52 \text{ мм}$) по 0,5 Вт; система концентрации солнечного излучения (СКСИ), состоящая из линз Френеля, которые имеют единичную площадь $27,04 \text{ см}^2$ ($52 \text{ мм} \times 52 \text{ мм}$) с фокусным расстоянием 50 мм; контроллер заряда; аккумуляторная батарея (АКБ); климатическая станция с функцией регистрации и передачи данных в режиме реального времени; определенный перечень измерительных и регистрирующих устройств.

Расчетное расстояние между СКСИ и передней поверхностью ФЭП соответствует фокусному расстоянию линзы Френеля ($\approx 50 \text{ мм}$). Данное требование сформировано вследствие выполнения предварительных замеров при различных диапазонах расстояния между линзой и панелью. При выполнении данных замеров установлено, что наиболее значительная концентрация энергии солнечного излучения наблюдается при размещении СКСИ в пределах фокусного расстояния линзы.

Учтены ключевые требования теории планирования экспериментальных исследований с повторностью натурных исследований. В рамках обработки экспериментальных данных использованы методы идентификации среднестатистических показателей функционирования фотоэлектрической ЭС и способы получения необходимых закономерностей и графиков, описывающих характер воздействия системы концентрации солнечного излучения на рабочие характеристики фотоэлектрической ЭС.

Натурные исследования по изучению особенностей функционирования системы концентрации энергии солнечного излучения для ФЭП выполнены в зимне-весенний период. Место проведения данных исследований имеет следующие характеристики: зимний температурный минимум $-65 \text{ }^\circ\text{C}$; летний температурный максимум $+40 \text{ }^\circ\text{C}$; суточная

фотоэлектрическая радиация горизонтальная летом – 4,56...6,23 кВт·ч/м²; суточная фотоэлектрическая радиация горизонтальная зимой – 0,13...1,11 кВт·ч/м²; годовая продолжительного солнечного сияния – 1 800...2 000 ч.

Определена повторность выполнения экспериментов в соответствии с выражением (1), где учитываются уровень и количество климатических факторов (фактор, снижающий солнечную инсоляцию – облачность; температура окружающей среды; снеговой покров):

$$n = m^i = 2^3 = 8 \text{ раз,} \quad (1)$$

где m – уровни климатических факторов, о. е.;

i – количество климатических факторов, ед.

По выражениям (2) произведено формирование электроэнергетических показателей и закономерностей эффекта внедрения СКСИ в ФЭП:

$$P_{\text{ФЭП}}, P_{\text{ФЭП}}^{\text{ЛФ}} = f(E_{\text{солн}}); \quad T_{\text{ФЭП}}, T_{\text{ФЭП}}^{\text{ЛФ}} = f(E_{\text{солн}}); \quad T_{\text{ФЭП. факт}}, T_{\text{ФЭП. факт}}^{\text{ЛФ}} = f(E_{\text{солн}}) - T_{\text{о.с}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{ФЭП}}$ – генерирующая мощность ФЭП без СКСИ, Вт/м²;

$P_{\text{ФЭП}}^{\text{ЛФ}}$ – генерирующая мощность ФЭП с СКСИ, Вт/м²;

$E_{\text{солн}}$ – горизонтальная фотоэлектрическая радиация, Вт/м²;

$T_{\text{ФЭП}}$ – поверхностная температура ФЭП без СКСИ, °С;

$T_{\text{ФЭП}}^{\text{ЛФ}}$ – поверхностная температура ФЭП без СКСИ, °С;

$T_{\text{ФЭП. факт}}$ – фактическая поверхностная температура ФЭП без СКСИ с учетом вычета температуры воздуха, °С;

$T_{\text{ФЭП. факт}}^{\text{ЛФ}}$ – фактическая поверхностная температура ФЭП с СКСИ с учетом вычета температуры воздуха, °С;

$T_{\text{о.с}}$ – действительная температура окружающей среды из климатической станции, °С.

Математическое моделирование этого исследования не произведено вследствие того, что данное исследование имеет натурно-экспериментальный характер. Моделирование может быть произведено тогда и только тогда, когда будут идентифицированы ключевые характеристики функционирования СКСИ в составе ФЭП путем выполнения дополнительных натурных исследований на весь оставшийся диапазон температуры окружающей среды (от –65 °С до +35 °С) в климатических условиях Северо-Востока России.

Алгоритм выполнения натурных исследований состоит из следующих действий (рисунок 1): проверка наличия ясной погоды в окружающей среде с возможностью допущения переменной облачности; сборка и монтаж комплектующих фотоэлектрической ЭС микромощности; проверка на исправность фотоэлектрической ЭС микромощности, измерительных и регистрирующих устройств; размещение ФЭП в перпендикулярно-прямой ориентации к источнику солнечного излучения; подготовка и размещение ФЭП в условиях окружающей среды в течение 0,5...1 ч; установка опытного образца СКСИ на исследуемую ФЭП; замер и регистрация экспериментальных данных фотоэлектрической ЭС и климатических данных посредством применения климатической станции в период середины солнечного дня; повтор замера и регистрации экспериментальных и климатических данных по выражению (1); обработка полученных данных; идентификация электроэнергетических закономерностей по выражениям (2); формирование результатов натурных исследований.

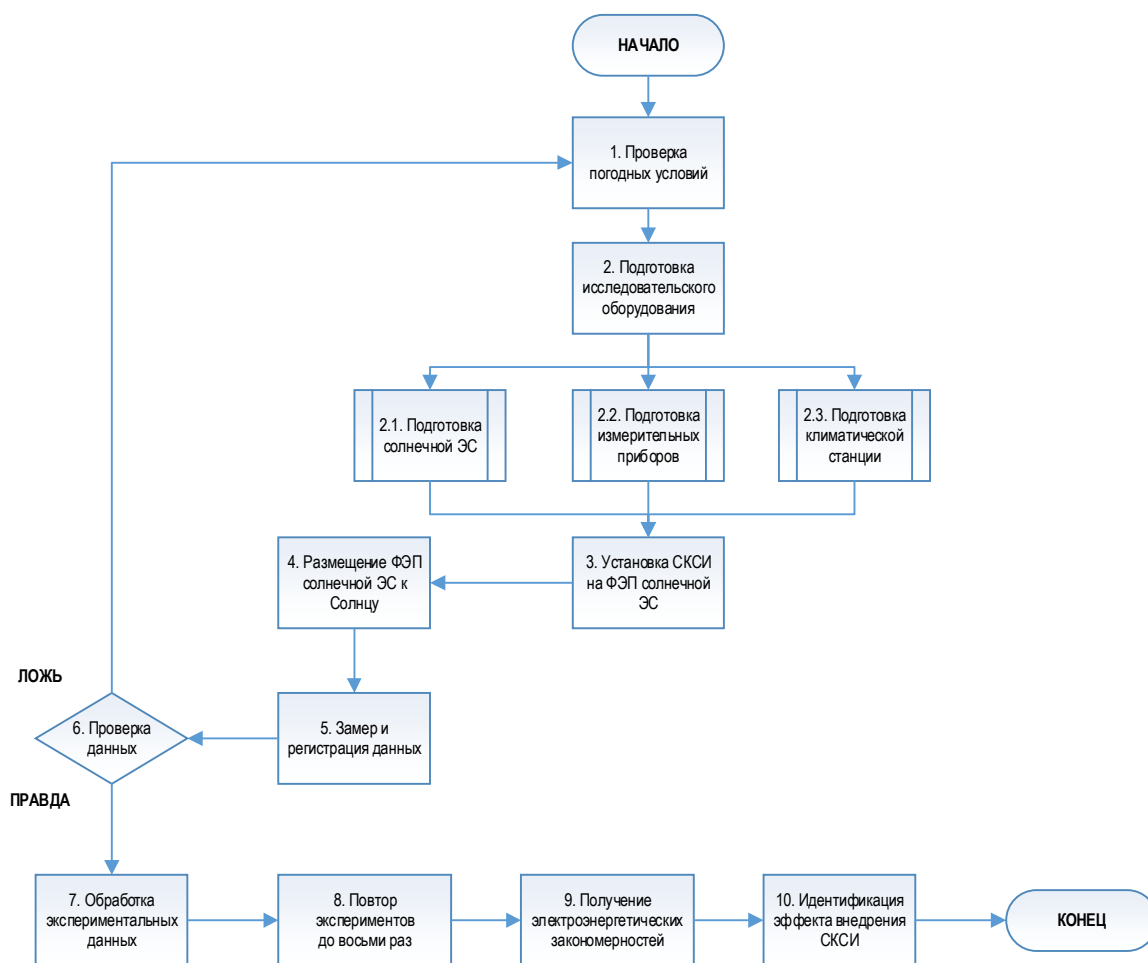


Рисунок 1 – Алгоритм выполнения натурных исследований

На рисунке 2 представлены внешние виды исследуемых ФЭП в ходе идентификации эффекта внедрения СКСИ с линзами Френеля.

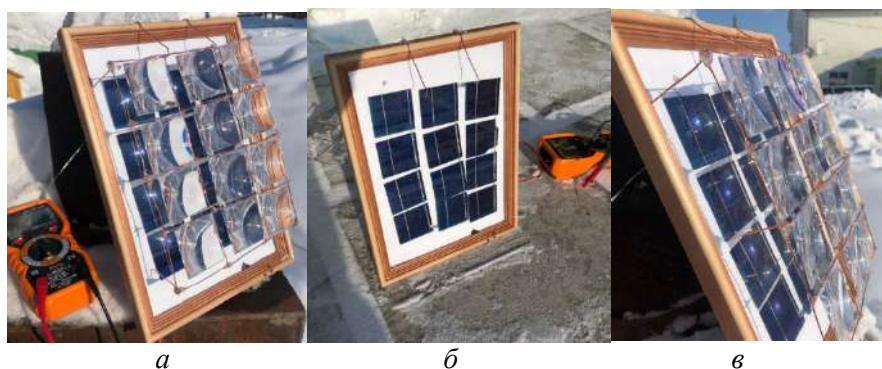


Рисунок 2 – Внешние виды ФЭП в ходе выполнения натурных исследований:

- а* – передний вид фотоэлектрической панели с линзами Френеля;
- б* – передний вид фотоэлектрической панели без линз Френеля;
- в* – боковой вид фотоэлектрической панели с линзами Френеля

После обработки и проверки экспериментальных данных идентифицированы закономерности функционирования ФЭП с применением СКСИ, где на рисунках 3 и 4 – зависимости генерирующей мощности ФЭП от величины фотоэлектрической радиации и на рисунке 5 – зависимости поверхностной температуры ФЭП от величины фотоэлектрической радиации.

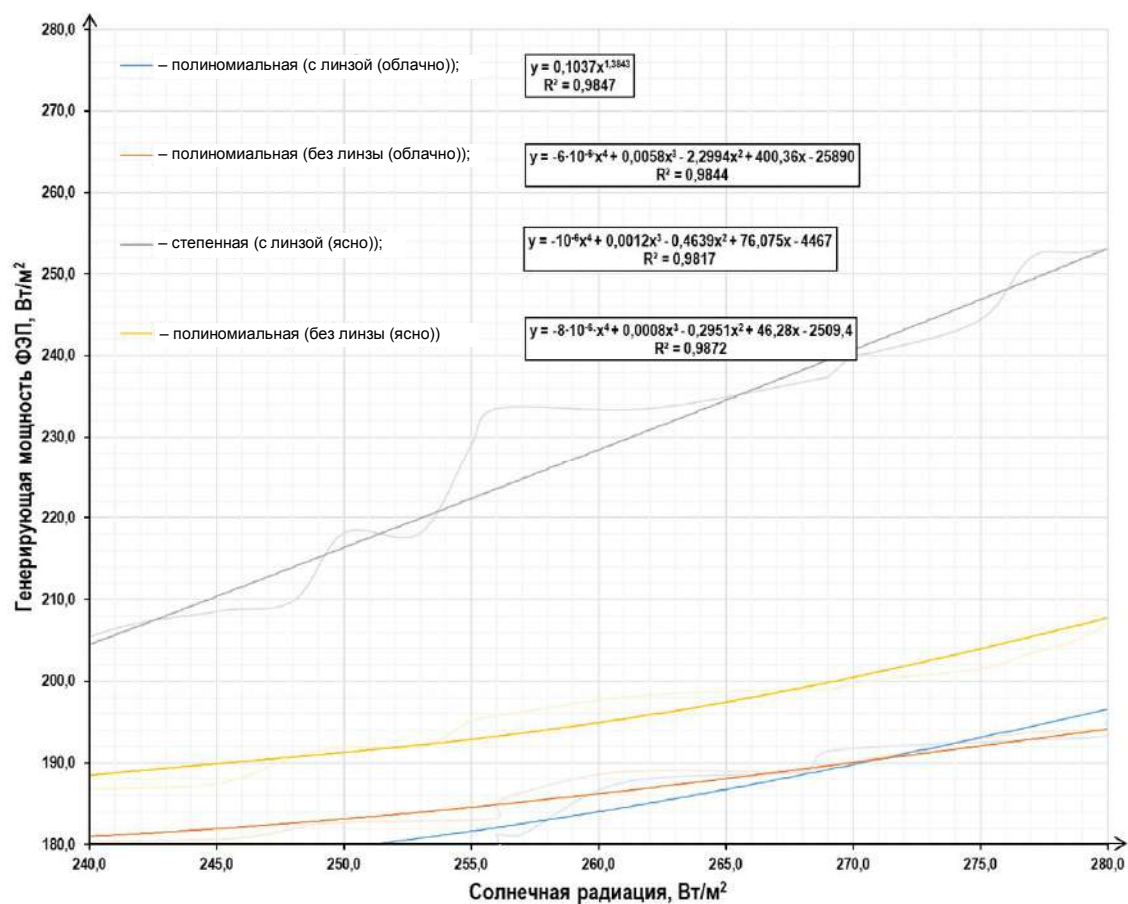


Рисунок 3 – Зависимость генерирующей мощности ФЭП при двух погодных условиях: ясно и облачно

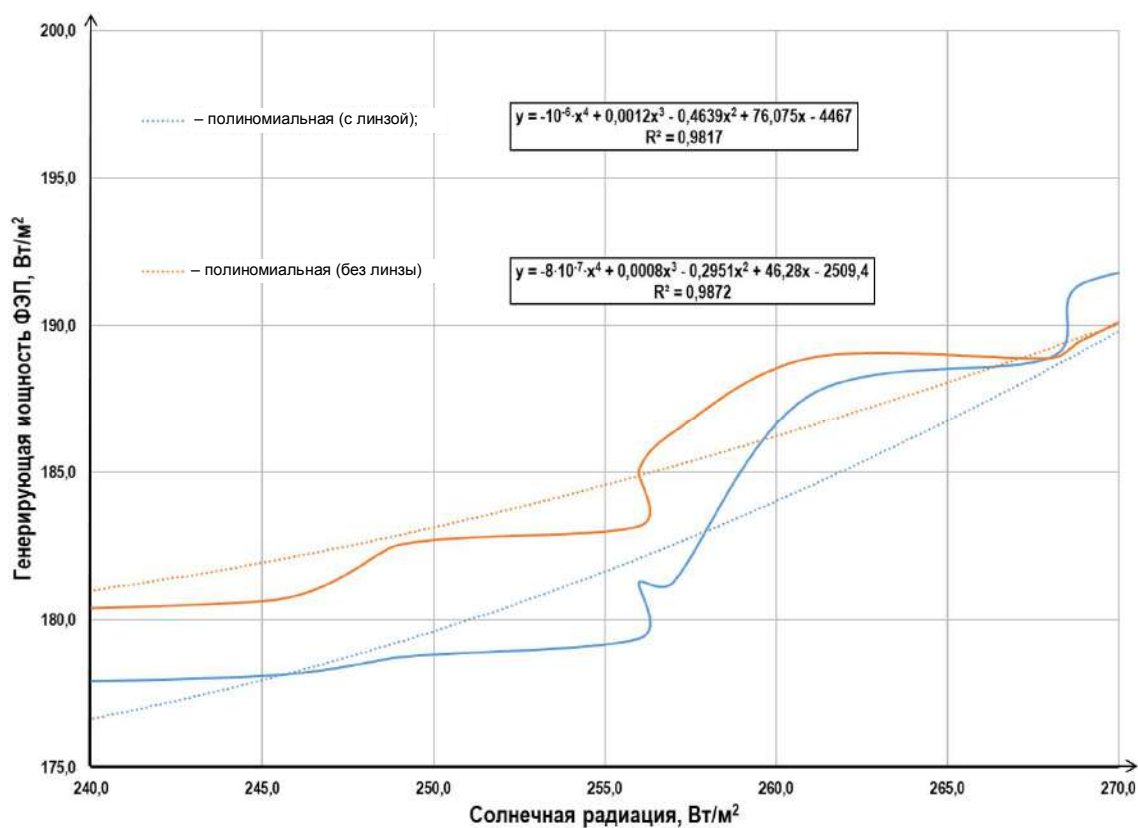


Рисунок 4 – Зависимость генерирующей мощности ФЭП при переменной облачности

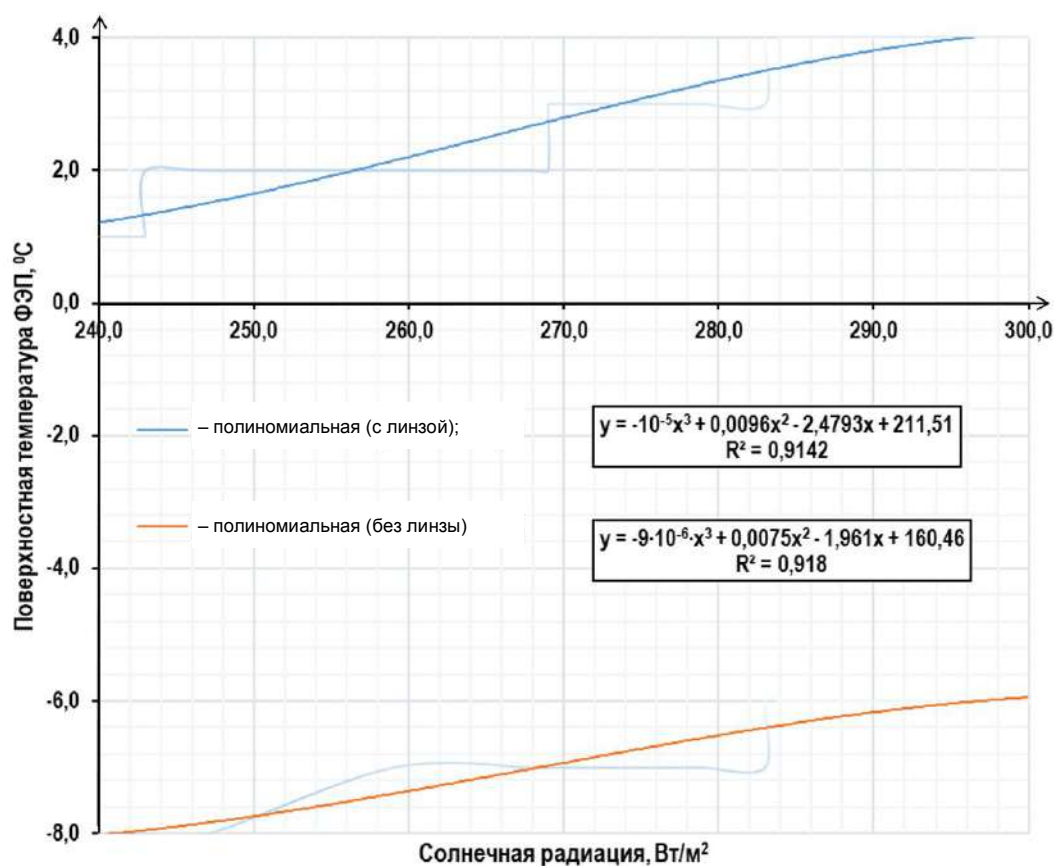


Рисунок 5 – Зависимость поверхностной температуры ФЭП

На графиках (см. рисунки 3 и 4) видно, что вследствие применения СКСИ выработка электроэнергии от ФЭП увеличилась на 16...17 % в сравнении с ФЭП без СКСИ. Данный факт обоснован перпендикулярной ориентацией ФЭП к источнику солнечного излучения, где при данном положении производится максимальная концентрация солнечного излучения через СКСИ – линзы Френеля. В случае наступления переменной облачности уменьшается интенсивность фотоэлектрической радиации [15 – 17] с последующим снижением концентрации солнечного излучения. В этой связи при переменной облачности выработка электроэнергии от ФЭП без СКСИ уменьшилась на 6,03 %, а в случае размещения СКСИ на ФЭП – на 7,94 % вследствие искажения направленного воздействия солнечного излучения на горизонтальную поверхность земли.

