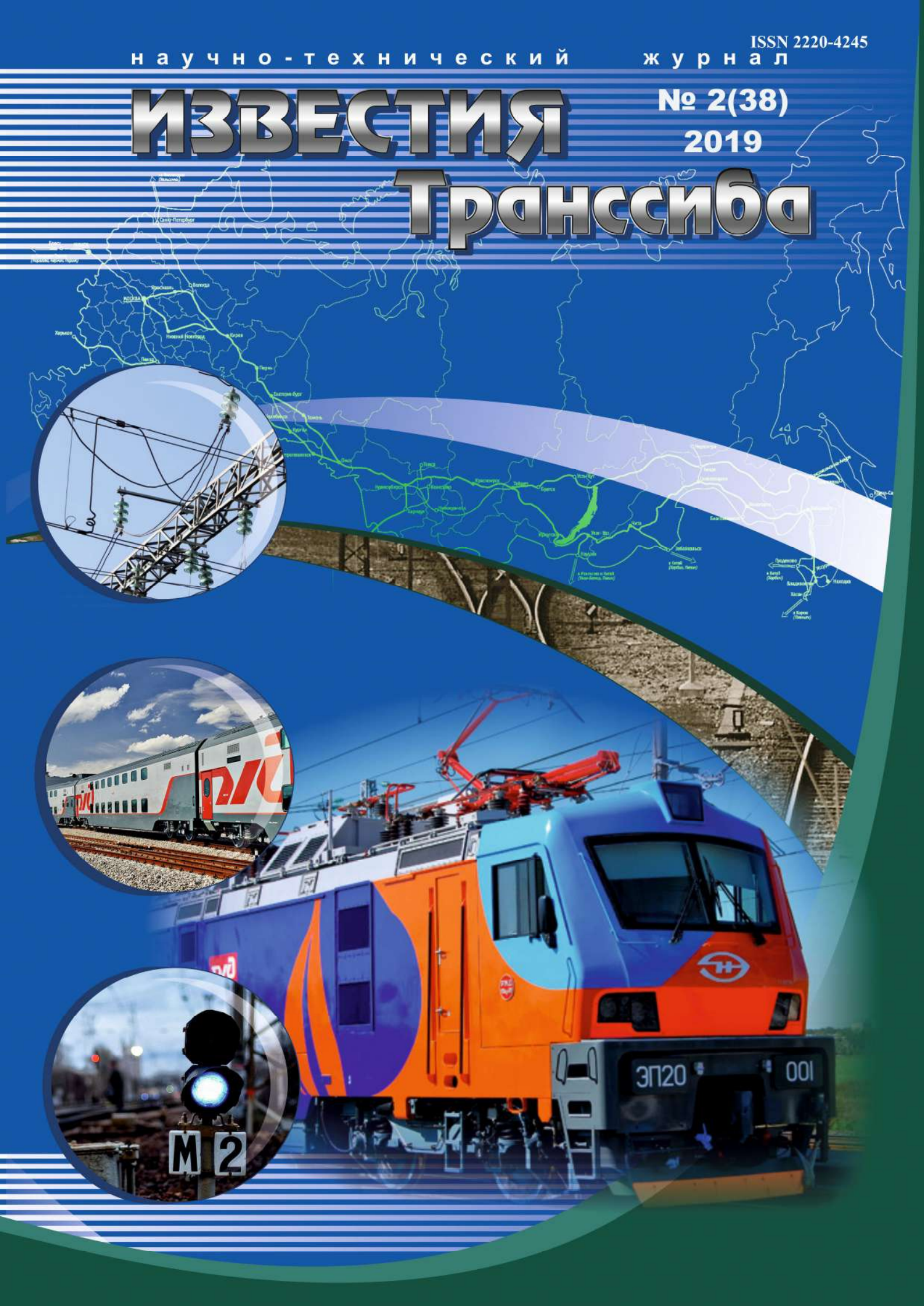
ISSN 2220-4245

научно-технический журнал

ИЗВЕСТИЯ Транссиба

№ 2(38)
2019



ИЗВЕСТИЯ Транссиба

научно-технический журнал

№ 2(38)
2019

Периодичность - 4 выпуска в год

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

1. Овчаренко Сергей Михайлович – главный редактор, ректор ОмГУПСа, д.т.н., доцент.
2. Галиев Ильхам Исламович – зам. главного редактора, президент ОмГУПСа, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ.
3. Шантаренко Сергей Георгиевич – зам. главного редактора, проректор по научной работе ОмГУПСа, д.т.н., доцент.
4. Черемисин Василий Титович – зам. главного редактора, директор НИИЭ ОмГУПСа, д.т.н., профессор.
5. Бокарев Сергей Александрович – профессор кафедры «Мосты» СГУПСа, д.т.н., профессор (Новосибирск).
6. Ведрученко Виктор Родионович – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПСа, д.т.н., профессор.
7. Глинка Тадеуш – доктор, профессор Силезского политехнического университета (Гливице, Польша).
8. Горюнов Владимир Николаевич – зав. кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, д.т.н., профессор (Омск).
9. Дёмин Юрий Васильевич – профессор кафедры «Электрооборудование и автоматика» СГУВТа, д.т.н., профессор (Новосибирск).
10. Зыкина Анна Владимировна – зав. кафедрой «Прикладная математика и фундаментальная информатика» ОмГТУ, д.ф.-м.н., профессор (Омск).
11. Каргапольцев Сергей Константинович – ректор ИрГУПСа, д.т.н., профессор (Иркутск).
12. Косарев Александр Борисович – зам. генерального директора ОАО «ВНИИЖТ», д.т.н., профессор (Москва).
13. Лю Цзянькунь – доктор, профессор Пекинского транспортного университета, Школа строительства (Пекин, Китай).
14. Лебедев Виталий Матвеевич – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПСа, д.т.н., профессор.
15. Парамонов Александр Михайлович – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГТУ, д.т.н., доцент (Омск).
16. Сидоров Олег Алексеевич – зав. кафедрой «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПСа, д.т.н., профессор.
17. Солоненко Владимир Гельевич – профессор кафедры «Вагоны» КазАТК, д.т.н., профессор (Алматы, Республика Казахстан).
18. Файзибаев Шерзод Сабирович – профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» ТашИИТа, д.т.н., профессор (Ташкент, Республика Узбекистан).
19. Харламов Виктор Васильевич – зав. кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПСа, д.т.н., профессор.

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 for research of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
4. Cheremisin Vasily Titovich – deputy chief editor, director of SRIE OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
5. Bokaryov Sergey Alexandrovich – professor of the department «Bridges» of SSTU, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
6. Vedruchenko Victor Rodionovich – professor of the department «Heat-power» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
7. Glinka Tadeusz – Ph. D., professor of Silesian University of Technology (Gliwice, Polish).
8. Goryunov Vladimir Nikolaevich – head of the department «Power supply of industrial enterprises» of OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
9. Demin Yury Vasilyevich – professor of the department «Electrical equipment and automation» of SSUWT, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
10. Zykina Anna Vladimirovna – head of the department «Applied mathematics and fundamental computer science» of OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
11. Kargapoltcev Sergey Konstantinovich – rector of ISTU, D. Sc., professor (Irkutsk, Russia).
12. Kosarev Alexander Borisovich – deputy of general director of JSC «VNIIZhT» (Railway Research Institute), D. Sc., professor (Moscow, Russia).
13. Liu Jiankun – Ph. D., professor of Beijing Jiaotong University, School of Civil Engineering (Beijing, China).
14. Lebedev Vitaliy Matveyevich – professor of the department «Heat-power » of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
15. Paramonov Alexander Mikhailovich – professor of the department «Heat-power » of OmSTU, D. Sc., associate professor (Omsk).
16. Sidorov Oleg Alexeevich – head of the department «Power supply of rail transport» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
17. Solonenko Vladimir Gelyevich – professor of the department «Wagons» of KazATC, D. Sc., professor (Almaty, Kazakhstan).
18. Fayzibaev Sherzod Sabirovich – professor of the department «Wagons» of TashIRE, D. Sc., professor (Tashkent, Uzbekistan).
19. Kharlamov Viktor Vasilyevich – head of the department «Electrical machines and common electrotechnic» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).