Таким образом, падение выработки электроэнергии имеет значительную глубину в случае применения СКСИ – линз Френеля, чем при их отсутствии. Следовательно, внедрение СКСИ для ФЭП предпочтительно при наличии двух условий:

обеспечение постоянной ориентации ФЭП источнику солнечного излучения. Данное условие объясняется необходимостью обязательного наличия перпендикулярно-прямого размещения ФЭП к солнцу в целях получения направленного воздействия солнечного излучения в максимальном объеме;

отсутствие облачности. Данное условие обосновывается необходимостью обязательного наличия направленного воздействия солнечного излучения на горизонтальную поверхность земли. В случае наличия облачности данное воздействие искажается.

Не менее значительную роль занимает изучение температуры поверхности ФЭП (см. рисунок 4) до и после применения СКСИ – линз Френеля. До применения СКСИ температура поверхности ФЭП составила –8...–6 °С, а при применении линз она увеличивается до +1...+4 °С при температуре окружающей среды –28 °С.

Вследствие применения СКСИ поверхностная температура ФЭП увеличивается на 10...12 °С при отрицательной температуре окружающей среды и фотоэлектрической радиации –

197,1...314 Вт/м². Однако кривая увеличения поверхностной температуры ФЭП в том числе солнечных коллекторов зависит не только от температуры окружающей среды и интенсивности фотоэлектрической радиации, но и от суточной продолжительности солнечного сияния, особенностей теплообмена воздушной среды в положительном диапазоне температуры, интенсивности движения воздушных потоков у поверхности панели и др. [18 – 19]. Известно, что рекомендуемый рабочий диапазон температуры окружающей среды для ФЭП без СКСИ составляет +30...+35 °С, при котором не фиксируется уменьшение выработки электроэнергии и отсутствует излишний нагрев поверхности панели [20].

При идентификации рабочего диапазона температуры применения СКСИ для ФЭП необходим обязательный учет указанных выше внешних факторов. Также необходимо выполнение дополнительных натурных исследований по аналогичному алгоритму (см. рисунок 1) в остальном диапазоне температуры окружающей среды от –28 до +35 °С, т. е. эмпирически можно будет определить рабочий диапазон температуры применения СКСИ для ФЭП.

Полученные закономерности для вычисления генерирующей мощности ФЭП с СКСИ – линзами Френеля и поверхностной температуры панели в условиях безоблачной погоды и температуры окружающей среды –28 °С представлены в выражениях:

$$P_{\text{ФЭП}}^{\text{ЛФ}}(t) = (-1 \cdot 10^{-6} \cdot E_{\text{солн}}^4 + 0,0012 \cdot E_{\text{солн}}^3 - 0,4639 \cdot E_{\text{солн}}^2 + 76,075 \cdot E_{\text{солн}} - 4467) \times t, \quad R^2 = 0,9817; \quad (3)$$

$$T_{\text{ФЭП}}^{\text{ЛФ}} = -1 \cdot 10^{-5} \cdot E_{\text{солн}}^3 + 0,0096 \cdot E_{\text{солн}}^2 - 2,4793 \cdot E_{\text{солн}} + 239,51, \quad R^2 = 0,9142, \quad (4)$$

где R^2 – величина достоверности аппроксимации, стремящаяся к единице.

В таблице 1 представлены результаты натурных исследований по изучению эффекта внедрения СКСИ – линз Френеля для ФЭП на его электроэнергетические показатели функционирования.

Таблица 1 – Результаты натурных исследований

Наименование параметра	Тип погоды	Генерирующая мощность, Вт/м ²	Изменение выработки, %
ФЭП без СКСИ	Безоблачно	198,61	0,00
ФЭП с СКСИ		231,51	16,57...17,21
ФЭП без СКСИ	Облачно	186,63	–6,03
ФЭП с СКСИ		182,85	–7,94

В электроэнергетической отрасли СКСИ линзы Френеля можно применить для увеличения выработки фотоэлектрических ЭС микро-, малой и средней мощности путем их компактного размещения на поверхности ФЭП с упрощенными процедурами монтажа и демонтажа. Фотоэлектрические ЭС на территории Северо-Востока России размещены в изолированных и удаленных территориях Республики Саха (Якутия). Дополнительное внедрение СКСИ в фотоэлектрические ЭС Республики Саха (Якутия) позволило бы увеличить их выработку электроэнергии и дополнительно уменьшит объемы потребления дизельного топлива.

В целях идентификации эффекта возможности внедрения СКСИ в фотоэлектрические ЭС Республики Саха (Якутия) выполнена ее технико-экономическая оценка с проведением имитационных вычислений. Объектом возможного внедрения СКСИ выбрана типовая фотоэлектрическая ЭС с установленной мощностью 30 кВт в населенном пункте Ючюгэй (Северо-Восток Якутии), функционирующая в составе автономной электроэнергетической системы при совместной синхронизации с дизельной электростанцией (далее – дизельная ЭС), имеющая установленную мощность 590 кВт. Данная фотоэлектрическая ЭС имеет трекерные

установки, на котором функционирующие ФЭП постоянно направлены к источнику солнечного излучения.

Период возможного применения СКСИ для ФЭП – сентябрь – май. Выбор данного периода обосновывается малой дневной суммой солнечной инсоляции на горизонтальной поверхности – $0,13...4,75 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ и низкой температурой окружающей среды – $-47,9...+1,9 \text{ }^\circ\text{C}$, где на фоне данных факторов вероятность избыточного нагревания поверхности ФЭП с СКСИ практически сводится к нулю.

В зимний период применения СКСИ для ФЭП рекомендуется производить процедуры периодического монтажа и демонтажа в зависимости от наличия облачной или пасмурной погоды. В условиях экстремально низких температур (менее $-30 \text{ }^\circ\text{C}$) в воздушной среде, как правило, наиболее фиксируются перистые или перисто-слоистые виды облачности, которые в минимальной степени снижают интенсивность солнечного излучения [4]. В данный период на территории Республики Саха (Якутия) преобладает безоблачная погода с минимальным количеством облачных и пасмурных дней.

В период с июня по август не предусматривается применение СКСИ для ФЭП, так как отсутствует необходимость в концентрации солнечного излучения ввиду значительной дневной суммы солнечной инсоляции на горизонтальной поверхности – $5,77...6,16 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ – и существует риск избыточного нагревания поверхности панелей на фоне высоких температур окружающей среды – $+10,1...+13,8 \text{ }^\circ\text{C}$ (при максимуме до $+37 \text{ }^\circ\text{C}$).

Указанный выше период эксплуатации СКСИ применен для проведения оценки возможности ее внедрения в фотоэлектрическую ЭС. Вычисление ключевых показателей данной оценки произведен на годовой период эксплуатации. Результаты оценки представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты оценки внедрения СКСИ в фотоэлектрическую электростанцию в с. Ючюгэй

Наименование параметра	Ед. изм.	Количественный показатель
Годовая выработка фотоэлектрической ЭС до внедрения	тыс. кВт · ч	33,85
Годовая выработка дизельной ЭС до внедрения		544,44
Годовое потребление дизельного топлива до внедрения	т	134,22
Годовая выработка фотоэлектрической ЭС после внедрения СКСИ	тыс. кВт · ч	36,37
Годовая выработка дизельной ЭС после внедрения		541,92
Годовое потребление дизельного топлива после внедрения	т	124,23
Годовое уменьшение потребления дизельного топлива		9,98
Фактическая стоимость дизельного топлива	тыс. руб./т	120,00
Годовая экономия денежных средств	тыс. руб.	1 197,60
Годовое увеличение выработки фотоэлектрической ЭС после внедрения	тыс. кВт · ч	2,52
Доля годового увеличения выработки фотоэлектрической ЭС после внедрения	%	7,44
Удельные капитальные расходы СКСИ	тыс. руб./кВт	443,70
Капитальные расходы СКСИ на фотоэлектрическую ЭС	тыс. руб.	13 311,00
Срок окупаемости внедрения СКСИ	лет	11,11

Оценка эффекта внедрения СКСИ на типовой фотоэлектрической ЭС на территории Северо-Востока России зафиксировала увеличение годовой выработки ФЭП на $7...7,5 \%$ с последующим уменьшением выработки электроэнергии от дизельной ЭС на $2,52 \text{ тыс. кВт} \cdot \text{ч}$ и снижением годового потребления дизельного топлива на $9,98 \text{ т}$ (около $1,2 \text{ млн руб.}$).

Существующие модели линз Френеля в настоящее время имеют высокую стоимость, например, затраты для покрытия панелей фотоэлектрической ЭС СКСИ с установленной

мощностью 1 кВт составят – 443,70 тыс. руб. Таким образом, на базе типовой фотоэлектрической ЭС срок окупаемости внедрения СКСИ составит 11...12 лет.

Результаты исследований могут быть применены в изменении комплекса прикладных мероприятий, направленных на повышение электроэнергетической эффективности фотоэлектрических электростанций, размещенных на территории Северо-Востока России. Сформированные рекомендации по применению линз Френеля могут быть внедрены в автономные фотоэлектрические электростанции на изолированных и отдаленных территориях.

В результате проведения натурных исследований зафиксировано увеличение выработки электроэнергии от фотоэлектрической панели на 16...17 % после внедрения системы концентрации энергии солнечного излучения с минимальным нагреванием поверхности панели, так как исследования велись в зимне-весенний период при температуре –45...–28 °С.

Определено, что в условиях облачной погоды направленное воздействие энергии солнечного излучения на горизонтальную поверхность земли искажается и линзы Френеля теряют возможность ее концентрации.

Выполнена оценка возможности внедрения системы концентрации энергии солнечного излучения в типовую фотоэлектрическую электростанцию в с. Ючюгэй, где зафиксировано увеличение годовой выработки электроэнергии на 7,44 % и экономии дизельного топлива, где срок окупаемости данного мероприятия составил 11...12 лет. Значительный период окупаемости объясняется значительной стоимостью линз Френеля (443,7 тыс. руб. на 1 кВт установленной мощности фотоэлектрической электростанции).

Данные обстоятельства приводят к необходимости проведения дальнейших натурных исследований в диапазоне температуры окружающей среды от –28 до +35 °С для определения рекомендуемого рабочего диапазона температуры применения линз Френеля для фотоэлектрических электростанций Северо-Востока России. Необходимо провести ряд исследований по выявлению влияния облачности и определению причин снижения эффективности работы ФЭП с СКСИ.

Список литературы

1. Местников, Н. П. Разработка гибридных систем электроснабжения для энергоснабжения удаленных потребителей в условиях Севера и Арктики / Н. П. Местников, П. Ф. Васильев, Ф. Х. Альхадж. – Текст: непосредственный // Международный технико-экономический журнал. – 2021. – № 1. – С. 47–56. – DOI 10.34286/1995-4646-2021-76-1-47-56. – EDN EGIGFP.

2. Королук, Ю. Ф. Децентрализованная система электроснабжения малочисленных населенных пунктов Якутии с использованием гибридных станций с солнечными панелями и суперконденсаторами / Ю. Ф. Королук, Н. П. Местников. – Текст: непосредственный // Проблемы и перспективы освоения Арктической зоны Северо-Востока России: материалы междунар. науч.-практ. конф. / СВФУ им. М.К. Аммосова. – Анадырь : Буки Веди, 2018. – С. 138–139. – EDN YODLQD.

3. Zakharov V., Prokhorov D., Pavlov N. Russian Arctic region energy balance (Republic of Sakha (Yakutia)). *E3S Web of Conferences*, vol. 114. Irkutsk, EDP Sciences, 2019, pp. 02005, DOI 10.1051/e3sconf/201911402005, EDN VZDBAI.

4. Местников, Н. П. Особенности эксплуатации солнечных электростанций микромощности в условиях Севера : монография / Н. П. Местников – Якутск : Офсет, 2021. – Ч. 1. – 113 с. – EDN HKUOSU. – Текст : непосредственный.

5. Местников, Н. П. Особенности эксплуатации фотоэлектрических электростанций микромощности в условиях Севера : монография / Н. П. Местников. – Якутск : Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, 2022. – 155 с. – EDN ТКТПРХ. – Текст : непосредственный.

6. Исследование влияния поверхностного загрязнения на функционирование фотоэлектрической панели в условиях Севера / Н. П. Местников, П. Ф. Васильев, А. М.-Н. Альзаккар, А. А. Лобашев. – Текст: непосредственный // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – 2022. – Т. 7. – № 1 (27). – С. 90–97. – DOI 10.25744/genb.2022.24.84.010. – EDN KPTDDE.
7. Куркина, И. И. Разработка способа защиты поверхности фотоэлектрической панели от снежного покрова в условиях Севера / И. И. Куркина, Н. П. Местников, П. Ф. Васильев. – Текст : непосредственный // Международный технико-экономический журнал. – 2022. – № 1. – С. 46–55. – DOI 10.34286/1995-4646-2022-82-1-46-55. – EDN RXQXOZ.
8. Кузнецов, П. Н. Повышение эффективности работы фотоэлектрических преобразователей при последовательном подключении / П. Н. Кузнецов, Л. Ю. Юферев. – Текст : непосредственный // Вестник ВИЭСХ. – 2017. – № 1 (26). – С. 90–97. – EDN YYYSNL.
9. Патент № 2286517 С1 Российская Федерация, МПК F24J 2/42. Фотоэлектрическая установка : № 2005104590/06 : заявлено 21.02.2005 : опубликовано 27.10.2006 / Алферов Ж. И., Андреев В. М., Зазимко В. Н. [и др.]. – Текст : непосредственный. – EDN UTTERQ.
10. Рахматулин, И. Р. Перспективы использования различных конструкций фотоэлектрических концентраторов на территории Российской Федерации / И. Р. Рахматулин, И. М. Кирпичникова. – Текст: непосредственный // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21. – № 2 (121). – С. 127–136. – DOI 10.21285/1814-3520-2017-2-127-136. – EDN YFMJYZ.
11. Стребков, Д. С. Солнечные электростанции с концентраторами для крупномасштабной фотоэлектрической энергетики / Д. С. Стребков, А. Е. Иродионов, Н. Ю. Бобовников. – Текст : непосредственный // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». – 2016. – № 5 (20). – С. 96–108. – EDN XTKDOP.
12. Bettonte M., Fendrich M.A., Quaranta A., Orlandi M., Miotello A. (2019). Solar Concentration for Wastewaters Remediation: A Review of Materials and Technologies. *Applied Science* 9, 2019, vol. 118, no. 9, pp. 1-26, <https://doi.org/10.3390/app9010118>.
13. Bhambare P.S., Kaithari D.K., & Al Hosni S.A.R. (2021). Performance enhancement of a single slope solar still with single basin using Fresnel lens. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 2021, no. 15 (1), pp. 7781–7791 <https://doi.org/10.15282/jmes.15.1.2021.14.0614>.
14. H. Zhai, Y.J. Dai, J.Y. Wu, R.Z. Wang, L.Y. Zhang (2010). Experimental investigation and analysis on a concentrating solar collector using linear Fresnel lens, *Energy Conversion and Management*. 51(1): 48-55, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.08.018>.
15. Исследование функционирования фотоэлектрической установки в условиях облачной погоды на территории Севера / Н. П. Местников, П. Ф. Васильев, Г.И. Давыдов [и др.]. – Текст : непосредственный // iPolytech Journal. – 2022. – Т. 26. – № 1. – С. 81–91. – EDN EJJZDJ.
16. Yu Y., Cao J., Zhu J. An LSTM Short-Term Solar Irradiance Forecasting Under Complicated Weather Conditions. *IEEE Access*, 2019, no. 7, pp. 145651–1456669. [CrossRef].
17. Rajagukguk, R.A.; Ramadhan, R.A.; Lee, H.-J. A Review on Deep Learning Models for Forecasting Time Series Data of Solar Irradiance and Photovoltaic Power. *Energies* 2020, 13, 6623. [CrossRef].
18. Бекиров, Э. А. Анализ систем водяного охлаждения фотоэлектрических панелей / Э. А. Бекиров, М. М. Асанов. – Текст : непосредственный // Строительство и техногенная безопасность. – 2017. – № 6 (58). – С. 55–58. – EDN ZGVGDN.
19. Финиченко, А. Ю. Комбинированный метод применения солнечного коллектора и теплового насоса в условиях низких температур / А. Ю. Финиченко, А. П. Полозкова. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 1 (49). – С. 103–110. – EDN NNCCWL.
20. Повышение эффективности использования фотоэлектрических панелей в сельском хозяйстве / А. Ф. Эрк, В. Н. Судаченко, В. А. Размук, Е. В. Тимофеев. – Текст :

непосредственный // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2018. – № 1 (94). – С 71–77.

References

1. Mestnikov N.P., Vasiliev P.F., Alkhadzh F.Kh. Development of hybrid power supply systems for power supply of remote consumers in the conditions of the North and the Arctic. *Mezhdunarodnyj tekhniko-ekonomicheskij zhurnal – International technical and economic journal*, 2021, no. 1, pp. 47-56 (In Russian).
2. Korolyuk Yu.F., Mestnikov N.P. [Decentralized power supply system for small settlements of Yakutia using hybrid stations with solar panels and supercapacitors]. *Problemy i perspektivy osvoeniya Arkticheskoy zony Severo-Vostoka Rossii: materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Problems and prospects for the development of the Arctic zone of the North-East of Russia: materials of the international. scientific-practical. conf.]. Anadyr, 2018, pp. 138-139 (In Russian).
3. Zakharov V., Prokhorov D., Pavlov N. Russian Arctic region energy balance (Republic of Sakha (Yakutia)). *E3S Web of Conferences*, vol. 114. Irkutsk, EDP Sciences, 2019, pp. 02005, DOI 10.1051/e3sconf/201911402005, EDN VZDBAI.
4. Mestnikov N.P. *Osobennosti ekspluatsii solnechnyh elektrostancij mikromoshchnosti v usloviyah Severa* [Peculiarities of operation of solar power stations of micropower in the conditions of the North]. Yakutsk, Offset Publ., 2021, 113 p. (In Russian).
5. Mestnikov N.P. *Osobennosti ekspluatsii solnechnyh elektrostancij mikromoshchnosti v usloviyah Severa* [Peculiarities of operation of solar power stations of micropower in the conditions of the North]. Yakutsk, North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov Publ., 2022, 155 p. (In Russian).
6. Lobashev A.A., Mestnikov N.P., Vasilyev P.F., Alzakkar A.M-N. Investigation of the influence of surface pollution on the functioning of a photovoltaic panel in the conditions of the North. *Groznenskiy estestvennonauchnyy byulleten' – Grozny Bulletin of Natural Sciences*, 2022, no. 1 (27), pp. 90-97 (In Russian).
7. Kurkina, I. I., Mestnikov N.P., Vasilyev P.F. Development of a method for protecting the solar panel surface from snow cover in the conditions of the North. *Mezhdunarodnyj tekhniko-ekonomicheskij zhurnal – International technical and economic journal*. 2022, no. 1, pp. 46-55 (In Russian).
8. Kuznetsov P.N., Yuferev L.Yu. Improving the efficiency of photoelectric converters with serial connection. *Vestnik VIESKh – VIESH Bulletin*, 2017, no. 1 (26), pp. 90-97 (In Russian).
9. Alferov Zh. I., Andreev V.M., Zazimko V.N. and others. *Patent RU 2286517 C1*, 27.10.2006.
10. Rakhmatulin I.R., Kirpichnikova I.M. Prospects for the use of various designs of solar concentrators on the territory of the Russian Federation. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Irkutsk State Technical University*, 2017, no. 2 (121), pp. 127-136 (In Russian).
11. Strebkov D.S., Irodionov A.E., Bobovnikov N.Yu. Solar power plants with concentrators for large-scale solar energy. *Mezhdunarodnyj nauchnyy zhurnal «Alternativnaya energetika i ekologiya» – International scientific journal «Alternative energy and ecology»*, 2016, no. 5 (20), pp. 96-108 (In Russian).
12. Bettonte M., Fendrich M.A., Quaranta A., Orlandi M., Miotello A. (2019). Solar Concentration for Wastewaters Remediation: A Review of Materials and Technologies. *Applied Science* 9, 2019, vol. 118, no. 9, pp. 1-26, <https://doi.org/10.3390/app9010118>.
13. Bhambare P.S., Kaithari D.K., & Al Hosni S.A.R. (2021). Performance enhancement of a single slope solar still with single basin using Fresnel lens. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 2021, no. 15 (1), pp. 7781–7791.
14. Zhai H., Dai Y.J., Wu J.Y., Wang R.Z., Zhang L.Y. (2010). Experimental investigation and analysis on a concentrating solar collector using linear Fresnel lens, *Energy Conversion and Management*, 2010, no. 51 (1), pp. 48-55, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.08.018>.

15. Mestnikov N.P., Vasilyev P.F., Davydov G.I. Investigation of the functioning of a photovoltaic installation under cloudy weather in the North. *iPolytech Journal*, 2022, vol. 26, no. 1, pp. 81-91, EDN EJJLZDJ (In Russian).
16. Yu Y., Cao J., Zhu J. An LSTM Short-Term Solar Irradiance Forecasting Under Complicated Weather Conditions. *IEEE Access*, 2019, no. 7, pp. 145651–1456669. [CrossRef].
17. Rajagukguk R.A., Ramadhan R.A., Lee H.-J. A Review on Deep Learning Models for Forecasting Time Series Data of Solar Irradiance and Photovoltaic Power. *Energies*, 2020, no. 13, pp. 6623. [CrossRef].
18. Bekirov E.A., Asanov M.M. Analysis of water cooling systems for photovoltaic panels. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost' – Construction and technogenic safety*, 2017, no. 6 (58), pp. 55-58 (In Russian).
19. Finichenko A.Yu., Polozkova A.P. Combined method of using a solar collector and a heat pump at low temperatures. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2022, no. 1 (49), pp. 103-110, EDN NNCCWL (In Russian).
20. Erk A.F., Sudachenko V.N., Razmuk V.A., Timofeev E.V. Improving the efficiency of using photovoltaic panels in agriculture. *Innovacii i prodovol'stvennaya bezopasnost' – Innovations and Food Safety*, 2018, no. 1 (94), pp. 71-77 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Местников Николай Петрович

Северо-Восточный федеральный университет
им. М. К. Аммосова (СВФУ).

Белинского ул., д. 42, г. Якутск, 677007,
Российская Федерация.

Институт физико-технических проблем Севера
им. В. П. Ларионова СО РАН (ИФТПС СО РАН).

Октябрьская ул., д. 1, г. Якутск, 677000,
Российская Федерация.

Аспирант, ассистент кафедры «Электроснаб-
жение», СВФУ.

Ведущий инженер отдела электроэнергетики 70,
ИФТПС СО РАН.

Тел.: +7 (984) 105-23-58.

E-mail: sakhacase@bk.ru

Васильев Павел Филиппович

Северо-Восточный федеральный университет
им. М.К. Аммосова (СВФУ).

Белинского ул., д. 42, г. Якутск, 677007,
Российская Федерация.

Институт физико-технических проблем Севера
им. В. П. Ларионова СО РАН (ИФТПС СО РАН).

Октябрьская ул., д. 1, г. Якутск, 677000,
Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент, заведую-
щий отделом электроэнергетики 70 ИФТПС СО РАН,
и. о. заведующего кафедрой «Электроснабжение»,
СВФУ.

Тел.: +7 (914) 272-97-40.

E-mail: kb-8@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mestnikov Nikolay Petrovich

North-Eastern Federal University named after M.K.
Ammosov (NEFU).

42, Belinsky st., Yakutsk, 677007, the Russian
Federation.

Institute of Physical and Technical Problems of the
North named after V.P. Larionov SB RAS (IFTPS SB
RAS).

1, Oktyabrsky st., Yakutsk, 677000, the Russian
Federation.

Postgraduate student, assistant of the department of
Power Supply, NEFU.

Leading Engineer of the Electric Power Industry
Department 70, ITPPS SB RAS.

Phone: +7 (984) 105-23-58.

E-mail: sakhacase@bk.ru

Vasilyev Pavel Filippovich

North-Eastern Federal University named after M.K.
Ammosov (NEFU).

42, Belinsky st., Yakutsk, 677007, the Russian
Federation.

Institute of Physical and Technical Problems of the
North named after V.P. Larionov SB RAS (IFTPS SB
RAS).

1, Oktyabrsky st., Yakutsk, 677000, the Russian
Federation.

Ph. D., associate professor, head of the department
of Power Engineering 70 ITPPS SB RAS, acting Head of
the Department «Power supply», NEFU.

Phone: +7 (914) 272-97-40.

E-mail: kb-8@mail.ru

Манусов Вадим Зиновьевич

Новосибирский государственный технический университет (НГТУ).

Карла Маркса пр., д. 20, г. Новосибирск, 630073, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Системы электроснабжения предприятий», НГТУ.

Тел.: +7 (913) 931-76-67.

E-mail: manusov@corp.nstu.ru

Manusov Vadim Zinovievich

Novosibirsk State Technical University (NSTU).

20, Karl Marx, av., Novosibirsk, 630073, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor, professor of the department of Power Supply Systems for Enterprises, NSTU.

Phone: +7 (913) 931-76-67.

E-mail: manusov@corp.nstu.ru

Корякин Александр Кимович

Арктический государственный агротехнологический университет (АГАТУ).

Сергеляхское шоссе, 3-й км, д. 3, г. Якутск, 677007, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент, доцент Инженерного факультета.

Тел.: +7 (914) 270-29-02.

E-mail: pita66@mail.ru

Koryakin Alexander Kimovich

Arctic State Agrotechnological University (AGATU).

3, Sergelyakhskoye sh. 3 km, Yakutsk, 677007, the Russian Federation.

Ph. D., docent, associate professor of the Faculty of Engineering.

Phone: +7 (914) 270-29-02.

E-mail: pita66@mail.ru

Альзаккар Ахмад Мухаммед-Насер

Университет Аль-Баас.

г. Хомс, Сирийская Арабская Республика.

Преподаватель Университета Аль-Баас.

Тел.: +7 (996) 121-42-96.

E-mail: ahmadalzakkar86@gmail.com

Alzakkar Ahmad Mohammed Nasser

Al Baath University.

Homs, Syrian Arab Republic.

Lecturer at Al-Baath University.

Phone: +7 (996) 121-42-96.

E-mail: ahmadalzakkar86@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Исследование эффекта внедрения системы концентрации солнечного излучения для фотоэлектрических электростанций в условиях Северо-Востока России / Н. П. Местников, П. Ф. Васильев, В. З. Манусов [и др.]. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 2 (54). – С. 106 – 120.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Mestnikov N.P., Vasilyev P.F., Manusov V.Z., Koryakin A.K., Alzakkar A.M.N. Investigation of the effect of introducing a solar radiation concentration system for solar power plants in the conditions of the North-East of Russia. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 2 (54), pp. 106-120 (In Russian).

УДК 621.331: 621.311

А. В. Есаулов, С. Г. Тигунцев

Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ),

г. Иркутск, Российская Федерация

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ В ТЯГОВОЙ СЕТИ СИСТЕМЫ 25 кВ

Аннотация. Цель работы – разработка и исследование методики определения места повреждения (короткого замыкания контактного провода на землю или на рельс) в контактной сети двухпутной железной дороги. Методология – для моделирования режима короткого замыкания выполняется формирование схемы замещения и математической модели контактной сети. В схеме замещения учтены собственные сопротивления проводов и рельсов, взаимоиндукции каждого провода с каждым проводом и рельсами, емкостные сопротивления между проводами, рельсами и землей. Расчет режима короткого замыкания выполняется в программе расчета в фазных координатах, разработанной на кафедре «Электрические станции, сети и системы (ЭССиС)» ИРНИТУ. Для формирования графиков изменения напряжений вдоль контактной сети между двумя подстанциями используется вычислительная программа, реализующая 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. Результаты – получены графики изменения напряжений с одного и другого конца контактной сети, которые пересекаются в точке короткого замыкания. Область применения – методика определения места повреждения может быть использована на всех

подстанциях железной дороги, электрифицированной на переменном токе 25 кВ. Для практического применения методики необходимо установить на каждой подстанции цифровые регистраторы аварийных процессов. Выводы – разработана методика определения места повреждения в контактной сети 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

Irkutsk National Research Technical University (INRTU), Irkutsk, the Russian Federation

DETERMINATION OF THE FAULT LOCATION IN 25 kV RAILWAY POWER SUPPLY SYSTEM

Abstract. The purpose of the work is to develop and study a methodology for determining the locations of damage (short circuit of the contact wire to the ground or to the rail) in the contact network of a double-track railway. Methodology – to simulate the short circuit mode, an equivalent circuit and a mathematical model of the contact network are formed. The equivalent circuit takes into account the intrinsic resistances of the wires and rails, the mutual inductance of each wire with each wire and rails, the capacitive resistances between the wires, rails and ground. The calculation of the short circuit mode is carried out in the calculation program in phase coordinates, developed at the Department of Power Plants, Networks and Systems, INRTU. To generate graphs of voltage changes along the contact network between two substations, a computer program is used that implements the method of numerical integration of telegraph equations describing the mode of the contact network. The initial data for the formation of voltage graphs are the parameters of the equivalent circuit and the magnitude of currents and voltages at the ends of the contact network at the time of the short circuit. Results – obtained graphs of voltage changes from one and the other end of the contact network, which intersect at the point of a short circuit. Scope – the methodology for determining the location of the fault can be used in all substations of the railway, electrified at 25 kV alternating current. For the practical application of the methodology, it is necessary to install digital recorders of emergency processes at each substation. Conclusions – a technique for determining the location of damage in the contact network of the railway has been developed, a study of the methodology has been carried out, and results have been obtained that demonstrate high accuracy in determining the location of damage.

Keywords: traction power supply system, determining the location of the fault, telegraph equations.

Система тягового электроснабжения переменного однофазного тока промышленной частоты 50 Гц и напряжением 25 кВ нашла широкое применение на Северо-Кавказской, Восточно-Сибирской железных дорогах и ряде других. Выбор в пользу данной системы электроснабжения был сделан по целому ряду причин, которые выгодно отличают ее от системы электроснабжения на постоянном токе напряжением 3 кВ. К преимуществам системы 25 кВ можно отнести то, что работа на более высоком напряжении позволяет увеличить расстояния между тяговыми подстанциями в два – три раза по сравнению с системой постоянного тока 3 кВ, а также уменьшить сечение контактного провода и снизить потери мощности на передачу электроэнергии [1]. Все это в совокупности оказывает положительный экономический эффект, который особо заметен при электрификации протяженных железнодорожных линий, проходящих через малонаселенные районы (яркий пример – ВСЖД).

Расстояние между тяговыми подстанциями при системе электроснабжения 25 кВ составляет в среднем 40 – 60 км, причем зачастую железная дорога располагается в зоне с непростыми климатическими условиями, что автоматически поднимает вопрос о необходимости разработки методов и средств определения места повреждения (ОМП) с высокой точностью для того, чтобы сократить время на ремонтно-восстановительные работы и нагрузку на ремонтный персонал.

Одним из методов ОМП является метод численного интегрирования телеграфных уравнений, описывающих электрический режим сети. Способ ОМП, основанный на методе численного интегрирования, подробно описывается в источнике [2]. Суть метода заключается в том, что предварительно формируется модель линии электропередачи в фазных координатах, затем по измеренным токам и напряжениям по концам линии определяется

место повреждения путем построения двух графиков пошагового изменения напряжения от концов линии к месту повреждения. Точка пересечения графиков зависимости модуля напряжения от расстояния и будет являться местом повреждения. Однако в статье [2] работа и проверка метода были рассмотрены на модели трехфазной линии напряжением 500 кВ и длиной 300 км.

В данной статье будет проверена применимость данного метода для ОМП в контактной сети системы электроснабжения переменного однофазного тока напряжением 25 кВ.

Для получения исходных данных для ОМП сформируем модель контактной сети между двумя подстанциями, содержащей трансформаторы, контактные провода, рельсы и нагрузки (мощности электровозов).

В результате расчета режима для модели в программно-вычислительном комплексе (ПВК) «Расчет в фазных координатах», разработанной на кафедре ЭССиС ИРНИТУ, получаем значения токов и напряжений по концам линии, т. е. на тяговых подстанциях, при коротком замыкании между контактным проводом и землей в любом месте между подстанциями.

Математическая модель была сформирована на основе схемы замещения двухпутного перегона (рисунок 1), разбитого на восемь участков по 7 км каждый (рисунок 2).

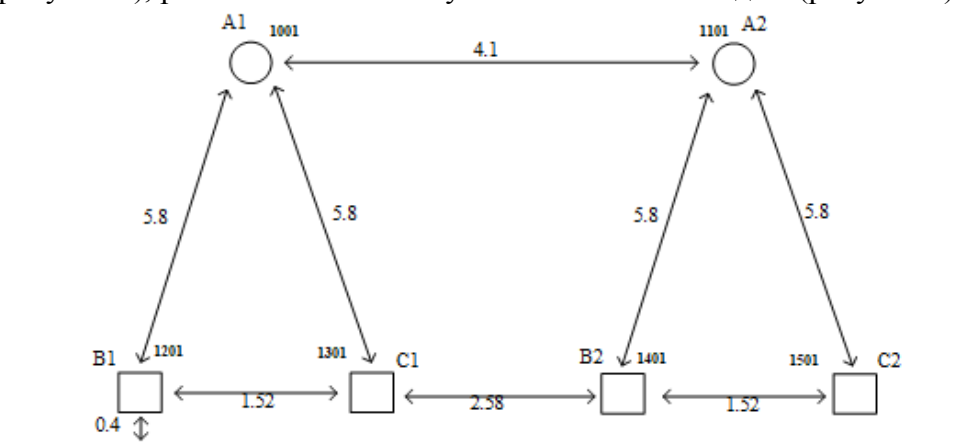


Рисунок 1 – Геометрическое расположение проводников контактной сети двухпутного перегона 25 кВ

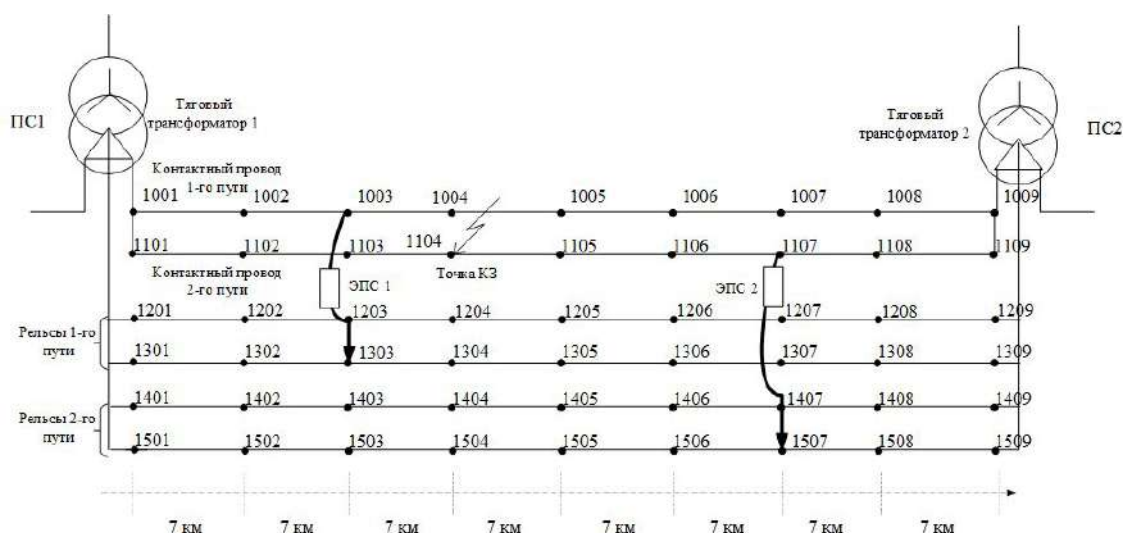


Рисунок 2 – Схема замещения двухпутного перегона 25 кВ

Для каждого участка определены все параметры, включающие в себя полные продольные сопротивления, емкостные сопротивления и сопротивления взаимоиндукции всех элементов контактной сети (контактные провода, рельсы). Нагрузка в виде электроподвижного состава (ЭПС) задана в виде сопротивлений. Точка короткого замыкания (КЗ) установлена на удалении в 21 км от тяговой подстанции 1.

Параметры схемы замещения занесены в качестве исходных данных для расчета режима в ПВК. Подробнее о формировании математических моделей в этом ПВК можно узнать из статьи [3].

Результаты расчета режима в тяговой сети в ПВК «Расчет в фазных координатах» показан в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Результаты расчета режима в тяговой сети системы 25 кВ в начале перегона

Номер узла	U, В	$\varphi_U, ^\circ$	I, А	$\varphi_I, ^\circ$
1001	27490,79	180,01	74,34	180,51
1101	27406,22	180,15	1061,82	142,87
1201	4,55	226,71	9,02	46,24
1301	33,91	175,35	67,84	355,26
1401	63,34	148,77	126,75	328,72
1501	37,15	321,63	74,25	141,67

Таблица 2 – Результаты расчета режима в тяговой сети системы 25 кВ в конце перегона

Номер узла	U, В	$\varphi_U, ^\circ$	I, А	$\varphi_I, ^\circ$
1009	27494,06	180,01	-24,80	3,96
1109	27437,2	180,09	-691,45	325,38
1209	4,95	304,20	-9,80	304,56
1309	15,73	164,48	-31,49	164,31
1409	14,64	191,80	-29,25	191,53
1509	12,27	192,95	-24,52	192,79

Далее составляем матрицу погонных продольных и поперечных сопротивлений Z контактной сети [4, 5], которая показана в таблице 3.

Таблица 3 – Матрица Z погонных продольных сопротивлений ($R + jX$), Ом/км

R	jX	R	jX	R	jX	R	jX	R	jX	R	jX
0,227	0,767	0,05	0,346	0,05	0,325	0,05	0,325	0,05	0,316	0,05	0,308
0,05	0,346	0,227	0,767	0,05	0,308	0,05	0,316	0,05	0,325	0,05	0,325
0,05	0,325	0,05	0,308	0,063	0,589	0,05	0,409	0,05	0,346	0,05	0,326
0,05	0,325	0,05	0,316	0,05	0,409	0,063	0,589	0,05	0,375	0,05	0,346
0,05	0,316	0,05	0,325	0,05	0,346	0,05	0,375	0,063	0,589	0,05	0,409
0,05	0,308	0,05	0,325	0,05	0,326	0,05	0,346	0,05	0,409	0,063	0,589

Составляем матрицу погонных поперечных емкостных проводимостей Y [4, 5], которая показана в таблице 4.

Таблица 4 – Матрица Y погонных поперечных емкостных проводимостей (b), См/км

b	b	b	b	b	b
$2,30 \cdot 10^{-6}$	$-3,00 \cdot 10^{-7}$	$-1,00 \cdot 10^{-7}$	$-1,00 \cdot 10^{-7}$	$-1,00 \cdot 10^{-7}$	0
$-3,00 \cdot 10^{-7}$	$2,30 \cdot 10^{-6}$	0	$-1,00 \cdot 10^{-7}$	$-1,00 \cdot 10^{-7}$	$-1,00 \cdot 10^{-7}$
$-1,00 \cdot 10^{-7}$	0	$2,10 \cdot 10^{-5}$	$-2,00 \cdot 10^{-7}$	0	0
$-1,00 \cdot 10^{-7}$	$-1,00 \cdot 10^{-7}$	$-2,00 \cdot 10^{-7}$	$2,10 \cdot 10^{-5}$	$-1,00 \cdot 10^{-7}$	0
$-1,00 \cdot 10^{-7}$	$-1,00 \cdot 10^{-7}$	0	$-1,00 \cdot 10^{-7}$	$2,10 \cdot 10^{-5}$	$-2,00 \cdot 10^{-7}$
0	$-1,00 \cdot 10^{-7}$	0	0	$-2,00 \cdot 10^{-7}$	$2,10 \cdot 10^{-5}$

Метод численного интегрирования для определения места повреждения [2] реализован в ПВК «ОМПКЗ», разработанном на кафедре электрических станций, сетей и систем ИРНИТУ. Интерфейс ввода исходных данных программы показан на рисунке 3.