Иванченко Владимир Иванович – ответственный секретарь (Омск).

СОДЕРЖАНИЕ

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Овчаренко С. М., Минаков В. А., Ведрученко В. Р. Совершенствование технологического процесса ремонта дизелей типа 49……2
Михеев В. А., Томилова О. С., Бородин А. В. Предиктивный ремонт тягового подвижного состава на базе бортовых микропроцессорных систем управления……8
Капустина Е. П., Леоненко Е. Г. Влияние технических характеристик и их отклонений на устойчивость движения порожнего подвижного состава……16
Бакланов А. А., Шиляков А. П. Энергетическая эффективность рекуперативного торможения пассажирских электровозов постоянного тока……23
Портной А. Ю., Мельниченко О. В., Селедцов К. П., Линьков А. О. Особенности вибрации, возникающей в паре «колесо электровоза - рельс» в кривых малого радиуса……33
Оганьян Э. С., Волохов Г. М., Гасюк А. С. Прогнозирование ресурса несущих конструкций локомотивов по условиям эксплуатации……47
Петров В. В., Петров К. С. Математическая модель для оценки влияния отклонений конструктивных параметров вагонной тележки от номинальных значений на ее кинематические свойства……55
Утепбергенова С. М., Томилов В. В., Сидоров О. А. Исследование систем охлаждения полоза токоприемника магистрального электроподвижного состава……66
Сидорова Е. А., Подгорная С. О. Совершенствование методологии контроля эффективности использования локомотивов на тягу поездов……75
Окунев А. В., Галкин А. Г., Ковалев А. А. Определение предельных состояний опор контактной сети на основе математического моделирования изменения их несущей способности……82
Космодамианский А. С., Воробьев В. И., Измеров О. В., Капустин М. Ю., Шевченко Д. Н. Методы поиска оптимальных параметров динамической системы тягового привода в процессе выбора вариантов конструкции……90
Дроздов Е. А., Кузьмичев Е. Н. Усовершенствование автоматического пневматического тормоза вагона……101

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Кравченя И. Н., Дубровская Т. А. Применение методов математического моделирования при проектировании реконструкции железнодорожного пути……109

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

Брылова Т. Б., Кутышкин А. В. Имитационное моделирование функционирования технологических процессов ремонта узлов подвижного состава……117

Совершенствование промышленных теплосистем, теплотехнического и теплового оборудования

Кадцын И. И., Хороших О. В., Кузнецов В. Ф. Методика определения оптимальной глубины односкважинного коаксиального геотермального коллектора……127

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

Митрохин В. Е., Агарков Н. Е. К вопросу о возможности измерения конденсаторным методом диэлектрической проницаемости печатных плат и кабелей телекоммуникаций железнодорожного транспорта на высоких частотах……135

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

УДК 629.4.083

С. М. Овчаренко, В. А. Минаков, В. Р. Ведрученко
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА РЕМОНТА ДИЗЕЛЕЙ ТИПА Д49

Аннотация: *износ деталей цилиндропоршневой группы и кривошипно-шатунного механизма является одной из основных причин постановки дизеля в ремонт. Своевременное обнаружение возникновения интенсивного износа позволяет предупредить негативные последствия, своевременно выполнить ремонт, исключить вероятность непланового выхода локомотива из эксплуатации. В результате исследования интенсивности накопления продуктов износа в моторном масле разработана математическая модель, которая реализуется с применением аппарата искусственных нейронных сетей. Применение данной модели позволяет проводить оперативную оценку технического состояния деталей дизеля безразборным способо и усовершенствовать технологический процесс ремонта дизелей типа Д49.*

Ключевые слова: *дизель, техническое диагностирование, технология ремонта, цилиндровая втулка, локомотив, качество ремонта, искусственная нейронная сеть.*

Sergey M. Ovcharenko, Vitaliy A. Minakov, Victor R. Vedruchenko
Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russian Federation

IMPROVING THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF REPAIR OF DIESELS TYPE D49

Annotation: *Wearing parts of the cylinder-piston group and crank mechanism is one of the main reasons for putting a diesel engine into repair. Timely detection of the occurrence of intense wear allows you to prevent negative consequences, make timely repairs, eliminate the likelihood of unplanned exit of the locomotive from service. As a result of the study of the intensity of accumulation of wear products in engine oil, a mathematical model has been developed, which is implemented with the use of an artificial neural network apparatus. Its use allows to carry out an operational assessment of the technical condition of diesel engine parts in an in-dividing way and to improve the technological process of repairing diesel engines of the D49 type*

Keywords: *diesel, technical diagnostics, repair technology, cylinder liner, locomotive, quality of repair, artificial neural network.*

Тенденции развития российской экономики ставят перед холдингом ОАО «РЖД» задачи, решение которых должно внести положительный вклад в ускорение социально-экономического развития Российской Федерации. Для обеспечения устойчивого развития необходимо достижение целей, поставленных государством перед транспортным комплексом, одной из которых является повышение уровня безопасности транспортной системы. Рыночные отношения актуализируют задачи развития службы сервиса железнодорожного транспорта, повышения эффективности ее работы, снижения трудоемкости производимых работ и повышения качества технического обслуживания (ТО) и ремонта [1].

Наименее надежным узлом тепловоза на протяжении всего периода эксплуатации является дизель. Около 40 % неисправностей связано с неисправным техническим состоянием узлов и деталей дизеля, из которых каждая вторая относится к цилиндропоршневой (ЦПГ) группе и кривошипно-шатунному механизму (КШМ). Объясняется это тем, что детали ЦПГ и КШМ работают при больших динамических и температурных нагрузках [2]. Надежность их работы зависит и от внешних факторов – качества работы систем смазки, систем охлаждения и т. д.

Основными неисправностями деталей ЦПГ и КШМ дизеля являются разрушение и проворот вкладышей, выкрашивание баббитовой заливки, трещины гильз и рубашек охлажде-

ния, задиры и износ цилиндровых гильз, излом и износ поршневых колец. В большинстве случаев причиной неисправностей становится повышенный износ деталей [3, 4].

В настоящее время предлагаются различные методы оценки технического состояния деталей дизеля как при разборе узлов, так и безразборные, основанные на таких диагностических параметрах, как расход масла на угар, изменение расхода масла относительно времени работы двигателя, величина давления масла в системе, параметры теплового поля и др. Данные методы представляют собой комплексную оценку технического состояния деталей дизеля, тогда как в процессе эксплуатации может происходить повышенный износ отдельной группы деталей.

Наиболее применимым методом оценки технического состояния двигателя внутреннего сгорания без его разборки является контроль текущих значений концентрации продуктов износа. В процессе работы дизеля в моторном масле формируется концентрация частичек металла, поступающих с различных трущихся (контактирующих) деталей ЦПГ и КШМ дизеля, что делает моторное масло ценнейшим носителем информации о техническом состоянии дизеля.

В настоящее время оценка технического состояния деталей дизеля по результатам спектрального анализа моторного масла определена ГОСТ 20759-90 «Дизели тепловозов. Техническое диагностирование и прогнозирование остаточного ресурса методом спектрального анализа масла», которая основана на реализации вероятностного алгоритма с установленными пороговыми значениями диагностического коэффициента. К сожалению, на практике вероятностная диагностическая модель сейчас не реализуется.

Для тепловозных дизелей применяют моторные (дизельные) масла марок М-14Г2ЦС и М-14Г2 по ГОСТ 12337-84, М-14Д2У ТУ 38.301-41-181-2002 и М-14Д2СЕ ТУ 0253-007-56194358-2002, М-14ДР ТУ38.401-1063-97, М-14ДШ ТУ 38.401-58-179-97. В процессе эксплуатации тепловоза осуществляется контроль за физико-химическими параметрами моторного масла при периодических отборах проб. Пробы масла в химико-технических лабораториях анализируют на вязкость, температуру вспышки, водородный показатель, щелочное число, диспергирующую способность, массовую долю воды и загрязненность (фотометрическим методом) [5]. В случае подозрения на разжижение топливом, обводнение масла или некачественную работу деталей КШМ и ЦПГ дизеля в процессе эксплуатации пробу отбирают немедленно. Кроме физико-химического анализа проба масла подвергается и спектральному анализу на содержание продуктов износа.

В настоящее время алгоритм оценки состояния дизеля основывается на сравнении концентрации с ее пороговыми значениями. Метод реализуется по результатам сравнения концентрации химических элементов по ГОСТ 20759-90 [6] с граничными значениями, приведенными в таблице 1.

В числителе (К1) – концентрация, соответствующая первому предельному значению, в знаменателе (К2) – второму. При содержании элемента $К \leq К1$ состояние дизеля оценивается как нормальное. При содержании элемента $К > К1$, но $К \leq К2$ состояние дизеля оценивается как неудовлетворительное, а при содержании элемента $К > К2$ – как аварийное.

При оценке неудовлетворительного состояния дизеля проводят поиск неисправности с выводом локомотива из эксплуатации. В случае определения аварийного состояния дизель выводят из эксплуатации и производят его разбор.

Такой подход имеет ряд существенных недостатков, так как в процессе эксплуатации объем моторного масла в системе подвержен существенным изменениям вплоть до полной замены.

Решение задачи снижения затрат на поддержание технического состояния тепловозного дизеля за счет совершенствования технологического процесса ремонта возможно на основе оперативного получения информации о текущем техническом состоянии деталей дизеля.

Таблица 1 – Граничные значения концентрации химических элементов

Оксид элемента, г/т	Тип дизеля и серия тепловоза					
	2Д100, 10Д100	11Д45	14Д40	5Д49	Д50	6310Д
Железо	50/100	50/100	50/100	65/100	100/200	100/200
Медь	25/70	35/70	50/100	50/100	40/60	20/40
Свинец	25/100	15/25	25/100	15/20	40/100	40/100
Алюминий	20/30	20/30	15/10	20/30	25/50	25/50
Олово	5/10	5/10	5/10	5/10	5/10	5/10
Хром	10/15	10/15	5/10	10/15	-	-
Кремний	10/20	10/20	10/20	10/20	10/20	10/20

Для оперативности решения задачи по оценке технического состояния деталей ЦПГ и КШМ на основании результатов контроля текущих значений концентрации продуктов износа в моторном масле разработано программное обеспечение (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018616128, 03.04.2018/23.09.2018. Оценка износа Д49. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения»), позволяющее реализовать решение задачи диагностирования тепловозных дизелей типа Д49 непосредственно в локомотивном депо (рисунок 1). Программное обеспечение разработано на высокоуровневом объектно-ориентированном языке программирования Python 3.6.

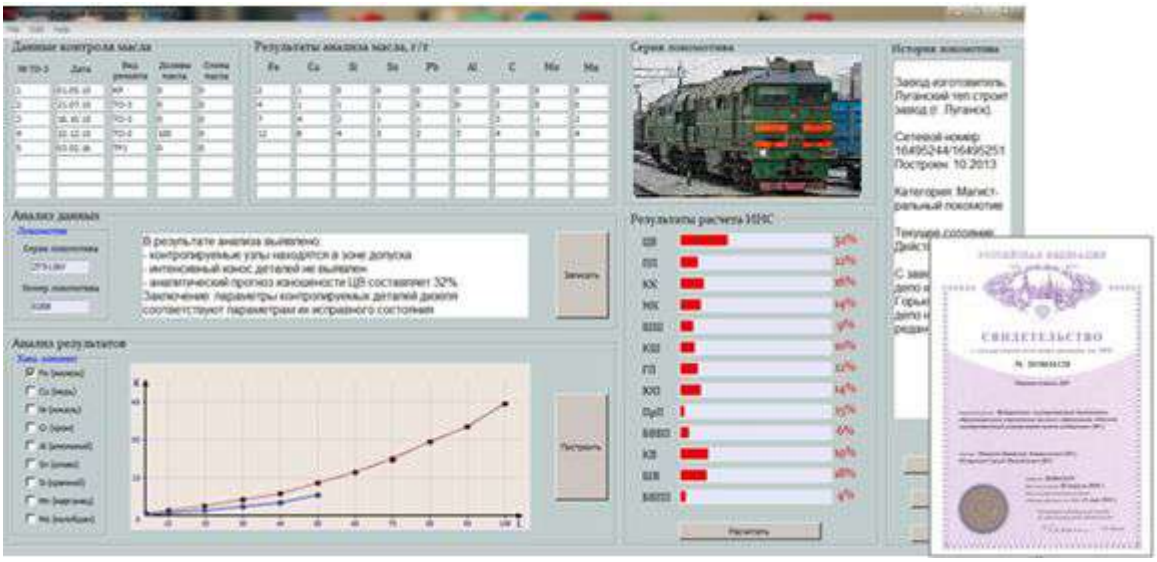


Рисунок 1 – Программное обеспечение по оценке
технического состояния деталей ЦПГ и КШМ

Диагностическая модель, как уже упоминалось ранее, основана на применении математического аппарата искусственных нейронных сетей. Вычисления основаны на расчете выходного значения искусственной нейронной сети (ИНС) для каждого выходного нейрона и производятся в соответствии с выражением [1, 2]:

$$y_m = f\left(\sum_{i=1}^{n}(w_i^2 \cdot f\left(\sum_{i=1}^{n}(w_i^1 \cdot x_i)\right)\right), \quad (1)$$

где w_i^1, w_i^2 – весовые коэффициенты первого и второго слоев нейронной сети соответственно;

x_i – значение входного параметра, соответствующего показателю i-го химического элемента;

f – функция активации скрытого и выходного слоев нейронной сети,

$$f = \frac{1}{1+e^{(-\alpha x_i)}},\ \alpha > 0,\ -\infty < x_i < +\infty, \qquad (2)$$

где α – коэффициент наклона функции.

В качестве исходных данных для обучения ИНС используются текущие значения концентрации контролируемых элементов в моторном масле, наработка дизеля, количество и объем смен и доливов моторного масла.

Технология производства ремонтных работ проводится согласно технолого-нормировочной карте по ремонту дизелей (Руководство по техническому обслуживанию и текущему ремонту тепловозов ТЭ116) на основании Положения о системе технического обслуживания и ремонта локомотивов ОАО «РЖД», утвержденного распоряжением ОАО «РЖД» от 17.01.2005 № 3р. Данный вид работ проводится в соответствии с технологической картой ремонта втулки цилиндра дизеля типа Д49. Предложения по совершенствованию существующей технологии процесса ремонта цилиндровых втулок заключаются в исключении некоторых технологических операций процесса ремонта (рисунок 2) в случае идентификации наличия износа цилиндровых втулок.