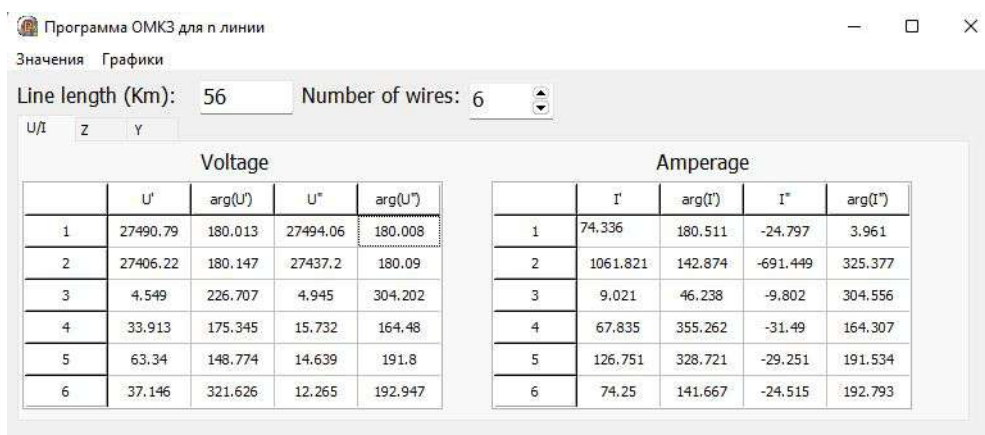


Рисунок 3 – Ввод данных о токах и напряжениях, полученных в начале и в конце перегона

Сначала вносятся данные о длине контактной сети и о количестве учитываемых элементов (два контактных провода и четыре рельса). Согласно математической модели перегона, для которой и были рассчитаны токи и напряжения по концам перегона, длина составляет 56 км, а количество учитываемых элементов – шесть. Затем на первой вкладке ПВК вводятся данные по токам и напряжениям, полученные по результатам расчета режима с коротким замыканием в т. 1104 (см. рисунок 3).

Во второй вкладке производится ввод данных, составляющих матрицу погонных продольных и поперечных сопротивлений тяговой сети (рисунок 4) и матрицу погонных поперечных емкостных проводимостей (рисунок 5).

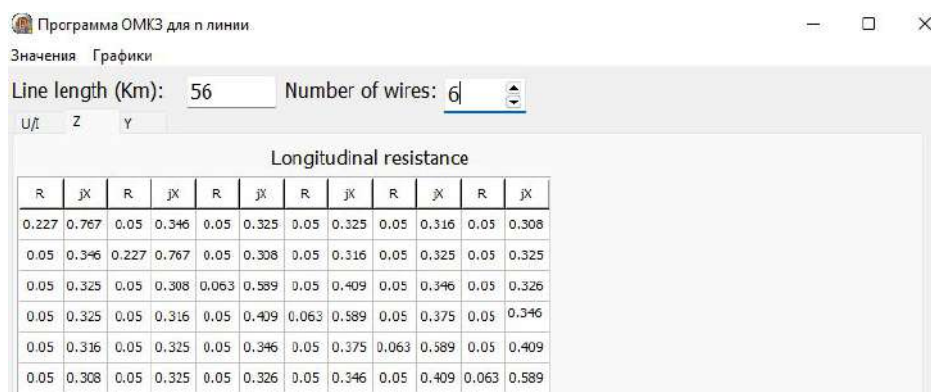


Рисунок 4 – Ввод матрицы погонных продольных и поперечных сопротивлений

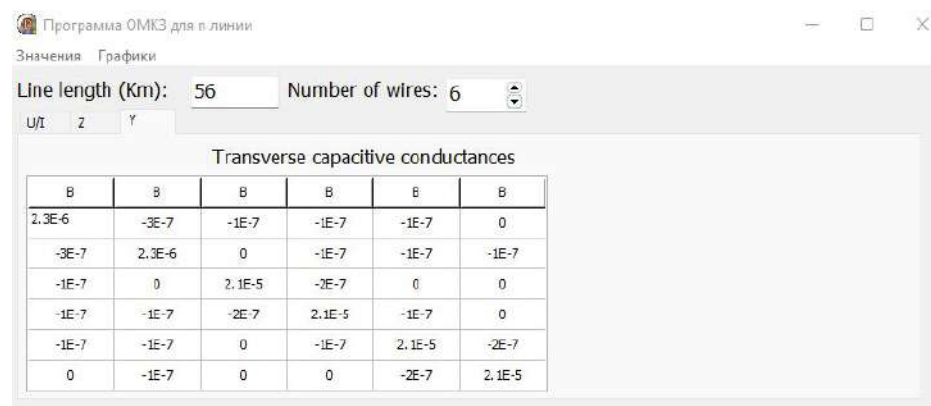


Рисунок 5 – Ввод матрицы погонных поперечных емкостных проводимостей

Результат расчета представляет собой график, осью абсцисс которого является длина перегона, а осью ординат напряжение в исследуемом контактном проводе. Как было сказано выше, суть нахождения точки повреждения методом численного интегрирования заключается

в определении точки пересечения графиков пошагового изменения напряжения от концов рассматриваемой линии до противоположных концов [2]. На рисунке 6 график № 1 представляет собой изменение напряжения с левого конца перегона, т. е. от ПС1 до ПС2, а график № 2 изменение напряжения с правого конца перегона, т. е. от ПС2 до ПС1 соответственно.



Рисунок 6 – Результат расчета в ПВК «ОМПКЗ»

При детальном приближении точки пересечения графиков (рисунок 7) видно, что проекция точки на ось абсцисс соответствует расстоянию в 21,7 км, следовательно, и место КЗ находится на расстоянии 21,7 км от ПС1.



Рисунок 7 – Определенные методом численного интегрирования места КЗ

Как было сказано выше, при моделировании контактной сети точка КЗ была установлена на расстоянии 21 км от ПС1, погрешность ОМП составила 3,3 %, что находится в допустимых пределах. Указанная погрешность обусловлена наличием нагрузок (мощностей электровозов) в контактной сети в момент КЗ. При отсутствии нагрузок точность существенно повышается.

Для применения методики в реальных схемах электроснабжения железной дороги необходимо на каждой тяговой подстанции установить приборы фиксации параметров режима при возникновении коротких замыканий.

На основании изложенного можно сделать выводы.

1. Способ определения места повреждения, основанный на методе численного интегрирования, применим не только к трехфазным линиям электроснабжения, но и к однофазным сетям 25 кВ тягового электроснабжения.

2. Для определения места повреждения достаточно знать схему замещения контактной сети, измеренные значения фазных токов и напряжений по концам перегона, следовательно,

данный способ достаточно просто технически реализовать в существующих филиалах РЖД, эксплуатирующих тяговые сети 25 кВ.

3. Метод численного интегрирования характеризуется высокой точностью, погрешность ОМП на рассмотренной в статье модели двухпутного перегона составила 3,3 %. Точность метода зависит только от точности измеренных значений токов и напряжений по концам перегона и от точности задания параметров схемы замещения.

4. Следующим этапом исследований станет изучение возможности ОМП с помощью метода численного интегрирования в автотрансформаторной системе тягового электроснабжения 2×25 кВ.

Список литературы

1. Пышкин, А. А. Электроснабжение железных дорог : учебное пособие / А. А. Пышкин. – Екатеринбург : Уральский гос. ун-т путей сообщения, 2016. – 373 с. – Текст : непосредственный.

2. 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. – Иркутск : Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, 2015. – С. 357–360.

3. 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 междунар. участием. – Иркутск : Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2021. – С. 118–123.

4. 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.

5. Висящев, А. Н. Приборы и методы определения места повреждения на линиях электропередачи : учебное пособие / А. Н. Висящев. – Иркутск : Иркутский государственный технический университет, 2001. – Ч. 2. – 146 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Pyshkin A.A. *Elektrosnabzhenie zheleznnykh dorog : uchebnoe posobie* [Power supply of railways: textbook allowance]. Yekaterinburg: UrGUPS Publ., 2016, 373 p. (In Russian).

2. Tiguntsev S.G. Determination of places of short circuits on long power lines of high and ultrahigh voltage. *Energy of Russia in the XXI century. Innovative development and management: materials of the All-Russian conference*. Irkutsk: Institute of Energy Systems. L.A. Melentiev Publ., Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2015, pp. 357-360 (In Russian).

3. Tiguntsev S.G., Esaulov A.V., Eremeeva Yu.O. Development of a calculation model for the contact network of a 2×25 kV railway for the joint calculation of non-sinusoidal and asymmetric modes in the supply network. *Improving the efficiency of production and energy use in Siberia: Proceedings of all-Russian. sci.-tech. conf. with international participation*. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University Publ., 2021, pp. 118-123 (In Russian).

4. Visyashchev A.N., Akishin L.A., Tiguntsev S.G., Visyashchev A.A., Mussonov G.P., Plenkov E.R. Ed. Visyashchev A.N. *Diagnostika sostoiianiia vozdushnykh linii elektroperedachi 10–110 kV v normal'nykh i avariinykh rezhimakh: uchebnoe posobie* [Diagnostics of the state of overhead power lines 10-110 kV in normal and emergency modes: textbook]. Irkutsk: Publishing house of ISTU, 2012, 270 p. (In Russian).

5. Visyashchev A.N. *Pribory i metody opredeleniia mesta povrezhdeniia na liniakh elektroperedachi: uchebnoe posobie* [Devices and methods for determining the location of damage on power lines: textbook]. Irkutsk: Publishing house of ISTU, 2001, part 2, 146 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Есаулов Алексей Владимирович

Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ).

Лермонтова ул., д. 83, 664074, г. Иркутск, 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, 664074, г. Иркутск, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические станции, сети и системы», ИРНИТУ.

Тел.: +7 (914) 927-81-77.

E-mail: stiguncev@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

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.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Esaulov Alexei 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

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Esaulov A.V., Tiguntsev S.G. Determination of the fault location in 25 kV railway power supply system. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 2 (54), pp. 120-127 (In Russian).

УДК 621.313.8

А. В. Малышев

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ С АКСИАЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОТОКОМ

Аннотация. Данная статья посвящена обзору экспериментального исследования системы векторного управления электродвигателем с аксиальным магнитным потоком. В 1831 г. Майкл Фарадей изобрел первую электрическую машину, которой стал электродвигатель с аксиальным магнитным потоком. Однако из-за низкого качества магнитотвердых материалов и невозможности эффективной работы данного типа электродвигателя без системы управления до конца XX в. данный тип электродвигателей в промышленности не применялся.

В настоящее время благодаря усовершенствованию технологии производства постоянных редкоземельных магнитов и, соответственно, значительному снижению их цены, быстрому развитию микроэлектронной промышленности, а также благодаря таким преимуществам электродвигателей с аксиальным магнитным потоком, как более компактная конструкция, более высокое соотношение электромагнитного момента к массе электродвигателя, высокая удельная мощность и другое, электродвигатели с аксиальным магнитным потоком все чаще заменяют собой применявшиеся до этого электродвигатели.

В этой статье предлагается рассмотреть трехфазный 12-полюсный электродвигатель с аксиальным потоком с одним статором и одним ротором. В большинстве случаев применения электродвигатель с аксиальным магнитным потоком используется в безредукторном приводе. Отсюда возникает важное требование к точности регулирования скорости. При стандартном векторном управлении индуктивности обмоток статора электродвигателя при различных режимах работы принимают за константы, что приводит к ошибкам в точности управления электродвигателем. После выполнения компьютерного моделирования работы электродвигателя с аксиальным магнитным потоком при различной нагрузке становится очевидным, что индуктивности обмоток статора нелинейно изменяются в зависимости от нагрузки. Для достижения

точного управления скоростью предлагается векторное управление с обратной связью с использованием микроконтроллера. Микроконтроллер используется для управления двигателем и определяет положение ротора с помощью датчиков Холла. Для проведения экспериментального исследования работы предложенной системы управления изготовлен прототип электродвигателя с аксиальным магнитным потоком.

Ключевые слова: векторное управление, электродвигатель с аксиальным магнитным потоком, система управления электродвигателем, синхронный электродвигатель с постоянными магнитами (СДПМ), электропривод с регулируемой скоростью.

Andrei V. Malyshev

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

EXPERIMENTAL SURVEY AND COMPUTER SIMULATION OF THE VECTOR CONTROL SYSTEM FOR THE AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET MOTOR

Abstract. This article is devoted to an overview of the experimental study of a vector control system for the Axial Flux Permanent Magnet (AFPM) motor. In 1831, Michael Faraday invented the first electrical machine, which was the AFPM motor. However, due to the low quality of hard magnetic materials and the impossibility of efficient operation of this type of motor without a control system, this type of motor was not used in industry until the end of the 20th century.

At present, due to the improvement of the technology for the production of permanent rare earth magnets and, accordingly, a significant reduction in their price, the rapid development of the microelectronic industry, and also due to such advantages of AFPM motors as a more compact design, higher ratio of electromagnetic torque to motor mass, high specific power, etc., AFPM motors are increasingly replacing the motors used before.

This article proposes to consider a three-phase 12-pole AFPM motor with one stator and one rotor. In most applications, the AFPM motor is used in a gearless drive. This raises an important requirement for the accuracy of speed control. With standard vector control, the inductance of the stator windings of the motor in various operating modes is taken as constants, which leads to errors in the accuracy of motor control. Having performed computer simulation of the operation of the AFPM motor at various loads, it becomes obvious that the stator windings inductances change nonlinearly depending on the load. To achieve precise speed control, closed-loop vector control using a microcontroller is proposed. A microcontroller is used to control the motor by detecting the position of the rotor using Hall sensors. To conduct an experimental study of the operation of the proposed control system, a prototype of the AFPM motor was made.

Keywords: vector control, Axial Flux Permanent Magnet (AFPM) Motor, motor control systems, permanent-magnet synchronous machine (PMSM), variable speed drives.

Первым электродвигателем, изобретенным в 30-х гг. XIX в., стал электродвигатель с аксиальным магнитным потоком (АМП), при этом в нем была реализована система возбуждения с постоянными магнитами. Однако низкое качество магнитотвердых материалов, отсутствие возможности работы без системы управления [1] до недавнего времени значительно препятствовало их применению в промышленности.

С начала XXI в. благодаря усовершенствованию технологии производства редкоземельных постоянных магнитов и быстрому развитию микропроцессорной электроники синхронные двигатели на постоянных магнитах (СДПМ) находят все большее применение. Причем традиционным исполнением СДПМ являются электродвигатели с радиальным магнитным потоком. Однако в настоящее время электродвигатели с АМП начинают активно применяться для таких отраслей промышленности, как производство электромобилей [2], аэрокосмическая и морская сферы [3, 4], гидроэнергетика [5], роботостроение [6] и др. Данный факт объясняется преимуществами электродвигателей с аксиальным магнитным потоком перед электродвигателями с радиальным магнитным потоком: более компактная конструкция, более высокое соотношение электромагнитного момента и массы электродвигателя, высокая удельная мощность электродвигателя [7], для производства электродвигателя с АМП требуется меньше материала сердечника статора и ротора [8], легко регулируемый воздушный зазор между статором и ротором.

В настоящее время для управления электродвигателем с АМП наиболее распространена векторная система управления, так как данная система управления характеризуется довольно точным поддержанием заданной скорости и в отличие от системы прямого управления момента обеспечивает меньший уровень пульсаций электромагнитного момента двигателя [9].

Однако при данной системе управления такие параметры, как активные сопротивления и индуктивности обмоток статора, принимаются за константы, что соответствует лишь номинальному режиму работы электродвигателя. А если учесть тот факт, что электродвигатель с АМП, как правило, применяется в безредукторных приводах, то в процессе его работы возможны различные режимы работы, и система управления должна вносить корректировки в зависимости от изменяющихся параметров электродвигателя.

Конструкция электродвигателя с АМП. Для электродвигателей с АМП существует множество различных топологий [10].

В данной статье рассматривается топология трехфазного 12-полюсного электродвигателя с аксиальным магнитным потоком с одним статором и одним ротором, 3D-модель которого изображена на рисунке 1.

В таблице 1 перечислены характеристики электродвигателя с АМП, на примере которого выполнен анализ системы управления. Для данной конфигурации электродвигателя замкнутый путь магнитного потока начинается от постоянных магнитов, установленных на роторе, далее проходит через аксиальный воздушный зазор между статором и ротором, затем через электромагниты, установленные на статоре, и обратно к ротору.

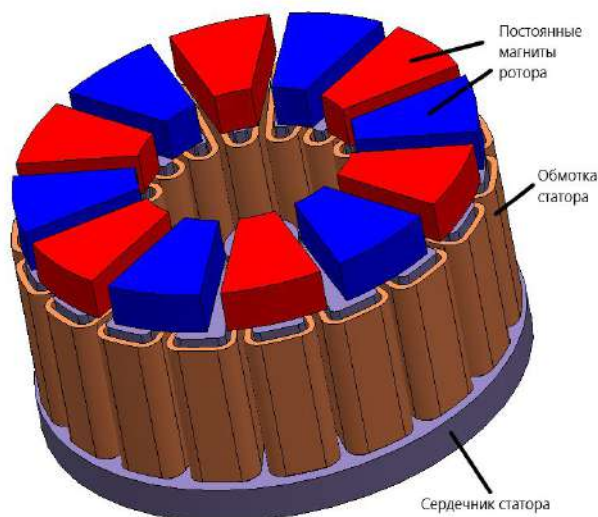


Рисунок 1 – Исследуемая 3D-модель электродвигателя с АМП

Таблица 1 – Характеристики экспериментального электродвигателя с АМП

Наименование и единица измерения параметра	Значение параметра
Номинальная мощность P , Вт	500
Номинальная скорость ω , об/мин	12 800
Максимальная скорость $\omega_{\max}$, об/мин	14 000
Номинальное напряжение U , В	29
Номинальный ток I , А	7,5
Пусковой момент электродвигателя $M_{\text{п}}$, Н·м	2,0
Число полюсов p	12
Максимальная частота питающей сети $f_{\max}$, кГц	72
Постоянное сопротивление обмоток статора R_s , Ом	0,043
Момент инерции ротора J , кг·м ²	$5,1 \cdot 10^{-5}$
Схема соединения обмоток статора	Звезда
Тип неодимовых магнитов ротора	NdFeB – N52

Конструктивное исполнение статора. Сердечник статора применяется для обеспечения обратного пути магнитного потока. Для изготовления сердечника статора применяется магнитомягкий композиционный материал *Somaloy*, кривая намагничивания которого отображена на рисунке 2. Потери в сердечнике статора при различных частотах питающей электродвигатель сети приведены в таблице 2. Количество обмоток статора – 18. Наружный диаметр сердечника статора равен 72 мм, а внутренний – 34 мм.