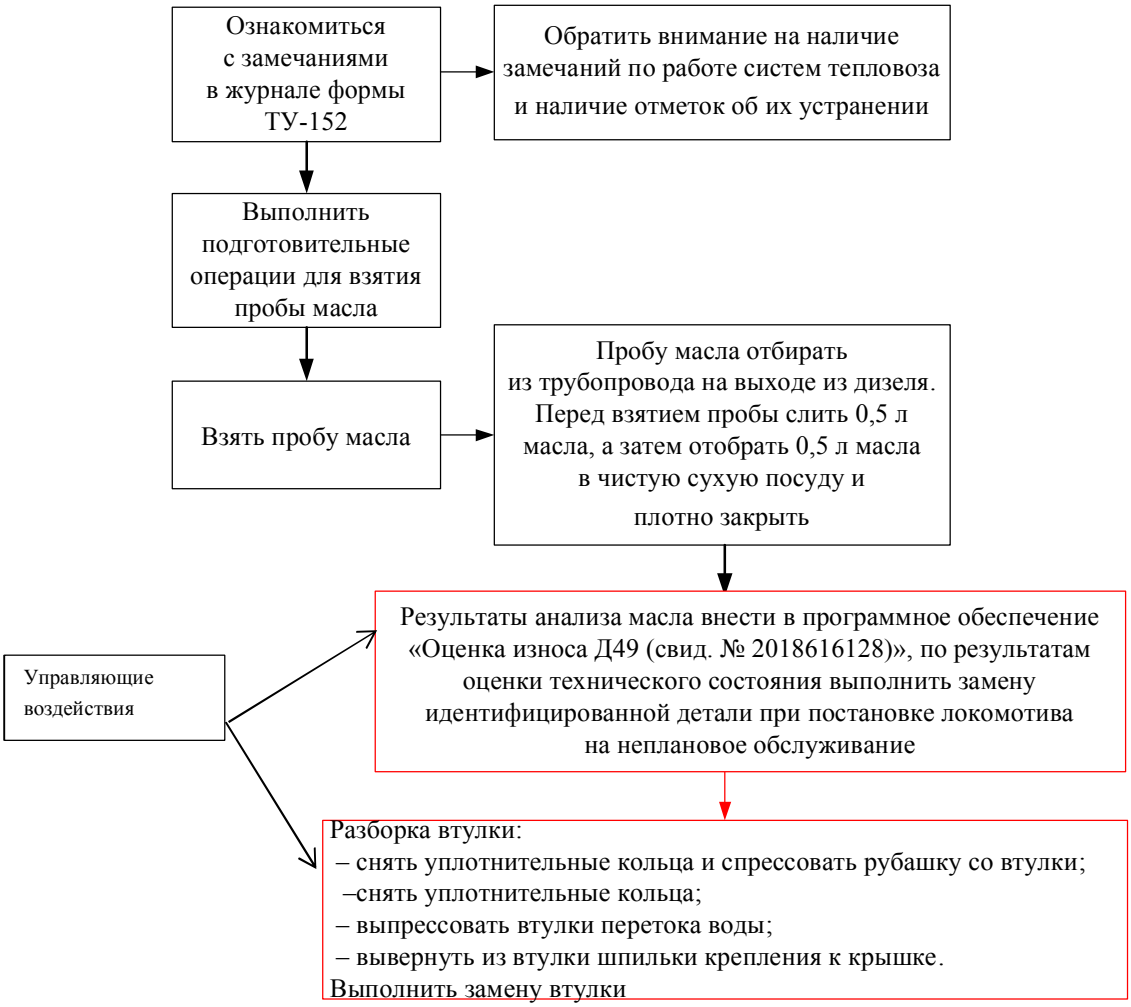


Рисунок 2 – Алгоритм технологических операций

Совершенствование технологии процесса ремонта цилиндровых втулок заключается в изменении процесса ремонта путем исключения операций по контролю, замеру и очистке контролируемой втулки (рисунок 3) в случае идентификации интенсивного износа цилиндровых втулок по результатам спектрального анализа моторного масла.

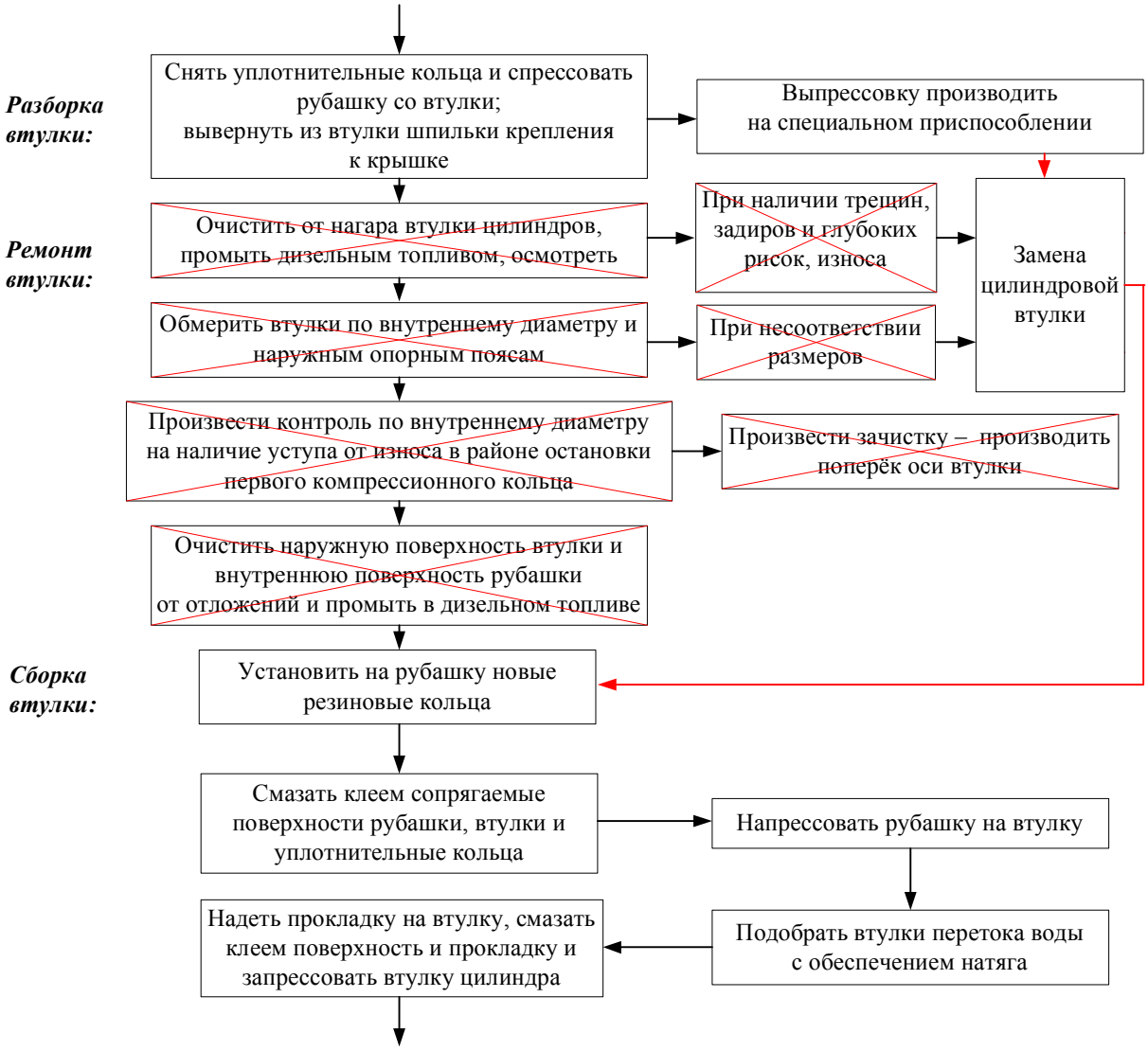


Рисунок 3 – Алгоритм совершенствования технологии ремонта дизеля

Совершенствование технологии процесса ремонта и обслуживания позволяет своевременно определить неисправности, возникающие с преждевременным износом, неудовлетворительным состоянием деталей, и способствует снижению вероятности повреждения других деталей (в случае абразивного износа) и повышению качества ремонта дизеля в эксплуатации.

Список литературы

1. Карикян, А. В. Повышать надежность парка локомотивов [Текст] / А. В. Карикян // Локомотив. – 2006. – № 7. – С. 2, 3.

2. Киселев, В. И. Техническое обслуживание и ремонт локомотивов: Учебник [Текст] / В. И. Киселев. – М.: УМЦ ЖДТ, 2007. – 558 с.

3. Овчаренко, С. М. Моделирование процесса накопления продуктов износа в моторном масле тепловозного дизеля Д49 [Текст] / С. М. Овчаренко, В. А. Минаков // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2014. – № 3(19). – С. 31 – 36.

4. Овчаренко, С. М. Повышение эффективности системы диагностирования тепловозов: дис... докт. техн. наук. [Текст] – Омск, 2007. – 368 с.

5. Курманова, Л. С. Оптимизация системы смазки дизельных двигателей [Текст] / Л. С. Курманова, А. В. Муратов, С. А. Петухов // Железнодорожный транспорт / Российские железные дороги. – М. – 2018. – № 5. – С. 67 – 69.

6. Дизели тепловозов. Техническое диагностирование и прогнозирование остаточного ресурса методом спектрального анализа масла. Общие правила. ГОСТ 20759-90 [Текст]. М.: Изд-во стандартов, 1991. – 26 с.

7. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс [Текст] / С. Хайкин. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.

8. Галушкин, А. И. Нейронные сети: основы теории [Текст] / А. И. Галушкин. – М.: Горячая линия-Телеком, 2010. – 496 с.

9. Малоземов, Н. А. Исследование износа деталей поршневой группы тепловозов в эксплуатации [Текст] / Н. А. Малоземов, А. П. Тихонов // Износ деталей тепловозных двигателей: Сб. науч. тр./ Ростовский ин-т инж. ж.-д. трансп. – Ростов-на-Дону, 1961. – С. 14 – 18.

10. Федорко, П. П. Контроль состояния поршневых колец дизеля во время работы [Текст] / П. П. Федорко, В. В. Филиппов // Сб. науч. тр. / ЦНИИМФ. – М., 1976. – С. 18 – 22.

References

1. Karikyan A. V. To improve the reliability of the locomotive fleet [Povy`shat` nadezhnost` parka lokomotivov]. *Lokomotiv. – The Locomotive*, 2006, no. 7, pp. 2, 3.

2. Kiselev V. I. *Tehnicheskoe obsluzhivanie i remont lokomotivov* (Maintenance and repair of locomotives: a textbook). Moscow: UMTS ZHDT, 2007, 558 p.

3. Ovcharenko S. M., Minakov V. A. Simulation of the process of accumulation of wear in the engine diesel oil D49 [Modelirovanie processa nakoplenija produktov iznosa v motornom masle teplovoznogo dizelja D49]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2014, no. 3 (19), pp. 31 – 36.

4. Ovcharenko S. M. *Povyshenie jeffektivnosti sistemy diagnostiki teplovozov* (Improving the efficiency of the locomotive diagnostic system). Doctor's thesis, Omsk, OSTU, 2007, 368 p.

5. Kurmanova L. S., Muratov A. V., Petukhov S. A. Optimization of the lubrication system of diesel engines [Optimizacija sistemy smazki dizel'nyh dvigatelej]. *Zheleznodorozhny`j transport – Railway Transport*, 2018, no. 5, pp. 67 – 69.

6. *Shum. Dizeli teplovozov. Technicheskoe diagnostirovanie i prognozirovanie ostatochnogo resursa metodom spectralnogo analiza motornogo masla. Obshchie pravila*, *GOST 20759-90* (Noise. Diesel locomotive engines. Technical diagnostics and forecast of service life by means of oil spectral analysis. General requirements, State Standart 20759-90). Moscow, Standarty, 1990, 26 p.

7. Haikin, S. *Nejronnye seti: polnyj kurs* (Neural networks: full course). Moscow: Williams, 2006, 1104 p.

8. Galushkin A. I. *Nejronnye seti: osnovy teorii* (Neural network: basic theory). Moscow: Gorjachaja linija-Telekom, 2010, 496 p.

9. Malozemov N. A., Tikhonov A. P. Study of the wear of piston group parts of diesel locomotives in operation [Issledovanie iznosa detalej porshnevoj gruppy teplovozov v jekspluatacii]. *Tezisy dokladov Mezhdunarodnoi konferentsii «Wear parts for diesel engine »* (Abstracts of the Int. conference « Wear parts for diesel engine»). Rostov-on-Don, 1961, pp. 14 – 18.

10. Fedorko P. P., Filippov V. V. Condition monitoring of piston rings of a diesel engine during operation [Kontrol sostojanija porshnevyh kolec dizelja vo vremja raboty]. Proc. scientific. Tr. CNIIMF. Moscow, 1976, pp. 18 – 22.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Овчаренко Сергей Михайлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Локомотивы», ОмГУПС.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ovcharenko Sergey Michailovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Advanced Doctor of Engineering Sciences, Docent, Head of the department « Locomotives», OSTU.

Минаков Виталий Анатольевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.
Старший преподаватель кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.
Тел.: +7 (3812) 37-60-82.
E-mail: vitalya_13@mail.ru

Ведрученко Виктор Родионович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-06-23.
E-mail: VedruchenkoVR@omgups.ru

Minakov Vitaliy Anatolevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.
Senior lecturer of the department « Locomotives», OSTU.
Phone: +7 (3812) 37-60-82.
E-mail: E-mail: vitalya_13@mail.ru

Vedruchenko Viktor Rodionovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Advanced Doctor Of Engineering Sciences, Professor of the departament «Power system», OSTU.
Phone: (3812) 31-06-23.
E-mail: VedruchenkoVR@omgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Овчаренко, С. М. Совершенствование технологического процесса ремонта дизелей типа Д49 [Текст] / С. М. Овчаренко, В. А. Минаков, В. Р. Ведрученко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 2(38). – С. 2 – 8.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Ovcharenko S. M., Minakov V. A., Vedruchenko V. R. Improving the technological process of repair of diesels type D49 [Sovershenstvovanie tehnologicheskogo processa remonta dizelej tipa D49]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2019, vol. 2, no. 38, pp. 2 – 8 (In Russian).

УДК 629.42

В. А. Михеев, О. С. Томилова, А. В. Бородин
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

ПРЕДИКТИВНЫЙ РЕМОНТ ТЯГОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА БАЗЕ БОРТОВЫХ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Аннотация. *Современным решением задачи повышения эффективности функционирования процессов технического обслуживания и ремонта тягового подвижного состава на основе использования новых информационных технологий является переход к перспективной системе предиктивного ремонта локомотивов. Ключевым звеном системы предиктивного ремонта в вопросе оперативной оценки и управления техническим состоянием локомотивов являются бортовые микропроцессорные системы управления (МСУ) со встроенными подсистемами диагностики, контроля и мониторинга. МСУ имеют возможность осуществлять непрерывное или дискретное измерение, регистрацию, передачу и накопление значений достаточно большого пакета аналоговых и дискретных параметров работы всего перечня локомотивного оборудования. Функциональные возможности МСУ на базе информационных технологий делают их исключительно эффективным средством оперативной организации обслуживающих и ремонтных воздействий на локомотивный парк с целью обеспечения заданных показателей эксплуатационной надежности и производительности.*

Ключевые слова: *локомотив, предиктивный ремонт, бортовые микропроцессорные системы управления.*

Vladislav A. Mikheev, Olga S. Tomilova, Anatoliy V. Borodin
Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

PREDICTIVE REPAIR OF THE TRACTION ROLLING STOCK BASED ON ONBOARD MICROPROCESSOR CONTROL SYSTEMS

Abstract. *A modern solution to the problem of improving the efficiency of the traction rolling stock maintenance and repair processes based on the use of new information technologies is the transition to a locomotives predictive re-*

pair promising system. The key element of the predictive repair system in the issue of operational assessment and management of the locomotives technical condition are onboard microprocessor control systems with built-in diagnostic, monitoring and monitoring subsystems. The onboard microprocessor control systems have the ability to carry out continuous or discrete measurement, registration, transmission and accumulation the values of large package analog and discrete locomotive equipment parameters. The functionality of the onboard microprocessor control systems based on information technologies makes them an exceptionally effective means of efficiently organizing maintenance and repair impacts on the locomotive park in order to ensure specified operational reliability and performance indicators.

Keywords: *locomotive, predictive repair, onboard microprocessor control systems.*

В утвержденной «Стратегии развития информационного общества РФ на 2017 – 2030 годы» основная роль отводится созданию и развитию цифровой экономики, т. е. хозяйственной деятельности, в которой ключевым фактором производства являются информационные технологии [1]. Задача организации производства на базе современных информационных технологий в полной мере касается и железнодорожного транспорта [2].