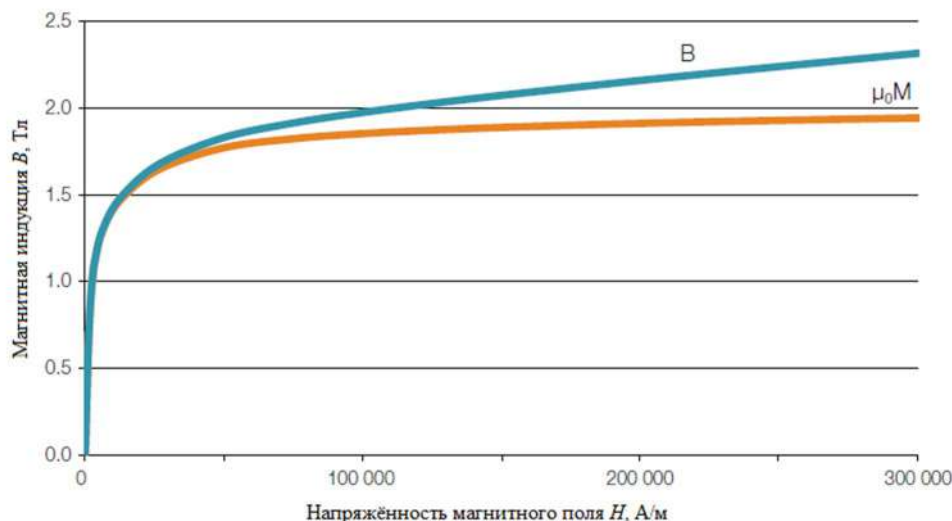


Рисунок 2 – Кривая намагничивания магнитомягкого композиционного материала *Somaloy* [11]

Таблица 2 – Потери материала *Somaloy* при различных частотах питающей электродвигатель сети [11]

Вт/кг	50 Гц	60 Гц	100 Гц	200 Гц	300 Гц	400 Гц	500 Гц	600 Гц	700 Гц	800 Гц	900 Гц	1000 Гц	2000 Гц
0,5 Тл	1,6	1,9	3,1	6	10	14	17	21	26	30	34	39	95
1,0 Тл	5,2	6,3	11	22	34	47	60	74	88	104	120	136	339
1,5 Тл	11	13	22	45	70	96	123	153	183	216	249	284	719

Конструктивное исполнение ротора.

3D-модель ротора электродвигателя с АМП изображена на рисунке 3. Ротор состоит из сердечника, выполненного из магнитомягкого композиционного материала *Somaloy*, и установленных на нем 12 постоянных магнитов *NdFeB-N52*. Аксиальный зазор между статором и ротором, а также выполнение механической жесткости, обусловленной силами магнитного притяжения между полюсами статора и постоянными магнитами ротора, достигается при помощи ступени на валу ротора. Наружный диаметр ротора, как и у статора, равен 72 мм.

Математическая модель электродвигателя с аксиальным магнитным потоком. Математическое описание электродвигателя с АМП имеет такой же вид, как и для СДПМ с радиальным магнитным потоком, тогда уравнения равновесия статора электродвигателя с АМП имеют вид [12]:

$$\begin{cases} u_d = L_d \cdot \frac{di_d}{dt} + R_s \cdot i_d - \omega \cdot L_d \cdot i_q; \\ u_q = L_q \cdot \frac{di_q}{dt} + R_s \cdot i_q + \omega \cdot L_d \cdot i_d + \omega \cdot \psi_r, \end{cases} \quad (1)$$

где u_d и u_q – напряжение статора по осям d и q соответственно, В;

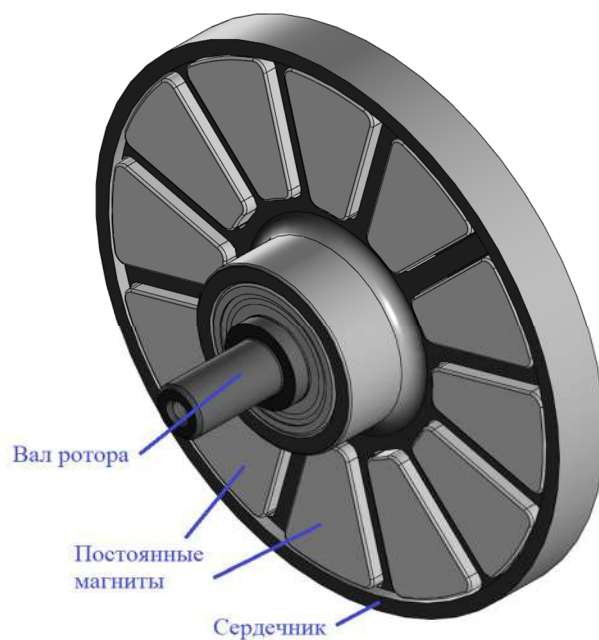


Рисунок 3 – 3D-модель ротора электродвигателя с АМП

i_d и i_q – ток статора по осям d и q соответственно, А;

R_s – активное сопротивление обмоток статора, Ом;

L_d и L_q – индуктивность обмоток статора по осям d и q соответственно, Гн;

ω – скорость вращения ротора в электрических рад/с;

ψ_r – потокосцепление ротора, Вб.

Электромагнитный момент электродвигателя с АМП определяется выражением

$$M = \frac{mp}{2} \cdot [i_q \cdot \psi_r + i_d \cdot i_q \cdot (L_d - L_q)], \quad (2)$$

где m – число фаз;

p – число пар полюсов.

Компьютерное моделирование электродвигателя с аксиальным магнитным потоком. Для исследования изменения индуктивностей статора электродвигателя с АМП от значений величины механической нагрузки выполнено компьютерное моделирование методом конечных элементов в программной среде *Simcenter Magnet*, в котором реализовано задание зависимости углового положения ротора электродвигателя с АМП от тока соответствующей обмотки статора, создающего потокосцепление статора. Конечно-элементная сетка исследуемой модели отображена на рисунке 4, а. Объемная картина распределения магнитной индукции в электродвигателе с АМП при номинальном режиме работы показана на рисунке 4, б.

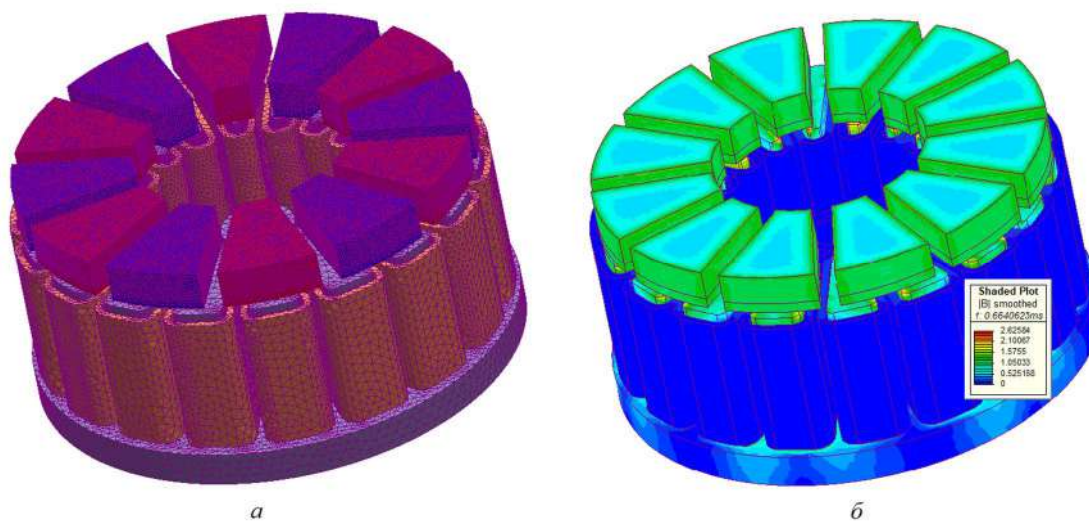


Рисунок 4 – Исследуемая 3D-модель электродвигателя в программной среде *Simcenter Magnet*: конечно-элементная сетка электродвигателя с АМП (а) и распределение магнитной индукции в электродвигателе (б)

На основе результатов анализа различных режимов работы электродвигателя с АМП можно сделать вывод о том, что для данной конфигурации электродвигателя с АМП при различной механической нагрузке индуктивности обмоток статора L_d и L_q по осям d и q соответственно не являются константами, а изменяются нелинейно в зависимости от механической нагрузки электродвигателя. Данный факт объясняется тем, что при уменьшении номинальной нагрузки электродвигателя с АМП увеличивается неравномерность распределения магнитного потока статора, что приводит к различному магнитному насыщению магнитопровода статора по осям d и q , которое и обуславливает изменения индуктивностей обмоток статора. График изменения индуктивностей в зависимости от нагрузки на электродвигатель показан на рисунке 5.

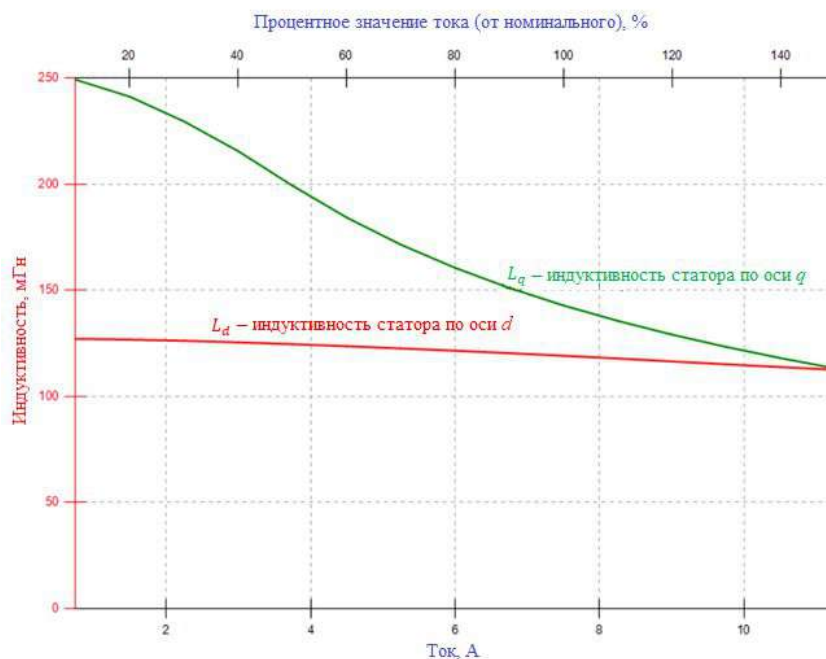


Рисунок 6 – График зависимости индуктивностей статора L_d и L_q по осям d и q соответственно при различной нагрузке электродвигателя с АМП

Экспериментальное исследование системы векторного управления с АМП. Для выполнения экспериментальных исследований изготовлен электродвигатель с АМП, изображенный на рисунке 6. Для выполнения анализа работы систем векторного управления электродвигателем с АМП применяется один и тот же рабочий цикл изменения скорости электродвигателя при разных режимах работы: при режиме холостого хода (рисунок 7); при механической нагрузке, меняющейся согласно рабочему циклу изменения скорости, и классической системе векторного управления электродвигателем, где индуктивности обмоток статора приняты за константы (рисунок 8); при механической нагрузке, меняющейся согласно рабочему циклу изменения скорости, и системе векторного управления электродвигателем, которая учитывает нелинейное изменение индуктивностей статора (рисунок 9).



Рисунок 7 – Экспериментальный образец электродвигателя с АМП: статор (а); статор и установленный на него сверху ротор (б)

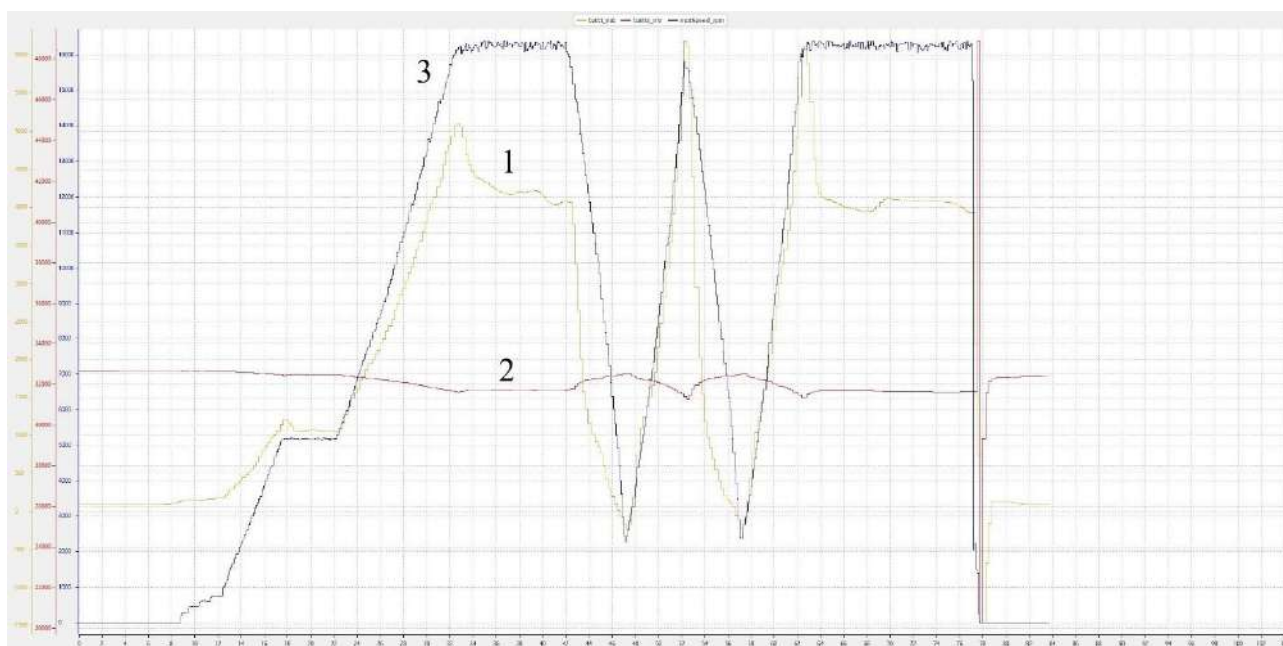


Рисунок 8 – График изменения скорости, напряжения и тока электродвигателя с АМП, управляемого классической векторной системой, при режиме холостого хода:
1 – сила тока статора, мА; 2 – напряжение статора, мВ; 3 – скорость вращения электродвигателя, об/мин

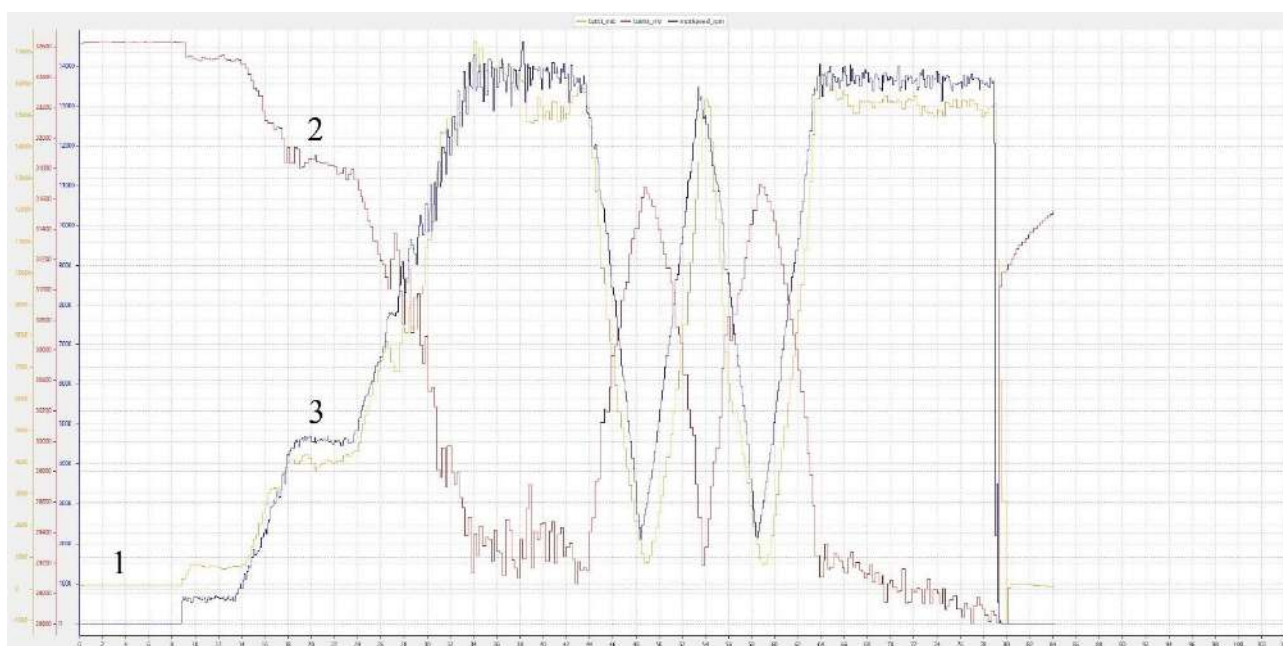


Рисунок 9 – График изменения скорости, напряжения и тока электродвигателя с АМП, управляемого классической векторной системой, при меняющейся механической нагрузке:
1 – сила тока статора, мА; 2 – напряжение статора, мВ; 3 – скорость вращения электродвигателя, об/мин

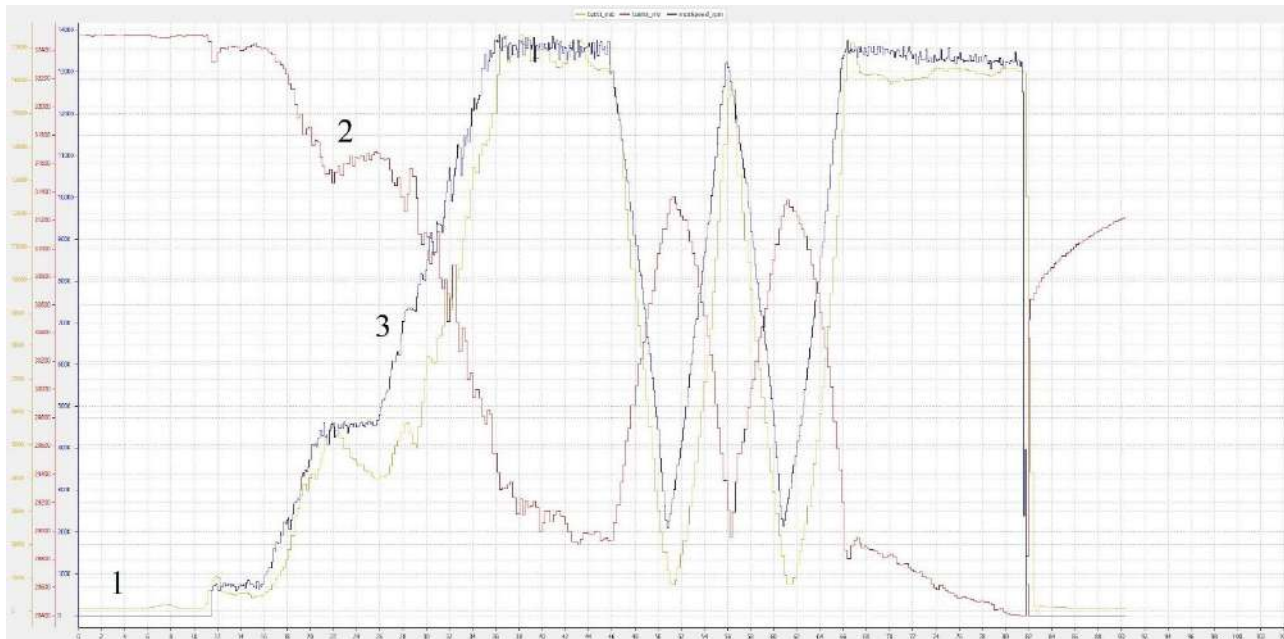


Рисунок 10 – График изменения скорости, напряжения и тока электродвигателя с АМП, управляемого векторной системой, учитывающей нелинейное изменение индуктивностей статора, при меняющейся механической нагрузке: 1 – сила тока статора, мА; 2 – напряжение статора, мВ; 3 – скорость вращения электродвигателя, об/мин

На основе полученных экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что при режиме холостого хода (см. рисунок 7) колебания скорости электродвигателя с АМП составляют не более 2,5 % от заданной, что говорит о удовлетворительной работе классической системы векторного управления. Однако при изменяющейся механической нагрузке, совпадающей со скоростью вращения (см. рисунок 8), колебания скорости составляют уже более 10 % от заданной, что не удовлетворяет критериям точности поддержания скорости вращения электродвигателя.