Локомотивный комплекс является вторым по затратам хозяйством ОАО «РЖД» после инфраструктуры. В значительной части, которая составляет вплоть до трети всех эксплуатационных расходов на тягу, это расходы на техническое обслуживание и ремонт подвижного состава. Проблемными вопросами здесь встают преобладание отстающих производственных технологий ремонтного комплекса и отсутствие необходимого и достаточного контроля фактического технического состояния локомотивного парка [3].

Повышение эффективности функционирования процессов технического обслуживания и ремонта тягового подвижного состава на основе использования новых информационных технологий и экспертных систем поддержки принятия решений позволит достичь требуемых показателей эксплуатационной надежности и производительности локомотивов, обеспечив при этом сокращение затрат на выполнение обслуживающих и ремонтных воздействий. Современным решением данной задачи является переход к перспективной системе предиктивного ремонта тягового подвижного состава [3 – 5].

Предиктивный ремонт – это ремонт выявленных предотказных состояний и прогнозирование их появления по наличию трендов параметров контроля и диагностирования [3 – 5]. Главный эффект от такого ремонта заключается в сокращении дорогих неплановых ремонтов и отказов локомотивов в эксплуатации, а следовательно, и простоев. Очевидно, что успех в области предиктивного ремонта невозможен без существенного развития бортовых измерительных систем с применением эффективных информационных технологий [3 – 5].

В настоящее время все серийно выпускаемые локомотивы оборудуются бортовыми микропроцессорными системами управления, а большинство локомотивов старых серий модернизируются ими. МСУ имеют два ключевых свойства, важных для организации предиктивного ремонта: во-первых, комплекты штатных датчиков, расходомеров, сенсоров и приборов контроля, во-вторых, средства считывания, хранения, обработки и передачи получаемой информации [6, 7]. Все это дает возможность осуществлять непрерывное или дискретное измерение и регистрацию значений большого массива аналоговых и дискретных параметров работы оборудования (рисунок 1). Отслеживаемые на современных локомотивах параметры могут передаваться в режиме реального времени в диспетчерский центр, что позволяет сервисным компаниям организовывать мониторинг технического состояния подвижных единиц, осуществлять оперативное планирование работ по устранению выявленных неисправностей, а также по их предотвращению [3 – 5].

Актуален вопрос использования контрольных и диагностических данных бортовых МСУ для организации системы предиктивного ремонта. Система предиктивного ремонта – это система обслуживания по фактическому техническому состоянию, при которой непрерывно или периодически контролируются параметры систем и оборудования локомотивов, на основе чего для каждой конкретной тяговой единицы формируется соответствующий комплекс обслуживающих или ремонтных воздействий различного уровня и объема [3 – 5]. МСУ сохраняет данные, полученные в процессе мониторинга, что позволяет применять прогрессив-

ные методы контроля технического состояния и анализировать данные в реальном масштабе времени. В зависимости от полученных результатов составляется прогноз технического состояния оборудования и формируются программы технического обслуживания и ремонта [6, 7]. При реализации данного подхода вероятность отказов систем и оборудования локомотивов должна сводиться к минимуму.

Рисунок 1 – Обобщенные возможности МСУ по контролю параметров работы локомотивов

Согласно составленной схеме (рисунок 2) МСУ в системе предиктивного ремонта имеет следующие конкретные задачи: сбор пакета данных со средств измерения, получаемых как от эксплуатационных воздействий на локомотив, так и от тестовых воздействий (инициируемых самой МСУ) на его оборудование и системы; выполнение оперативного мониторинга состояния и режимов эксплуатации локомотива как тяговой единицы; осуществление функций непрерывного или дискретного контроля и диагностирования технического состояния; накопление соответствующей статистической базы данных, в том числе и по эксплуатационным отказам.

Подсистемы накопителей диагностики и мониторинга являются подсистемами верхнего уровня, их задачей является объединение информации из предыдущих подсистем, вплоть до ведения электронного паспорта каждого локомотива.

Таким образом, бортовая МСУ, во-первых, фиксирует фактически выполненный локомотивом объем работ и нарушения режимов эксплуатации, а во-вторых, что самое главное, определяет фактическое техническое состояние локомотива как набора совокупности параметров и их трендов, характеризующих правильность функционирования оборудования и работоспособность локомотива, исправность узлов и оборудования.

На следующем этапе по данным о выполненной локомотивом работе, его техническому состоянию определяется дата постановки локомотива на техническое обслуживание или ре-

монт. Ресурсы для выполнения ремонта формируются по данным об объеме выполненной работы и данным о фактическом состоянии локомотива. На основании потребных ресурсов организуется материально-техническое обеспечение обслуживающих и ремонтных воздействий.

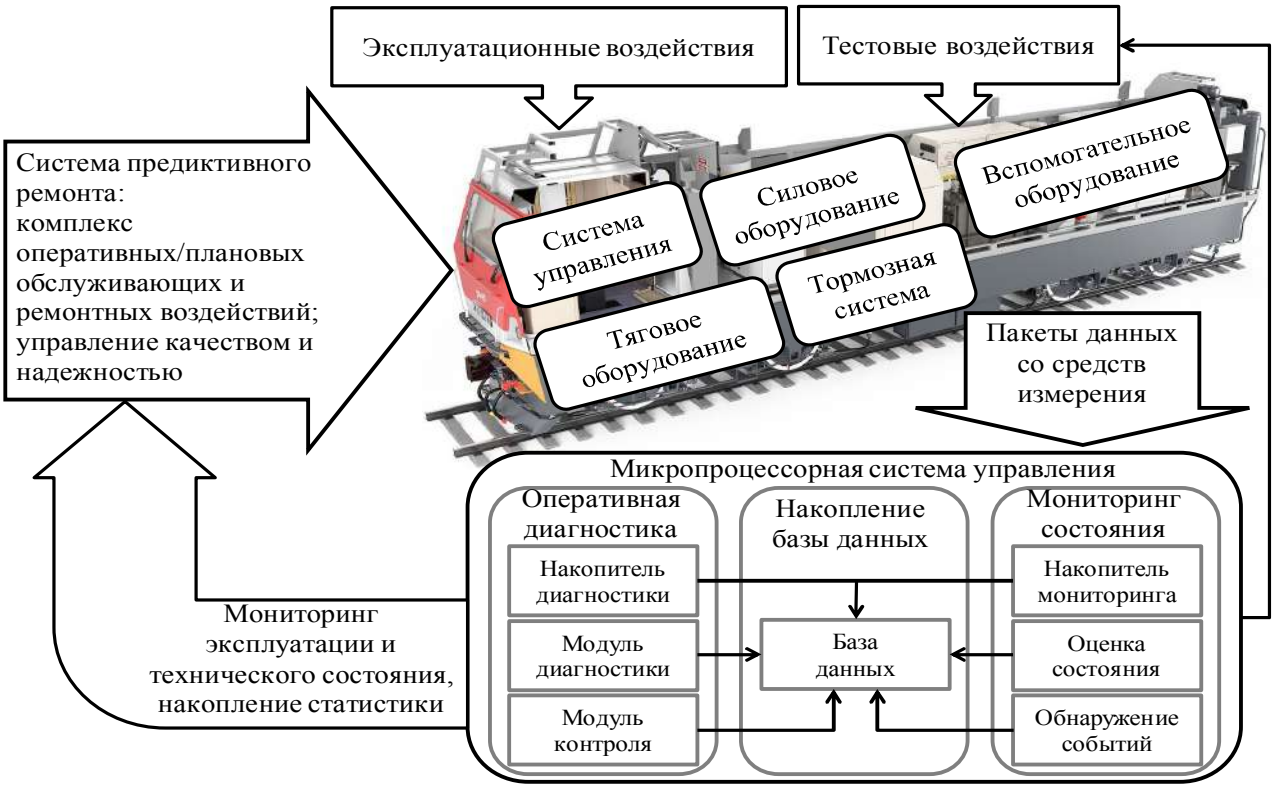


Рисунок 2 – МСУ в системе предиктивного ремонта тягового подвижного состава

По оценкам ряда экспертов в настоящее время штатные МСУ могут дать всего порядка 30 – 40 % информации о техническом состоянии локомотивов, а вот при их аппаратном дооснащении и соответствующем программном обеспечении – вплоть до 80 – 90 % [3 – 5]. Поэтому применяемые классические методы контроля и диагностики необходимо дорабатывать элементами современных вычислений, в том числе элементами нечеткой логики, векторным и регрессионным моделированием во времени. Только такая система будет способна отслеживать большие объемы быстро меняющейся информации, принимать нужные и своевременные решения по управлению и диагностике локомотивов.

Сформируем математическую модель работы МСУ в системе предиктивного ремонта.

В процессе эксплуатации МСУ постоянно или периодически определяют комплексные показатели технического состояния T, а также режима эксплуатации и объема работы локомотива R. Показатель T определяется как пакет данных значений параметров, характеризующих функционирование всего комплекса локомотивного оборудования, B. Показатель R определяется пробегом, тонно-километровой работой, расходом топлива или электроэнергии A, а также наличием и количеством нарушений режимов эксплуатации S. Локомотив рассматривается как неизолированная открытая техническая система.

Математически данные показатели представляются векторной моделью функциональных отношений между переменными состояниями и режимами локомотива, управляющими эксплуатационными и тестовыми воздействиями во времени:

$$\begin{cases} \overline{T_i}(t) = \left[\overline{B_i}(t), \overline{X_i}(t), \overline{Y_i}(t), \overline{Z_i}(t) \right]; \\ \overline{R_i}(t) = \left[\overline{A_i}(t), \overline{S_i}(t), \overline{Y_i}(t), \overline{Z_i}(t) \right], \end{cases} \quad (1)$$

где $\overline{B_i}(t)$, $\overline{A_i}(t)$, $\overline{S_i}(t)$, $\overline{X_i}(t)$, $\overline{Y_i}(t)$, $\overline{Z_i}(t)$ – векторы параметров объема, режимов работы, тестовых и эксплуатационных воздействий, наблюдений соответственно.

Техническое состояние локомотива определяется значениями координат вектора параметров:

$$\overline{B_i}(t) = \left[B_1, B_2, ..., B_n \right], \quad (2)$$

где n – размерность вектора, характеризующая объем контроля.

Работоспособное состояние T аппроксимируется n-мерным многогранником $\overline{T_{1...n}}$, грани которого соответствуют допускам $\left[a_{1...n}; b_{1...n} \right]$ параметров $B_{1...n}$ [8].

Для каждого контролируемого параметра B_i по границам допустимых значений $\left[a_i; b_i \right]$ определяется принадлежность к термам [9]:

соответствия

$$\mu_{B_i} = \begin{cases} 1, a_i \le B_i \le b_i; \\ 1 - 2\left(\dfrac{B_i - a_i}{b_i - a_i} \right)^2, a_i < B_i \le \dfrac{a_i + b_i}{2}; \\ 2\left(\dfrac{b_i - B_i}{b_i - a_i} \right)^2, \dfrac{a_i + b_i}{2} < B_i < b_i; \\ 0, a_i > B_i, b_i < B_i \end{cases} \quad (3)$$

и несоответствия

$$\overline{\mu}_{B_i} = \begin{cases} 1, a_i < B_i > b_i, a_i > B_i < b_i; \\ 2\left(\dfrac{B_i - a_i}{b_i - a_i} \right)^2, a_i < B_i \le \dfrac{a_i + b_i}{2}; \\ 1 - 2\left(\dfrac{b_i - B_i}{b_i - a_i} \right)^2, \dfrac{a_i + b_i}{2} < B_i < b_i; \\ 0, a_i \le B_i \le b_i. \end{cases} \quad (4)$$

Векторы объема $\overline{A_i}(t)$ и режима $\overline{S_i}(t)$ работы, а также тестовых $\overline{X_i}(t)$ и эксплуатационных $\overline{Y_i}(t)$ воздействий описываются аналогично выражению (2) соответствующими комплексными векторами параметров и показателей.

Вектор наблюдений является суммарным вектором трех составляющих [10, 11]:

$$\overline{Z_i}(t) = \overline{N_i}(t) + \overline{G_i}(t) + \overline{\varphi_i}(t), \quad (5)$$

где $\overline{N_i}(t)$, $\overline{G_i}(t)$, $\overline{\varphi_i}(t)$ – векторы функции тренда, гармонической составляющей и случайной функции с элементами регулярности соответственно.

Вектор трендовой составляющей $\overline{N_i}(t)$ выделяется в виде зависимостей системы временных рядов [10], гармоническая составляющая $\overline{G_i}(t)$ представляется авторегрессионной моделью, а вектор функции регулярности $\overline{\varphi_i}(t)$ – моделью скользящего среднего [11].

Начальными условиями определения вектор-функции (1) являются постоянные параметры системы, что позволяет в дальнейшем однозначно аналитически описать линию траектории поведения системы:

$$\begin{cases} \overline{T_{\text{н}}}(0 \le t \le t_i) = \left[\overline{B_{\text{const}}}(0 \le t \le t_i), \overline{X_{\text{const}}}(0 \le t \le t_i), \overline{Y_{\text{const}}}(0 \le t \le t_i), \overline{Z_{\text{const}}}(0 \le t \le t_i) \right]; \\ \overline{R_{\text{н}}}(0 \le t \le t_i) = \left[\overline{A_{\text{const}}}(0 \le t \le t_i), \overline{S_{\text{const}}}(0 \le t \le t_i), \overline{Y_{\text{const}}}(0 \le t \le t_i), \overline{Z_{\text{const}}}(0 \le t \le t_i) \right]. \end{cases} \quad (6)$$

Граничные условия вектор-функции (1) задаются координатами переменных факторов системы в предположении того, что предельное состояние локомотива совпадает с его отказом и фактический ресурс является случайной величиной:

$$\begin{cases} \left. \dfrac{d\overline{T_i}(t,\lambda(t)), \overline{R_i}(t,\lambda(t))}{dt} \right|_{\substack{0 \le t \le t_i \\ 0 \le \lambda \le \lambda_i}} = \dfrac{d\lambda(t)Q(t)}{\left(1-Q(t)\right)dt}; \\ \left. \dfrac{d\overline{T_i}(t,\lambda(t)), \overline{R_i}(t,\lambda(t))}{dt} \right|_{\substack{t_i < t \\ \lambda_i < \lambda < 1}} = \dfrac{d\lambda(t)\left(1-Q(t)\right)}{Q(t)dt}, \end{cases} \quad (7)$$

где $\lambda(t)$ – интенсивность отказа;

$Q(t)$ – нормальный закон распределения времени до отказа.

По полученным значениям показателей *T* и *R* определяется дата постановки конкретного локомотива на техническое обслуживание заданного объема или дата вывода его из эксплуатации с целью выполнения требуемого вида ремонта:

$$D_i = F\left(\overline{T_i}(t), \overline{R_i}(t)\right); \quad (8)$$

для группы локомотивов образуется соответствующий график-матрица:

$$D^{\Sigma}_{m \times k} = \begin{vmatrix} D_1 & \dots & D_m \\ \dots & \dots & \dots \\ D_i & \dots & D_k \end{vmatrix}. \quad (9)$$

Таким образом, можно заключить, что предлагаемая модель системы предиктивного ремонта с определяющей ролью в ней бортовых МСУ направлена на повышение эксплуатационной эффективности и надежности локомотивов за счет предсказания времени и места вероятного возникновения неполадок и их оперативного устранения, что позволит максимально минимизировать аварийные ситуации и избежать незапланированных простоев тяговых ресурсов.

Список литературы

1. Указ Президента РФ от 09.05.2017 № 203 «О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017 – 2030 годы» [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.kremlin.ru/acts/bank/41919 (Дата обращения: 02.08.2019).