При работе векторной системы управления электродвигателем с АМП, учитывающей нелинейный характер изменения индуктивностей статора по осям d и q , и механической нагрузке, как в предыдущем опыте (см. рисунок 8), колебания скорости электродвигателя с АМП составляют не более 4 % от заданной (см. рисунок 9), что показывает более низкий уровень пульсаций скорости по сравнению с классической векторной системой управления.

В данной статье описаны экспериментальное исследование работы векторной системы управления электродвигателем с аксиальным магнитным потоком, конструктивное исполнение и математическая модель электродвигателя с АМП, приведены результаты компьютерного моделирования.

На основе анализа результатов компьютерного моделирования можно сделать вывод о том, что при изменении механической нагрузки, индуктивности обмоток статора L_d и L_q по осям d и q соответственно не являются константами, а имеют нелинейный характер зависимости от механической нагрузки.

Результаты анализа экспериментального исследования работы систем векторного управления показывают, что система управления, которая учитывает нелинейный характер изменения индуктивностей статора, имеет значительно меньший уровень пульсаций скорости вращения электродвигателя с АМП по сравнению с классической векторной системой управления.

Список литературы

1. Анучин, А. С. Системы управления электроприводов / А. С. Анучин. – Москва : МЭИ, 2015. – 373 с. – Текст : непосредственный.

2. Havel A., Sobek M., Stepanec L., Strossa J. Optimization of Permanent Magnet Parameters in Axial Flux Rotary Converter for HEV Drive. *Energies Publ.*, 2022, 724 p.
3. Kumar S., Lipo T.A., Kwon B.I. A 32,000 r/min Axial Flux Permanent Magnet Machine for Energy Storage with Mechanical Stress Analysis. *IEEE Trans. Magn Publ.*, 2016, 52 p.
4. Ouldhamrane H., Charpentier J.-F., Khoucha F., Zaoui A., Achour Y., Benbouzid M. Optimal Design of Axial Flux Permanent Magnet Motors for Ship RIM-Driven Thruster. *Machines Publ.*, 2022, 932 p.
5. Di Dio V., Cipriani G., Manno D. Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Generators for Pico Hydropower Application: A Parametrical Study. *Energies Publ.*, 2022. Available at: <https://doi.org/10.3390/en15196893> (accessed 17.04.2023).
6. Shin D.-Y., Jung M.-J., Lee K.-B., Lee K.-D., Kim W.-H. A Study on the Improvement of Torque Density of an Axial Slot-Less Flux Permanent Magnet Synchronous Motor for Collaborative Robot. *Energies Publ.*, 2022, pp. 34-64.
7. Celik E., Gor H., Ozturk N., Kurt E. Application of artificial neural network to estimate power generation and efficiency of a new axial flux permanent magnet synchronous generator. *Int. J. Hydrog. Energy Publ.*, 2017, pp. 17692–17699.
8. Polat M., Yildiz A.R. Akinci Performance Analysis and Reduction of Torque Ripple of Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Motor Manufactured for Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Magnetism*, 2021, no. 7, pp. 1-9.
9. Жилиготовов, Р. И. Разработка системы бездатчикового векторного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : диссертация кандидата технических наук / Жилиготовов Руслан Игоревич; Санкт-Петербургский политехн. ун-т Петра Великого. – Санкт-Петербург, 2018. – 121 с. – Текст : непосредственный.
10. Gieras J.F., Wang R.-J., Kamper M.J. Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines, *Springer Science Publ.*, 2008, 362 p.
11. Somaloy® (Datasheet). Available at: https://www.hoganas.com/globalassets/downloads/-sp/library/somaloy_prototyping-material_1334hog.pdf?mode=brochure#page=4 (accessed 15.04.2023).
12. Калачев, Ю. Н. Векторное регулирование (заметки практика) / Ю. Н. Калачев. – Москва : ЭФО, 2013. – 72 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Anuchin A.S. *Sistemy upravleniya jelektroprivodov* [Electric drive control systems]. Moscow, MEI Publ., 2015, 373 p. (In Russian).
2. Havel A., Sobek M., Stepanec L., Strossa J. Optimization of Permanent Magnet Parameters in Axial Flux Rotary Converter for HEV Drive. *Energies Publ.*, 2022, 724 p.
3. Kumar S., Lipo T.A., Kwon B.I. A 32,000 r/min Axial Flux Permanent Magnet Machine for Energy Storage with Mechanical Stress Analysis. *IEEE Trans. Magn Publ.*, 2016, 52 p.
4. Ouldhamrane H., Charpentier J.-F., Khoucha F., Zaoui A., Achour Y., Benbouzid M. Optimal Design of Axial Flux Permanent Magnet Motors for Ship RIM-Driven Thruster. *Machines Publ.*, 2022, 932 p.
5. Di Dio V., Cipriani G., Manno D. Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Generators for Pico Hydropower Application: A Parametrical Study. *Energies Publ.*, 2022. Available at: <https://doi.org/10.3390/en15196893> (accessed 17.04.2023).
6. Shin D.-Y., Jung M.-J., Lee K.-B., Lee K.-D., Kim W.-H. A Study on the Improvement of Torque Density of an Axial Slot-Less Flux Permanent Magnet Synchronous Motor for Collaborative Robot. *Energies Publ.*, 2022, pp. 34-64.
7. Celik E., Gor H., Ozturk N., Kurt E. Application of artificial neural network to estimate power generation and efficiency of a new axial flux permanent magnet synchronous generator. *Int. J. Hydrog. Energy Publ.*, 2017, pp. 17692–17699.

8. Polat M., Yildiz A.R. Akinci Performance Analysis and Reduction of Torque Ripple of Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Motor Manufactured for Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2021, no. 7, pp. 1-9.

9. Zhilgotov R.I. *Razrabotka sistemy bezdatchikovogo vektornogo upravleniya sinhronnym dvigatelem s postojannymi magnitami* (Development of a Sensorless Vector Control System for a Permanent Magnet Synchronous Motor). Doctor's thesis, Saint Petersburg, SPbPU, 2018, 121 p. (In Russian).

10. Gieras J.F., Wang R-J, Kamper M.J. Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines, *Springer Science Publ.*, 2008, 362 p.

11. Somaloy® (Datasheet). Available at: https://www.hoganas.com/globalassets/downloads/-sp/library/somaloy_prototyping-material_1334hog.pdf?mode=brochure#page=4 (accessed 15.04.2023).

12. Kalachev Ju.N. *Vektornoe regulirovanie (zametki praktika)* [Vector regulation: practice notes]. Moscow, JeFO Publ., 2013, 72 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Малышев Андрей Владимирович

Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ).

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

Аспирант кафедры «Электротехника, электропривод и промышленная электроника», СибГИУ.

Тел.: +7 (923) 626-33-05.

E-mail: malyshev1994@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Malyshev Andrei Vladimirovich

Siberian State Industrial University (SibSIU).

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

Postgraduate student of the department «Electrical engineering, electric drive and industrial electronics», SibSIU.

Phone: +7 (923) 626-33-05.

E-mail: malyshev1994@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Малышев, А. В. Экспериментальное исследование и компьютерное моделирование системы векторного управления электродвигателем с аксиальным магнитным потоком / А. В. Малышев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 2 (54). – С. 127 – 136.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Malyshev A.V. Experimental survey and computer simulation of the vector control system for the axial flux permanent magnet motor. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 2 (54), pp. 127-136 (In Russian).

УДК 621.3.025

Н. В. Савина, А. А. Казакул

Амурский государственный университет (АмГУ), г. Благовещенск, Российская Федерация

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПУТЕМ ВЫДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КЛАСТЕРОВ И АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СХЕМО-РЕЖИМНОЙ СИТУАЦИЕЙ

Аннотация. Рассмотрена проблема надежности функционирования распределительных сетей, нормально работающих в разомкнутом режиме. Предметом исследования является чувствительность распределительных электрических сетей к вводу управляющих воздействий, направленных на обеспечение требуемого уровня надежности. Целью исследования является разработка и реализация методики и алгоритма поиска и принятия решений по повышению режимной надежности путем адаптивного управления электрическими сетями. Методика поиска и принятия решений по повышению надежности электрической сети базируется на сравнении альтернатив в выделенном энергетическом кластере по реакции на вводимые управляющие воздействия. В ходе исследования на основе анализа перспективных инновационных технологий выбраны те, реализация которых позволит повысить надежность работы распределительных сетей. Предложен алгоритм поиска и принятия решений по повышению режимной надежности электрической сети с

использованием коэффициентов чувствительности по напряжению в выделенных энергетических кластерах. Описаны основные этапы предлагаемого алгоритма и обоснование их применения. Доказано, что решение проблемы недостаточной надежности функционирования распределительных сетей, традиционно работающих в разомкнутом режиме, может быть найдено выделением энергетических кластеров, выбором оптимальных мест замыкания электрических сетей, типов управляющих воздействий, с помощью которых энергетический кластер переводится в активно-адаптивную сеть. Предложено узлы для ввода управляющих воздействий и определения доз таких воздействий определять с помощью коэффициентов чувствительности по напряжению. Эффективность предлагаемого подхода доказана результатами расчетов серий установившихся режимов в программе RastrWin при вводе различных типов и доз управляющих воздействий. Областью применения методики являются распределительные электрические сети. Практическая реализация и эффективность предлагаемого подхода продемонстрированы на реальных электрических сетях Приморского края, в которых при эксплуатации неоднократно фиксировались отключения потребителей из-за недостаточной надежности электроснабжения. Полученные результаты и подходы позволяют обеспечивать повышение надежности электроснабжения в выделенных энергетических кластерах, имеющих проблемы с режимной надежностью.

Ключевые слова: надежность, адаптивное управление, чувствительность, энергетический кластер, распределительные сети.

Natalia V. Savina, Alexey A. Kazakul

Amur State University (AmSU), Blagoveshchensk, the Russian Federation

IMPROVING THE RELIABILITY OF THE FUNCTIONING OF DISTRIBUTION ELECTRIC NETWORKS BY ALLOCATING ENERGY CLUSTERS AND ADAPTIVE CONTROL OF THE CIRCUIT-MODE SITUATION

Abstract. The problem of reliability of functioning of distribution networks, normally operating in open mode, is considered. The subject of the study is the sensitivity of electrical distribution networks to the input of control actions aimed at ensuring the required level of reliability. The aim of the study is to develop and implement a methodology and algorithm for searching and making decisions to improve operational reliability through adaptive control of electrical networks. The methodology for searching and making decisions to improve the reliability of the electrical network is based on a comparison of alternatives in a dedicated energy cluster in response to input control actions. In the course of the study, based on the analysis of promising innovative technologies, those were selected, the implementation of which will improve the reliability of the distribution networks. An algorithm for searching and making decisions to improve the regime reliability of an electrical network using voltage sensitivity coefficients in selected energy clusters is proposed. The main stages of the proposed algorithm and the rationale for their application are described. It is proved that the solution to the problem of insufficient reliability of the functioning of distribution networks, traditionally operating in an open mode, can be found by identifying energy clusters, choosing the optimal places for closing electrical networks, types of control actions, with the help of which the energy cluster is transferred to an active-adaptive network. It is proposed to determine the nodes for inputting control actions and determining the doses of such actions using voltage sensitivity coefficients. The effectiveness of the proposed approach has been proven by the results of calculations of series of steady-state modes in the RastrWin program with the introduction of various types and doses of control actions. The scope of the methodology is distribution electrical networks. The practical implementation and effectiveness of the proposed approach has been demonstrated on real electrical networks of the Primorsky Territory, in which, during operation, disconnections of consumers were repeatedly recorded due to insufficient reliability of power supply. The obtained results and approaches make it possible to improve the reliability of power supply in dedicated energy clusters that have problems with regime reliability.

Keywords: reliability, adaptive control, sensitivity, energy cluster, distribution networks.

Современные распределительные электрические сети напряжением 35 кВ и ниже имеют недостаточный уровень надежности электроснабжения потребителей в связи с низкой наблюдаемостью, управляемостью и особенностями режима работы, даже если такие сети имеют несколько источников питания. Чаще всего они работают в разомкнутом режиме, т. е. с односторонним питанием. Такой режим работы и является общепринятым в эксплуатации. Возникновение аварийных ситуаций в этих сетях требует ручного перевода питания в лучшем случае с использованием телеуправления коммутационными устройствами, в худшем – с выездом персонала для поиска повреждения и проведения оперативных переключений. Данные проблемы характерны для большинства распределительных сетей РФ [1]. При этом

предпосылки оценки эффективности решений по изменению режимов работы в распределительных сетях проявляются только при явном нарушении требований нормативно-правовых актов (НПА) в части пропускной способности, показателей качества электрической энергии [3] и категории надежности потребителей [8]. В таких условиях поиск технического решения для рассматриваемой проблемы может быть традиционным, т. е. без изменения принятых режимов работы сети или осуществляться с применением технологий активно-адаптивных сетей.

С учетом тенденции по повышению наблюдаемости и управляемости сетей средних классов номинального напряжения и для придания им новых свойств в работах [5, 11] предлагается применение замкнутого режима работы с применением активных элементов. В источнике [12] предлагается алгоритм управления конфигурацией распределительных сетей 6 – 35 кВ, основанный на методе анализа иерархии Саати, позволяющий принимать многокритериальные решения для выбора оптимальных мест размыкания сети. В ряде случаев такие изменения могут эффективно решать проблемы с повышением качества и надежности электроснабжения потребителей, но изменение точек нормального размыкания не позволяет полностью использовать ресурс пропускной способности всей сети одновременно. Для работы в замкнутом режиме и возможности управления им требуется инструментарий активного управления режимами, например, применение «направленных» устройств релейной защиты и автоматики (РЗА), обеспечение наблюдаемости и управляемости подстанций (ПС), работающих в таких режимах, а также новые алгоритмы управления послеаварийными режимами.

В работе [14] показано, что к активным устройствам можно отнести такие электротехнические устройства, изменение регулировочных характеристик или дискретного состояния которых позволяет изменять/корректировать режим работы электрической сети их собственника. Ими могут быть коммутационные аппараты, средства компенсации реактивной мощности, элементы распределенной генерации. Эти устройства позволяют как изменять конфигурацию схемы электрической сети, так и управлять параметрами режимов.

Как показал проведенный анализ, системный подход к рассматриваемой проблеме не применялся, рассматривались ее отдельные аспекты. В то же время сочетание устройств, обеспечивающих автоматическое воздействие на сеть, и алгоритма адаптивного управления ими в замкнутом режиме, не типичном для распределительной сети, позволит обеспечить максимальную эффективность управления и использования имеющихся запасов пропускной способности сети. Однако необходим инструментарий для выделения части сети, в которой автоматические управляющие воздействия дадут ожидаемый эффект, а также выбор узлов для таких воздействий. Это обусловлено тем, что электрическая сеть неоднородна, содержит как сенсорные, так и сильные узлы [2]. Решению указанной проблемы и посвящена данная работа.

Для приведения надежности функционирования распределительной сети к требуемым уровням целесообразно рассматривать различные альтернативные решения с применением технологий активного управления на основе анализа чувствительности узлов нагрузки к управлению параметрами режимов. Это поиск мест замыкания сети с автоматическим переводом ее в замкнутый или сложнозамкнутый режим в ремонтных и послеаварийных схемно-режимных ситуациях, включение распределенной генерации в сеть, применение проводов нового поколения при реконструкции сети для повышения пропускной способности.

В качестве эффективной технологии для активно-адаптивного управления установившимися режимами целесообразно использовать компенсацию реактивной мощности, но традиционные подходы по выбору мест установки и мощности компенсирующих устройств не дадут желаемого результата. Для поиска и обоснования мест установки средств компенсации реактивной мощности, рассматривая их как активные элементы сети, и оценки дозы необходимых воздействий требуется проведение расчетов установившихся режимов в темпе процесса управления, что может быть обеспечено при наличии соответствующих производственно-технических комплексов в центрах управления

сетями. При этом поиск наиболее эффективных узлов воздействия необходимо определить заранее.

Поставленная задача по повышению надежности сети решается путем разработки алгоритма поиска альтернативных решений по усилению распределительной сети на основе выделения энергетических кластеров и выбора оптимальной совокупности альтернатив по вводу управляющих воздействий, применения методики поиска узлов для ввода управляющих воздействий на основе коэффициентов чувствительности по напряжению.

Алгоритм поиска и принятия решений по усилению электрической сети на основе выделения энергетических кластеров. Принятые в работе [7] направления развития распределительных сетей предполагают совместную работу с источниками распределенной генерации. Подключение к распределительной сети распределенной генерации наиболее эффективно, если она работает в замкнутом режиме [5, 10, 11]. При проектировании новых участков электрических сетей рекомендуется применение сложнозамкнутых сетей гексального типа [11]. Для действующих сетей с двумя, тремя и более источниками питания возможность работы в замкнутом режиме с организацией транзита мощности будет определяться наличием коммутационных аппаратов, устройств РЗА, в автоматическом режиме обеспечивающих селективное отключение поврежденных элементов и ввод резерва, а также систем, ограничивающих перетоки мощности при аварийных ситуациях в сетях более высоких классов номинального напряжения.

Предлагаемый алгоритм поиска и принятия из альтернативных решения по усилению электрической сети приведен на рисунке 1 в виде блок-схемы.

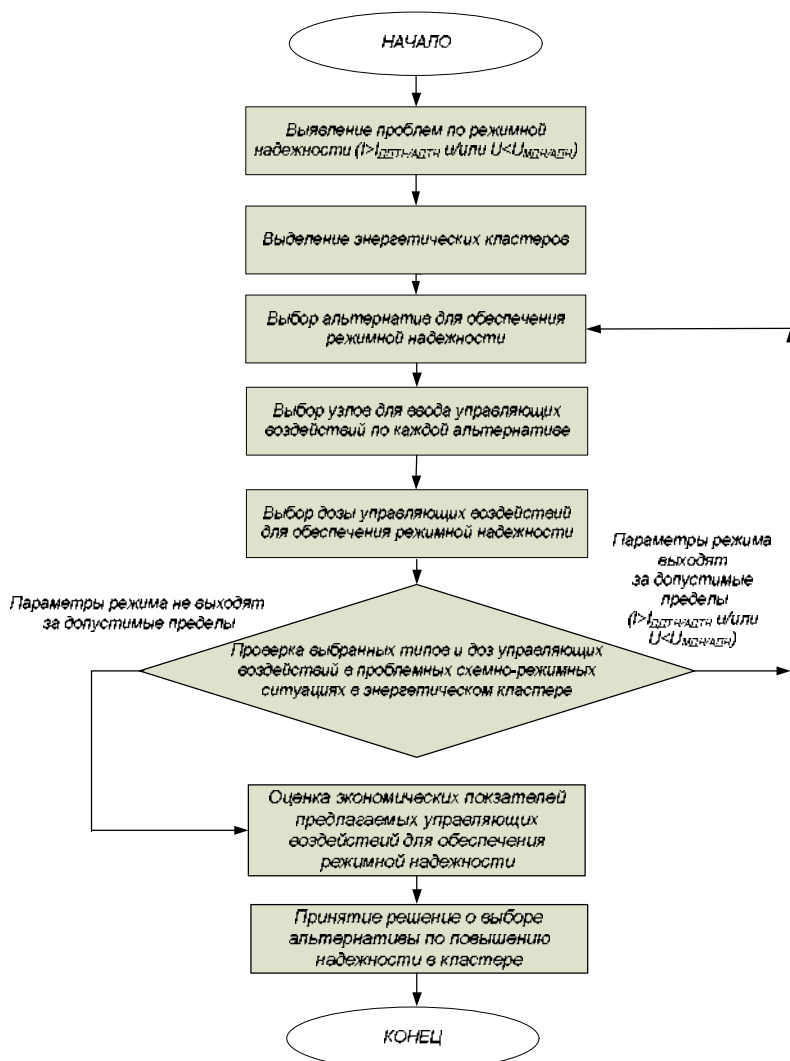


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма поиска и принятия решений по повышению надежности электрической сети

На первом этапе осуществляется выявление проблем с режимной надежностью и выделение участков сети, не отвечающих требованиям по качеству электроэнергии и надежности [3, 6]. Это выполняется путем проведения серий расчетов, перечень которых определяется по документам [4, 6], и на основе анализа установившихся режимов для разных схемно-режимных ситуаций. Количественно эти проблемы выявляются путем сопоставления рассчитанных токов в ветвях и напряжений в узлах схемы соответственно с длительно допустимой или аварийно допустимой токовой нагрузкой и с минимально допустимым или аварийно допустимым напряжением.

Второй этап предполагает выделение энергетических кластеров с центрами питания напряжением 110 кВ и выше. Энергетические кластеры выделяются по следующим признакам: управляемость и реакция электрической сети на вводимое управление параметрами схемы и (или) режима.

На третьем этапе выбираются и анализируются альтернативные решения проблемы режимной надежности в энергетических кластерах: замыкание нормально разомкнутых связей (изменение конфигурации и режима работы сети), установка устройств компенсации реактивной мощности, установка устройств распределенной генерации, замена проводов и (или) силовых трансформаторов, строительство дополнительных электрических связей (возможны комбинации таких решений), выбор мероприятий для улучшения качества электрической энергии и т. п. Выбор осуществляется по результатам анализа схемно-режимных ситуаций. В дальнейшем альтернатива реализуется выбранным типом управляющего воздействия, переводящего электрическую сеть в режим активно-адаптивной.

В качестве первой альтернативы предлагается замыкание в автоматическом режиме нормально разомкнутых связей как наиболее малозатратный вариант. При этом типом управляющего воздействия является коммутационный аппарат, автоматически переводящий сеть из разомкнутой в замкнутую. Все дальнейшие альтернативы выбираются и анализируются в замкнутом режиме работы рассматриваемого кластера, а тип управляющего воздействия определяется сущностью рассматриваемой альтернативы, например, для распределенной генерации это принятый источник энергии: ветряная электростанция, солнечная, гибридная и т. д.

Четвертый этап алгоритма заключается в поиске узлов для ввода управляющих воздействий в каждой выбранной альтернативе, в которых они дадут наилучший эффект. Для этого проводится оценка чувствительности реакции узлов энергетического кластера на изменение напряжения в каждом узле, проводится расчет эффективности каждого типа выбранных управляющих воздействий, выполняется анализ схем распределительных устройств по возможности организации автоматической коммутации.

Для оценки чувствительности сети к вводимому управляющему воздействию в рассматриваемом кластере выполняется оценка коэффициентов чувствительности по технологии, предложенной в источнике [9]:

$$K_{U_i} = \left| \frac{U_i^{\text{исх}} - U_i^{\Phi}}{U_{\text{ген}}^{\text{исх}} - U_{\text{ген}}^{\Phi}} \right|, \quad (1)$$

где $U_i^{\text{исх}}$ – напряжение в исходном режиме в i -м узле, не являющемся регулирующим;

U_i^{Φ} – напряжение в i -м узле, не являющемся регулирующим, после заданного изменения напряжения в регулирующем узле;

$U_{\text{ген}}^{\text{исх}}$ – напряжение в исходном режиме в регулирующем (генераторном) узле;

$U_{\text{ген}}^{\Phi}$ – фактическое напряжение в регулирующем (генераторном) узле после заданного изменения.

В работе [9] показано, что выделение кластеров по признаку управляемости в сложноразомкнутой сети целесообразно выполнять при значениях коэффициентов чувствитель-

ности более 0,3, что и применено в алгоритме. При этом степень управляющего воздействия на сеть оценивается по количеству узлов сети, в которых коэффициенты чувствительности больше 0,3. Узлы, в которых коэффициент чувствительности ниже 0,3, являются граничными по степени воздействия рассматриваемого типа управления (альтернативы). Выбор сенсоров возможен и по методике, предложенной в работе [2], но для распределительных сетей необходима его адаптация.

Эффективность выбранных для сравнения типов управляющих воздействий осуществляется в соответствии с рекомендациями в учебном пособии [13].

Далее проводится выбор доз управляющих воздействий в рассматриваемом энергетическом кластере. Например, мощность устройств поперечной компенсации может определяться с использованием методики, предложенной в работе [15], или путем систематического подбора. При необходимости усиления сети дополнительными поперечными связями под дозой управляющего воздействия подразумеваются сопротивления и проводимости новой связи [15]. Проверка влияния выбранных типов и доз управляющих воздействий на режимную надежность сети осуществляется путем расчета и анализа серии установившихся режимов, перечень которых принимается в соответствии с документами [4, 6].

После проведения технико-экономического сопоставления рассмотренных альтернатив выбраны тот тип и дозы управляющих воздействий, у которых наблюдается минимум дисконтированных затрат [6].

Реализация алгоритма поиска и принятия решений по обеспечению требуемого уровня надежности сети. В качестве иллюстрации предложенного алгоритма выбраны и рассмотрены два проблемных по режимной надежности энергетических кластера напряжением 35 кВ. Данные кластеры выбраны по результатам анализа режимов, рассчитанных в программно-вычислительном комплексе RasrWin. Результаты показали, что они не отвечают требованиям надежности и качества электроснабжения, установленным в источниках [4, 6].

Первый кластер 35 кВ обеспечивает электроснабжение потребителей г. Артем и Артемовского городского округа Приморского края и включает в себя пять подстанций 35 кВ, питающихся от Артемовской ТЭЦ, ПС 220 кВ Западная и ПС 110 кВ Кролевцы. Структурная схема первого энергетического кластера приведена на рисунке 2.

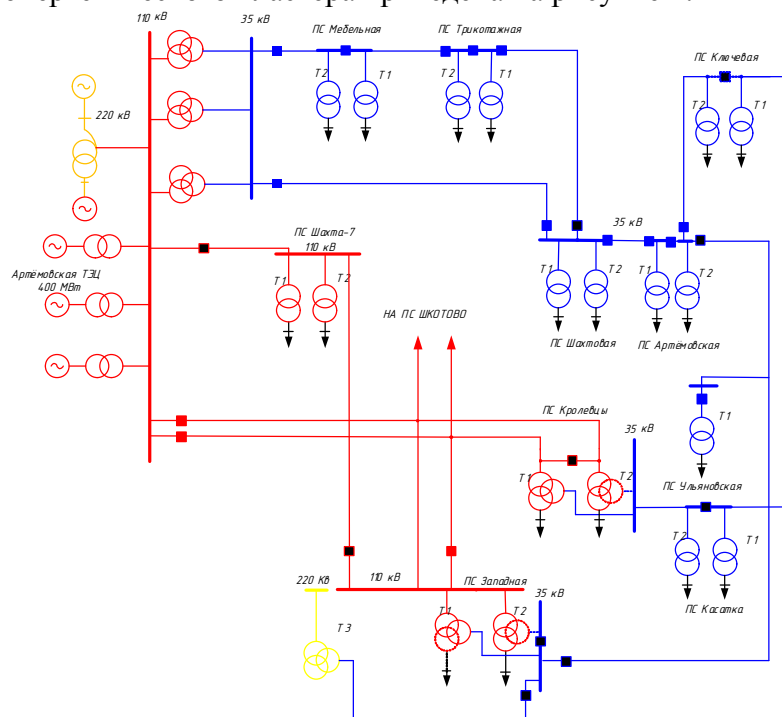


Рисунок 2 – Структурная схема энергетического кластера 35-110 кВ ПС Западная – ПС Артемовская – ПС Кролевцы – ПС Шахтовая – Артемовская ТЭЦ

В этом кластере в нормальном режиме работы ВЛ 35 кВ Артемовская ТЭЦ – ПС Шаховая фиксируются превышение допустимого тока в режиме зимних максимальных нагрузок и отключение линии максимальной токовой защитой. Так, например, эта линия в период максимальных нагрузок 2021 г. перегружалась на величину до 700 А. Линия протяженностью 8 км выполнена проводом АС-185. Длительно допустимый ток 510 А летом при температуре +25 °С и 657 А зимой при температуре –5 °С. Также в нормальном режиме перегружается участок ВЛ 35 кВ ПС Шаховая – ПС Артемовская, выполненный проводом АС-70 длиной 300 м. Сама линия выполнена двумя проводами: АС-70 и М-70. Разгрузка данного участка сети возможна только путем перевода части нагрузки подстанции Артемовская на подстанцию 220 кВ Западная. При этом отключение любой из двух питающих линий – ВЛ 35 кВ АТЭЦ – ПС Шаховая и ВЛ 35 кВ ПС Западная – ПС Артемовская – приводит к необходимости отключения потребителей из-за перегрузки оборудования. Обеспечить питание наиболее загруженных ПС Артемовская и ПС Шаховая при отключении одного из центров питания не позволяют ограничения по оборудованию. Не решается проблема с резервированием потребителей в ремонтных и послеаварийных режимах.

Перевод нагрузки на третий центр питания – ПС 110 кВ Кролевцы проблематичен из-за невозможности обеспечения требуемых параметров режима, так как возникают перегрузка сети 35 кВ и недопустимое снижение напряжения. Расстояние от ПС Артемовская до ПС 110 кВ Кролевцы составляет 16 км.

Перевод питания на линию 35 кВ АТЭЦ – ПС Трикотажная – ПС Метельная – ПС Шаховая усложняется наличием участков линии с малой пропускной способностью – менее, чем у провода АС-185.

В рассматриваемом случае две ПС из восьми с наибольшими нагрузками имеют четыре точки подпитки. Внедрив направленные устройства РЗА, можно обеспечить как снижение потерь активной мощности, так и минимизировать время простоя потребителей при отключении одной из питающих линий.

По результатам расчета послеаварийных режимов при обеспечении подпитки четырех линий в **замкнутом** режиме отключение любой одной из них **не приведет** к погашению потребителей, так как исключаются не только перегрузка по току, но и необходимость переключений для обеспечения допустимых параметров режима. Кроме того, в указанном режиме наблюдается снижение потерь активной мощности, что показано в таблице 1.

Таблица 1 – Оценка эффективности замыкания сети 35 кВ энергетического кластера в разных узлах

Способ замыкания сети	Снижение потерь активной мощности, МВт	Снижение относительных потерь активной мощности, %	Экономия потерь электрической энергии в год, кВт·ч	Экономия потерь электрической энергии в год, тыс. руб.
1. Включением выключателя (В) 35 на ПС Шаховая в сторону ПС Трикотажная	0,177	11,35	1021213	2583,670
2. Включением В 35 на ПС Шаховая в сторону ПС Трикотажная, В 35 кВ на ПС Артемовская в сторону ПС Западная	0,151	9,68	871217	2204,181
3. Включение В 35 на ПС Шаховая в сторону ПС Трикотажная, В 35 кВ на ПС Артемовская в сторону ПС Западная, В 35 кВ на ПС Артемовская в сторону ПС 35 кВ Ключевая	0,1582	10,14	912703	2309,139

Таким образом перевод сети 35 кВ в замкнутый режим обеспечит требуемый уровень надежности режима типа N-1, что невозможно в действующем разомкнутом режиме работы сети.

В послеаварийных режимах типа N-1 при работе сети 35 кВ не требуется реконфигурация схемы сети, однако для защиты оборудования 35 кВ от перегрузок требуется предусмотреть средства адаптивного деления сети в режимах при отключении трансформаторов на ПС 220 кВ Западная, при отключении трансформаторов на ПС 110 кВ Кролевцы и при отключении двух или трех питающих ВЛ 35 кВ. Для этого требуется разработка специальной автоматики, иерархически согласованной с системой противоаварийной автоматики и управления, работающей либо при перегрузке по току по принципу автоматики отключения перегруженного оборудования (АОПО) с действием на деление сети, либо по иному, заранее определенному алгоритму, обеспечивающему недопущение выхода параметров режимов за допустимую область. Адаптивное деление сети целесообразно применять при фиксации перегрузки на головных участках как наиболее вероятных. Отсутствие такой автоматики может привести к неселективному отключению и каскадному развитию аварии при погашении крупного питающего центра. В предложенной замкнутой схеме сети (см. рисунок 2) отключение одного из центров питания не приводит к недопустимому снижению напряжения. Данный тип управляющего воздействия достаточен для решения проблемы надежности функционирования сети.

Таким образом, применение воздействия в виде изменения режима работы сети данного кластера решает проблему перегрузки сети в режимах N-1 и не приводит к недопустимому снижению напряжения при текущем уровне максимальных нагрузок.

С учетом возможности выхода параметров режима за допустимые пределы проведена оценка чувствительности параметров режима рассматриваемого кластера 35 кВ к управляющему воздействию – регулированию напряжения путем компенсации реактивной мощности (КРМ) в замкнутом режиме на участке Артемовская ТЭЦ – ПС Западная – ПС Кролевцы (таблица 2).

Таблица 2 – Результаты оценки чувствительности сети к регулированию напряжения с помощью КРМ на участке Артемовская ТЭЦ – ПС Западная – ПС Кролевцы

Узел сети, в котором оценивается коэффициент чувствительности K_u	ПС 35 кВ, на которой выполняется регулирование напряжения					
	ПС Артемов-ская	ПС Ключе-вая	ПС Ка-сатка	ПС Шах-товая	ПС Трикотаж-ная	ПС Мебель-ная
ПС 110 кВ Западная секция 35 кВ	0,3537	0,2264	0,2047	0,2825	0,2489	0,2271
ПС 110 кВ Западная секция 220 кВ	0,0938	0,0640	0,0590	0,0816	0,0737	0,0691
ПС 35 кВ Касатка шины 35 кВ	0,8299	0,9671	1,0000	0,6859	0,6100	0,5627
ПС 35 кВ Ключевая, 2-я секция 35 кВ	0,8635	0,9987	0,9236	0,7148	0,6360	0,5869
ПС 110 кВ Кролевцы, 1-я секция 110 кВ	0,2719	0,2515	0,2498	0,2761	0,2597	0,2543
ПС 110 кВ Кролевцы, 1-я секция 35 кВ	0,5056	0,6286	0,6559	0,4138	0,3674	0,3382
ПС 35 кВ Шахтовая шины 35 кВ	0,8021	0,5297	0,4841	1,0000	0,8901	0,8218
ПС 35 кВ Ключевая, 2-я секция 35 кВ	0,8644	1,0000	0,9213	0,7155	0,6366	0,5874
ПС 35 кВ Мебельная шины 35 кВ	0,7058	0,4653	0,4251	0,8797	0,9241	1,0000
ПС 35 кВ Трикотажная шины 35 кВ	0,7547	0,4980	0,4551	0,9408	1,0000	0,9121
ПС 35 кВ Артемовская, 1-я секция 35 кВ	0,9975	0,6640	0,6074	0,8301	0,7395	0,6833
ПС 35 кВ Артемовская, 2-я секция 35 кВ	1,0000	0,6624	0,6060	0,8320	0,7411	0,6848
ПС 110 кВ Западная, 1-я секция 110 кВ	0,3552	0,2274	0,2056	0,2837	0,2499	0,2281
ПС 110 кВ Западная, 2-я секция 110 кВ	0,3568	0,2283	0,2065	0,2850	0,2510	0,2290
Артемовская ТЭЦ шины 35 кВ	0,5247	0,3478	0,3183	0,6520	0,6398	0,6527
Артемовская ТЭЦ шины 110 кВ	0,1844	0,1496	0,1444	0,2120	0,1985	0,1987
Количество узлов, где $K_u > 0,3$	13	10	10	10	10	10
Количество узлов, где $K_u > 0,5$	10	7	6	9	9	9
Эффективность регулирования, кВ/Мвар	0,0789	0,1044	0,1097	0,0773	0,0820	0,0837

По результатам расчетов видно, что наибольшее воздействие на сеть по коэффициенту чувствительности напряжения проявляется при вводе управляющего воздействия на ПС Артемовская ($K_u > 0,3$ в 13 узлах), а максимальная эффективность – при регулировании

напряжения на ПС 35 кВ Касатка. При этом коэффициенты чувствительности больше 0,3 наблюдаются только в сети 35 кВ, что подтверждает достаточность первого типа управляющего воздействия – перевод сети 35 кВ в замкнутый режим.

Второй энергетический кластер 35 кВ выбран в Надеждинском районе Приморского края. Здесь сеть кластера получает питание от ПС 220 кВ Западная, ПС 110 кВ Давыдовка и ПС 110 кВ Кролевцы. Структурная схема второго энергетического кластера приведена на рисунке 3.

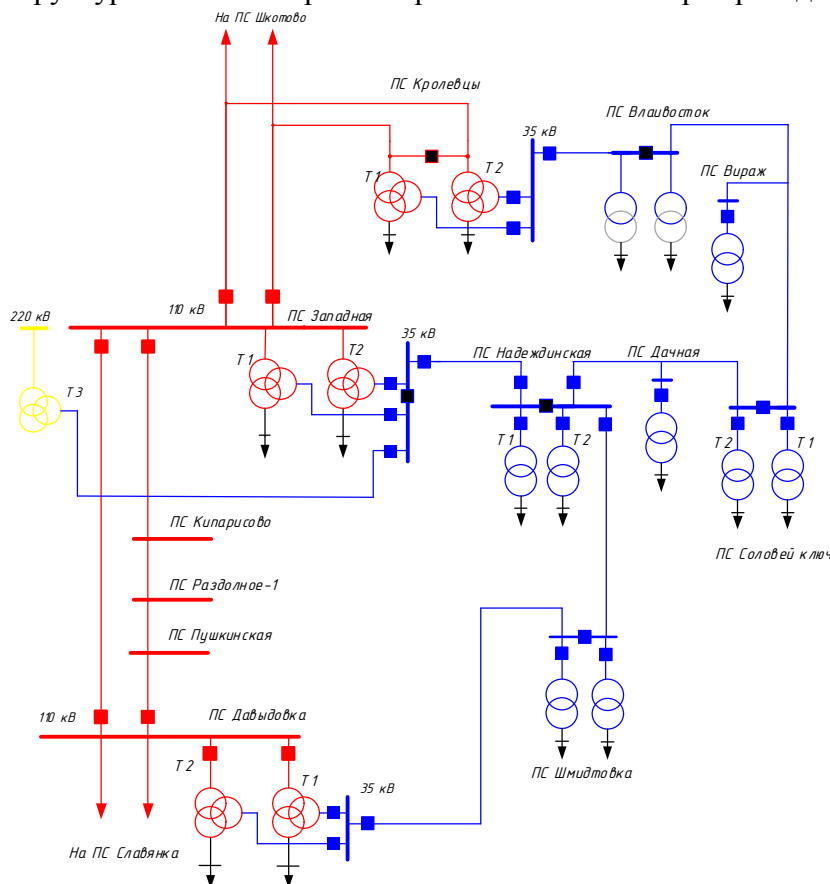


Рисунок 3 – Структурная схема энергетического кластера 35 – 110 кВ ПС Западная – ПС Надеждинская – ПС Шмидтовка – ПС Давыдовка – ПС Соловей ключ – ПС Кролевцы

Проблема в этом кластере заключается в невозможности обеспечить резервирование всех потребителей при отключении или выводе в ремонт ВЛ 35 кВ ПС Западная – ПС Надеждинская в режиме максимальных нагрузок, когда сеть нормально разомкнута. В таком режиме происходит перегрузка ВЛ 35 кВ ПС Давыдовка – ПС Шмидтовка – ПС Надеждинская, при этом ВЛ ПС Давыдовка – ПС Шмидтовка перегружается до недопустимого значения (выше длительно допустимой токовой нагрузки провода – ДДТН), а напряжение на подстанции Надеждинская снижается ниже нормируемых значений [3].

Анализ установившихся режимов в период зимнего максимума нагрузки показал, что при замыкании сети 35 кВ между ПС 110 кВ Давыдовка и ПС 110 кВ Кролевцы с заменой трансформаторов тока 35 кВ ввиду недостаточной пропускной способности по первичному току исключается перегрузка сети и повышается уровень напряжения в рассматриваемом послеаварийном режиме **с 17 – 20 кВ до 27 кВ**. Таким образом, первая альтернатива – перевод сети в замкнутый режим – повышает надежность электроснабжения потребителей, но не решает проблему поддержания напряжения в допустимых пределах. Целесообразно рассмотреть регулирование напряжения путем компенсации реактивной мощности.

Для поиска оптимального места ввода в сеть рассматриваемого типа управляющего воздействия проведена оценка эффективности регулирования напряжения на ПС данного кластера и оценка коэффициентов чувствительности напряжений.

Результаты оценки эффективности регулирования напряжения компенсацией реактивной мощности и коэффициентов чувствительности напряжений при установке компенсирующих устройств в разных узлах приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты оценки чувствительности напряжений на участке ПС Западная – ПС Надеждинская – ПС Шмидтовка – ПС Давыдовка – ПС Соловей ключ – ПС Кролевцы

Узел сети, в котором оценивается K_u	ПС 35 кВ, на которой регулируется напряжение		
	ПС Надеждинская	ПС Соловей ключ	ПС Шмидтовка
ПС 35 кВ Тавричанка, 1-я секция 35 кВ	0,2795	0,2426	0,4069
ПС 500 кВ СН Владивосток (шины 35 кВ)	0,5378	0,6445	0,5103
ПС 35 кВ Надеждинская, 1-я секция 35 кВ	1,0000	0,8708	0,9412
ПС 500 кВ СН Владивосток (шины 35 кВ)	0,5373	0,6438	0,5098
ПС 35 кВ Соловей Ключ, 1-я секция 35 кВ	0,8333	0,9994	0,7888
ПС 110 кВ Давыдовка, 2-я секция 35 кВ	<u>0,2779</u>	<u>0,2412</u>	0,4045
ПС 110 кВ Давыдовка с.т. Т-2	0,8273	0,7171	1,2061
ПС 110 кВ Давыдовка, 2-я секция 110 кВ	<u>0,2614</u>	<u>0,2427</u>	0,3523
ПС 35 кВ Тавричанка, 1-я секция 35 кВ	0,2787	0,2419	0,4056
ПС 35 кВ Шмидтовка шины 35 кВ	0,6888	0,5977	1,0000
ПС 110 кВ Кролевцы, 2-я секция 110 кВ	0,2555	0,3126	0,2363
ПС 110 кВ Кролевцы 1-я секция 35 кВ	0,7602	0,9316	0,7017
ПС 110 кВ Кролевцы, 1-я секция 110 кВ	<u>0,1269</u>	<u>0,1353</u>	<u>0,1451</u>
ПС 35 кВ Соловей Ключ, 2-я секция 35 кВ	0,8338	1,0000	0,7892
ПС 35 кВ Надеждинская, 2-я секция 35 кВ	1,0004	0,8703	0,9416
$K_u > 0,3$	9	10	13
$K_u > 0,5$	9	9	9
Эффективность регулирования, кВ/Мвар	0,413	0,413	0,306

Коэффициенты чувствительности напряжения в узлах кластера при установке компенсирующих устройств на шинах ПС Надеждинская, ПС Шмидтовка, ПС Соловей ключ приведены на рисунке 4.

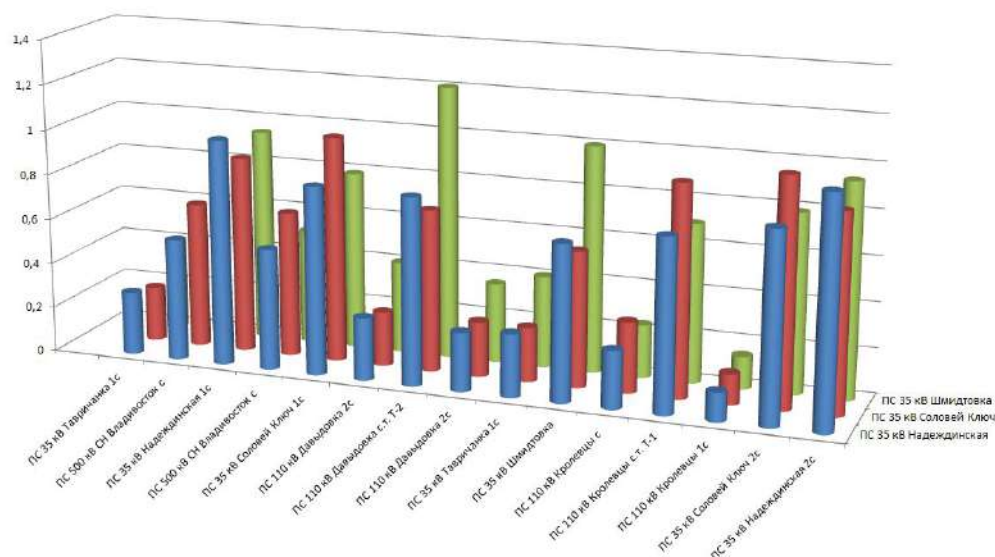


Рисунок 4 – Сравнение коэффициентов чувствительности на участке сети 35 – 110 кВ ПС Западная – ПС Надеждинская – ПС Шмидтовка – ПС Давыдовка – ПС Соловей ключ – ПС Кролевцы

Анализ коэффициентов чувствительности показывает, что максимальный охват кластера наблюдается при регулировании напряжения путем поперечной компенсации реактивной

мощности на ПС Шмидтовка (зеленые столбцы гистограммы), а наибольший эффект от такого регулирования проявляется на ПС Надеждинская и на ПС Соловей ключ. С учетом возможности подключения к шинам ПС компенсирующих устройств выбор узла для ввода управляющего воздействия падает на ПС 35 кВ Надеждинская. Такое адаптивное регулирование напряжения является технически реализуемым и менее затратным по реконструкции подстанции для подключения компенсирующих устройств (две ячейки КРУ).

Мощность компенсирующих устройств для регулирования напряжения на ПС Надеждинская в наиболее сложном послеаварийном режиме (отключение ВЛ 35 кВ Западная – Надеждинская) при подпитке от двух из трех возможных источников питания составляет 12,8 Мвар.

Проблема недостаточной надежности функционирования распределительных сетей, традиционно работающих в разомкнутом режиме одностороннего питания, решена выделением энергетических кластеров, применением разработанного методического подхода, основанного на выборе оптимальных мест замыкания электрических сетей, типов управляющих воздействий, с помощью которых энергетический кластер переводится в активно-адаптивную сеть, а также алгоритма, его реализующего. Предложено узлы для ввода управляющих воздействий и определения доз таких воздействий определять с помощью коэффициентов чувствительности по напряжению. Таким образом, в работе получено решение проблемы повышения надежности электрических сетей путем их кластеризации с последующим применением на основе системного подхода различных технологий и их сочетаний, обеспечивающих требуемый уровень надежности, рассматривая их как альтернативы, с выбором узлов для ввода управляющих воздействий на основе их чувствительности к рассматриваемой альтернативе. Рассматриваемый подход и алгоритм ранее не применялись. Практическая реализация и эффективность такого подхода продемонстрирована на реальных электрических сетях Приморского края, в которых при эксплуатации неоднократно фиксировались отключения потребителей из-за недостаточной надежности электроснабжения.

Список литературы

1. Галтеева, Д. В. Перспективные конфигурации распределительных сетей / Д. В. Галтеева. – Текст : электронный // Актуальные проблемы энергетики 2017 : материалы студенческой научно-технической конференции / Белорусский национальный технический университет. – Минск, 2018. – С. 95–96. – URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/41497/> (дата обращения: 28.01.2023).
2. Гамм, А. З. Сенсоры и слабые места в электроэнергетических системах / А. З. Гамм, И. И. Голуб. – Иркутск: СЭИ СО РАН, 1996. – 99 с. – Текст: непосредственный.
3. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Москва : Стандартинформ. – 2014. – 19 с. – Текст : непосредственный.
4. ГОСТ Р 58670–2019. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Планирование развития энергосистем. Расчеты электроэнергетических режимов и определение технических решений при перспективном развитии энергосистем. Нормы и требования. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 14 с. – Текст : непосредственный.
5. Nikander Ari & Repo Sami & Järventausta Pertti. Utilizing the ring operation mode of medium voltage distribution feeders. *17th International Conference on Electricity Distribution. Barcelona*, 12-15 May 2003, pp. 1-6. Available at: <http://www.cired.net/publications/cired2003/reports/R%203-25.pdf> (accessed 05.02.2023).
6. Об утверждении Методических указаний по проектированию развития энергосистем и о внесении изменений в приказ Минэнерго России от 28 декабря 2020 г. № 1195 : Приказ

Минэнерго России от 06.12.2022 № 1286 [Зарегистрировано в Минюсте России 30.12.2022 № 71920]. – Текст : непосредственный.

7. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью [Одобрена Правлением ОАО «ФСК ЕЭС» 28.04.2012]. – Москва : Научно-технический центр федеральной сетевой компании единой энергетической системы, 2012. – 235 с. – Текст : непосредственный.

8. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). – Москва : ЭНАС, 2012. – 488 с. – Текст : непосредственный.

9. Савина, Н. В. Методика кластерного зонирования электроэнергетических систем по коэффициенту чувствительности напряжений в узлах / Н. В. Савина, А. А. Казакул, С. В. Тагиров. – Текст : непосредственный // Вестник Иркутского государственного технического университета. – Иркутск, 2014. – № 6 (89). – С. 178–185.

10. Савина, Н. В. Выбор факторов сравнения для перевода электрических распределительных сетей в активно-адаптивные сети / Н. В. Савина, М. А. Янькова – Текст : электронный // Вестник Амурского государственного университета. – Благовещенск, 2022. – № 97 (30). – С. 111–117. – URL: https://vestnik.amursu.ru/wp-content/uploads/2022/05/n97_111-117.pdf (дата обращения: 11.02.2023).

11. Мухлынин, Н. Д. Перспективные топологии и информационное обеспечение в распределительных сетях / Н. Д. Мухлынин, А. В. Паздерин. – Текст : электронный // Вестник науки Сибири. – Томск, 2015. – № 1s (15). – С. 72–76. – URL: <https://jwt.su/journal/article/view/697/700> (дата обращения: 03.03.2023).

12. Vukolov V., Papkov B., Pnev E. et al. Configuration management of electricity distribution grids 6-35 kV according to the criteria of reliability. Rudenko International Conference «Methodological problems in reliability study of large energy systems» (RSES 2018). Irkutsk, 2018, no. 58, pp. 178-185. Available at: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2018/33/e3sconf_rses2018_02017.pdf (accessed 15.02.2023).

13. Электроэнергетические системы : учебное пособие диспетчерского персонала / Будовский В. П., Сацук Е. И., Дьячков В. А. [и др.] ; под общей редакцией главного диспетчера АО «СО ЕЭС» М. Н. Говоруна. – Москва : ЗАО «Энергетические технологии», 2021. – 684 с. – Текст : непосредственный.

14. Мухлынин, Н. Д. Управление распределительными сетями с использованием потоковой модели установившегося режима : специальность 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Мухлынин Никита Дмитриевич ; Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2018. – 24 с. – Текст : непосредственный.

15. Казакул, А. А. Методика оптимальной компенсации реактивной мощности в сетях распределительных компаний в условиях неопределенности / А. А. Казакул, Н. В. Савина. – Текст : непосредственный // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2010. – № 3. – С. 42–46.

References

1. Galteeva D.V. Perspective configurations of distribution networks. *Actual problems of energy 2017: materials of the student scientific and technical conference*. Minsk, 2017, pp. 95-96 (In Russian). Available at: <https://rep.bntu.by/handle/data/41497/> (accessed 28.01.2023).

2. Gamm A.Z., Golub I.I. *Sensory i slabye mesta v elektroenergeticheskikh sistemakh* [Sensors and places in the electric power industry]. Irkutsk: SEI SO RAN Publ., 1996, 99 p. (In Russian).

3. GOST 32144–2013. Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Standards for the quality of electrical energy in general-purpose power supply systems, Moscow, Standartinform Publ., 2014. 19 p. (In Russian).

4. National Standard 58670–2019. United power system and isolated power systems. Planning of power systems development. Calculations of electric power regimes and determination of technical solutions in long-range development of power systems. Norms and requirements, Moscow, Standartinform, 2019. 14 p. (In Russian).
5. Nikander Ari & Repo Sami & Järventausta Pertti. Utilizing the ring operation mode of medium voltage distribution feeders. *17th International Conference on Electricity Distribution. Barcelona*, 12-15 May 2003, pp. 1-6. Available at: <http://www.cired.net/publications/cired2003/reports/R%203-25.pdf> (accessed 05.02.2023).
6. Order of the Ministry of Energy of Russia dated December 6, 2022 N 1286 «On approval of the Guidelines for the design of the development of energy systems and on amendments to the order of the Ministry of Energy of Russia dated December 28, 2020 N 1195» (Registered with the Ministry of Justice of Russia on December 30, 2022 N 71920) (In Russian).
7. The concept of an intelligent electric power system with an active-adaptive network. Approved by the Management Board of JSC FGC UES on April 28, 2012. Moscow : Scientific and Technical Center of the Federal Grid Company of the Unified Energy System Publ., 2012, 235 p. (In Russian).
8. *Pravila ustroistva elektroustanovok (PUE)* [Rules for the installation of electrical installations (PUE)]. Moscow: ENAS Publ., 2012, 488 p. (In Russian).
9. Kazakul A.A., Savina N.V., Tagirov S.V. Methodology for cluster zoning of electric power systems according to the voltage sensitivity coefficient at the nodes. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Irkutsk State Technical University*, 2014, no. 6 (89), pp. 178-185 (In Russian).
10. Savina N.V., Yankova M.A. Selection of comparison factors for the transfer of electric distribution networks to active-adaptive networks. *Vestnik Amurskogo gosudarstvennogo universiteta – Bulletin of the Amur State University*, 2022, no. 97 (30), pp. 111-117. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/vybor-faktorov-sravneniya-dlya-perevoda-elektricheskikh-raspredelitelyh-setey-v-aktivno-adaptivnye-seti> (accessed 11.02.2023) (In Russian).
11. Mukhlynin N.D., Pazderin A.V. Perspective topologies and information support in distribution networks. *Vestnik nauki Sibiri – Siberian Journal of Science*, 2015, Special issue 1 (15), pp. 72-76. Available at: <https://jwt.su/journal/article/view/697/700> (accessed 03.03.2023) (In Russian).
12. Vukolov V., Papkov B., Pnev E. et al. Configuration management of electricity distribution grids 6-35 kV according to the criteria of reliability. Rudenko International Conference «Methodological problems in reliability study of large energy systems» (RSES 2018). Irkutsk, 2018, no. 58, pp. 178-185. Available at: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2018/33/e3sconf_rses2018_02017.pdf (accessed 15.02.2023).
13. Budovskii V.P., Satsuk E.I., D'iachkov V.A., ed. Govorun M.N. *Elektroenergeticheskie sistemy: uchebnoe posobie dispetcherskogo personala* [Electric power systems: training manual for dispatching personnel]. Moscow: Energy technologies Publ., 2021, 684 p. (In Russian).
14. Mukhlynin N.D. *Upravlenie raspredelitel'nymi setiami s ispol'zovaniem potokovoi modeli ustanovivshegosia rezhima* (Management of distribution networks using a flow model of steady state). Doctor's thesis abstract, Yekaterinburg, Ural Federal University the first President of Russia B.N. Yeltsin, 2018, 24 p. (In Russian).
15. Kazakul A.A., Savina N.V. Methodology of optimal reactive power compensation in distribution company networks under uncertainty. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta – Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University*, 2010, no. 3, pp. 42-46 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Савина Наталья Викторовна

Амурский государственный университет (АмГУ).
Игнатьевское шоссе, д. 21, г. Благовещенск,
675000, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Энергетика», АмГУ.

Тел.: +7 (4162) 23-47-26.

E-mail: nataly-savina@mail.ru

Казакул Алексей Александрович

Амурский государственный университет (АмГУ).
Игнатьевское шоссе, д. 21, г. Благовещенск,
675000, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетика», АмГУ.

Тел.: +7 (4162) 23-45-02.

E-mail: 0311343@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Савина, Н. В. Повышение надежности функционирования распределительных электрических сетей путем выделения энергетических кластеров и адаптивного управления схемно-режимной ситуацией / Н. В. Савина, А. А. Казакул. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 2 (54). – С. 136 – 149.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Savina Natalia Viktorovna

Amur State University (AmSU).
21, Ignatievskoe shosse st., Blagoveshchensk,
675000, the Russian Federation.

Doctor Of Sciences in Engineering, professor, head of the department «Energy», AmSU.

Phone: +7 (4162) 23-45-02.

E-mail: nataly-savina@mail.ru

Kazakul Alexey Alexandrovich

Amur State University (AmSU).
21, Ignatievskoe shosse st., Blagoveshchensk,
675000, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Energy», AmSU.

Phone: +7 (4162) 23-45-02.

E-mail: 0311343@gmail.com

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Savina N.V., Kazakul A.A. Improving the reliability of the functioning of distribution electric networks by allocating energy clusters and adaptive control of the circuit-mode situation. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 2 (54), pp. 136-149 (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 заимствования в системе «Антиплагиат» (<https://www.antiplagiat.ru/>). Оригинальность должна составлять не менее 80 %.
5. Гарантийное письмо о передаче авторского права с подписями всех авторов (соавторов) статьи.
6. Согласие на обработку персональных данных от каждого автора (соавтора) статьи.

В тексте статьи обязательно указываются тематический раздел журнала, в который подается статья, и научная специальность, которой она соответствует.

Текст статьи включает в себя УДК, ФИО авторов, аффилиацию авторов (место работы или учебы), заглавие статьи, аннотацию, ключевые слова на русском и английском языках, текст статьи, список литературы в русском и латинском алфавитах, сведения об авторах и библиографическое описание статьи на русском и английском языках.

Текст статьи оформляется в соответствии с установленным образцом.

Сведения об авторах включают в себя фамилию, имя, отчество, ученую степень, ученое звание, место работы с указанием почтового адреса, должность, контактные телефоны, e-mail для обратной связи.

Требования к аннотации статьи:

аннотация должна быть кратким точным изложением содержания статьи, включающим в себя основные фактические сведения и выводы описываемой работы;

текст аннотации должен быть лаконичен и четок, свободен от второстепенной информации, должен отличаться убедительностью формулировок;

сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте аннотации;

объем аннотации на русском и английском языках должен содержать от 200 до 250 слов;

аннотация на русском и английском языках должна включать в себя следующие аспекты содержания статьи: предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы;

дополнительно англоязычная аннотация должна быть оригинальной (не быть калькой русскоязычной аннотации); содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье); «англоязычной» (написанной качественным английским языком); необходимо использовать активный, а не пассивный залог.

Требования к рукописи статьи:

рукопись статьи должна содержать УДК (в левом верхнем углу, обычный, 12 пт), инициалы и фамилию на русском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на русском языке (по центру, 10 пт), название статьи на русском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), инициалы и фамилию на английском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на английском языке (по центру, 10 пт), название статьи на английском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт);

текст статьи должен быть набран в редакторе Word, размер страницы – формат А4 (210 × 297 мм);

размер полей – 20 мм (все четыре поля), размер и тип шрифта основного текста – Times New Roman, 12 пт;

размеры символов в формулах (выполняются только в редакторе MathType): обычный – 12 пт, крупный индекс – 7, мелкий – 5, крупный символ – 15, мелкий – 12 пт; начертание и размер символов в расшифровке формул по тексту должны в точности совпадать с начертанием и размером символов в самой формуле; при записи формул следует использовать значок градуса (°), а не цифру «ноль» (0); следует использовать знак умножения (×), а не букву «х»;

в качестве знаков препинания между словами используются тире (–), а не дефисы (-);

буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавитов, математические символы, такие как cos, sin, max, min, – прямым шрифтом;

текст в таблицах, подрисуночные подписи и названия таблиц набираются шрифтом Times New Roman, 10 пт; необходимо использовать французские кавычки («ёлочки»);
междустрочный интервал одинарный, абзацный отступ – 0,75 см;
автоматическую нумерацию необходимо полностью исключить;
инициалы и фамилии не должны отделяться друг от друга;
каждый рисунок дополнительно должен быть представлен в отдельном (исходном) файле в редактируемом формате;
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 (образец прилагается);
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»

№ 2 (54) 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 26.06.2023.

Формат 60 × 90/8.

Тираж 250 экз.

Дата выпуска: 30.06.2023.