2. Розенберг, Е. Н. Цифровая экономика и цифровая железная дорога [Текст] / Е. Н. Розенберг, В. И. Уманский, Ю. В. Дзюба // Транспорт Российской Федерации / Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – СПб. – 2017. – № 5(72). – С. 45 – 50.

3. Аболмасов, А. А. Перспективы предиктивного ремонта [Текст] / А. А. Аболмасов, И. И. Лакин, А. И. Баранов // Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов: Материалы междунар. науч.-практ. конф. / Российский университет транспорта (МИИТ). – М., 2018. – С. 87 – 93.

4. Губарев, П. В. Применение дистанционной диагностики на тяговом подвижном составе [Текст] / П. В. Губарев, Н. Р. Тептиков, А. С. Шапшал // Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов: Материалы междунар. науч.-практ. конф. / Российский университет транспорта (МИИТ). – М., 2018. – С. 160 – 163.

5. Автоматизированное управление жизненным циклом локомотивов на этапе их эксплуатации [Текст] / И. К. Лакин, А. А. Аболмасов и др. // Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов: Материалы междунар. науч.-практ. конф. / Российский университет транспорта (МИИТ). – М., 2018. – С. 214 – 233.

6. Михеев, В. А. Оперативная оценка технического состояния топливной системы энергетической установки тепловоза [Текст] / В. А. Михеев, П. Б. Сергеев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 1(25). – С. 41 – 48.

7. Михеев, В. А. Оперативная оценка технического состояния подсистем дизельной энергетической установки [Текст] / В. А. Михеев, О. С. Томилова // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава: Материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2017. – С. 18 – 25.

8. Крохин, Г. Д. Источники информации и причины ее неопределенности, выявленные при диагностике состояния энергоустановок [Текст] / Г. Д. Крохин // Вестник НГУЭУ / Новосибирский гос. ун-т экономики и управления. – Новосибирск. – 2014. – № 1. – С. 292 – 311.

9. Кувайскова, Ю. Е. Прогнозирование состояние технического объекта на основе нечеткого логического вывода [Текст] / Ю. Е. Кувайскова, К. А. Федорова // Вестник УГТУ / Ульяновский гос. техн. ун-т. – Ульяновск. – 2016. – № 1 (9). – С. 183 – 188.

10. Кувайскова, Ю. Е. Трендовая модель системы временных рядов [Текст] / Ю. Е. Кувайскова, Д. А. Жуков // Вестник УГТУ / Ульяновский гос. техн. ун-т. – Ульяновск. – 2015. – № 2 (70). – С. 10 – 13.

11. Валеев, С. Г. Смешанные процессы авторегрессии и скользящего среднего для обработки временных рядов [Текст] / С. Г. Валеев, Ю. Е. Кувайскова // Вестник УГТУ / Ульяновский гос. техн. ун-т. – Ульяновск. – 2006. – № 4 (36). – С. 37 – 41.

References

1. *Ukaz Prezidenta RF ot 09.05.2017 № 203 «O Strategii razvitiya informacionnogo obshchestva v Rossijskoj Federacii na 2017 – 2030 gody»* (Decree of the Russian President of 09.05.2017 No. 203 «About the Development strategy of information society in the Russian Federation for 2017 – 2030»). ConsultantPlus.

2. Rosenberg E. N., Umansky V. I., Dzyuba Yu. V. Digital economy and digital railroad [Cifrovaya ehkonomika i cifrovaya zheleznaya doroga]. *Transport Rossijskoj Federacii – Transport of the Russian Federation*, 2017, no. 5 (72), pp. 45 – 50.

3. Abolmasov A. A., Lakin I. I., Baranov A. I. Prospects of predictive repair [Perspektivy prediktivnogo remonta]. *Materialy III mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Perspektivy*

razvitiya servisnogo obsluzhivaniya lokomotivov» (Materials of the III international scientific and practical conference «Prospects of development of service of locomotives»). – Moscow, 2018, pp. 87 – 93.

4. Gubarev P. V., Teptikov N. R., Shapshal A. S. Application of remote preliminary treatment on the traction rolling stock [Primenenie distancionnoj diagnostiki na tyagovom podvizhnom sostave]. *Materialy III mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Perspektivy razvitiya servisnogo obsluzhivaniya lokomotivov»* (Materials of the III international scientific and practical conference «Prospects of development of service of locomotives»). – Moscow, 2018, pp. 160 – 163.

5. Lakin I. K., Abolmasov A. A., Lakin I. I., Baranov A. I. Automated management of life cycle of locomotives at stage of their operation [Avtomatizirovannoe upravlenie zhiznennym ciklom lokomotivov na ehtape ih ehkspluatacii]. *Materialy III mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Perspektivy razvitiya servisnogo obsluzhivaniya lokomotivov»* (Materials of the III international scientific and practical conference «Prospects of development of service of locomotives»). – Moscow, 2018, pp. 214 – 233.

6. Mikheyev V. A., Sergeyev P. B. Operational assessment of technical condition of fuel system of the power station of locomotive [Operativnaya ocenka tekhnicheskogo sostoyaniya toplivnoj sistemy ehnergeticheskoj ustanovki teplovoza]. *Izvestiya Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2016, no. 1 (25), pp. 41 – 48.

7. Mikheyev V. A., Tomilova O. S. Operational assessment of technical condition of subsystems of the diesel power station [Operativnaya ocenka tekhnicheskogo sostoyaniya podsistem dizel'noj ehnergeticheskoj ustanovki]. *Materialy IV vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem «Tekhnologicheskoe obespechenie remonta i povyshenie dinamicheskih kachestv zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava»* (Materials of the IV Russian scientific and technical conference with the international participation « Technological support of repair and increase in dynamic qualities of the rolling stock »). – Omsk, 2017, pp. 18 – 25.

8. Krokhin G. D. Sources of information and the reasons of its uncertainty established at preliminary treatment of condition of power stations [Istochniki informacii i prichiny ee neopredelennosti, vyyavlennye pri diagnostike sostoyaniya ehnergoustanovok]. *Vestnik Novosibirskij universiteta ehkonomiki i upravleniya – The journal of the Novosibirsk State Economy and Steering University*, 2014, no. 1, pp. 292 – 311.

9. Kuvayskova Yu. E., Fedorova K. A. Forecasting condition of technical object on the basis of indistinct logical conclusion [Prognozirovanie sostoyanie tekhnicheskogo ob"ekta na osnove nechetkogo logicheskogo vyvoda]. *Vestnik Ul'yanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – The journal of the Ulyanovsk State Technical University*, 2016, no. 1 (9), pp. 183 – 188.

10. Kuvayskova Yu. E., Zhukov D. A. Trend model of system of temporary ranks [Trendovaya model' sistemy vremennyh ryadov]. *Vestnik Ul'yanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – The journal of the Ulyanovsk State Technical University*, 2015, no. 2 (70), pp. 10 – 13.

11. Valeev S. G., Kuzvayskova Yu. E.The commixed processes of autoregression and moving average for processing of temporary ranks [Smeshannye processy avtoregressii i skol'zyashchego srednego dlya obrabotki vremennyh ryadov]. *Vestnik Ul'yanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – The journal of the Ulyanovsk State Technical University*, 2006, no. 4 (36), pp. 37 – 41.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Михеев Владислав Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mikheyev Vladislav Aleksandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D. of Engineering Sciences, assistant professor of the department «Cars and carriage economy», OSTU.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ОмГУПС.
E-mail: Micheev_V_A@mail.ru

Томилова Ольга Сергеевна
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ОмГУПС.
E-mail: Motovilova@yandex.ru

Бородин Анатолий Васильевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.
Доктор технических наук, профессор

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Михеев, В. А. Предиктивный ремонт тягового подвижного состава на базе бортовых микропроцессорных систем управления [Текст] / В. А. Михеев, О. С. Томилова, А. В. Бородин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – № 2(38). – С. 8 – 16.

E-mail: Micheev_V_A@mail.ru

Tomilova Olga Sergeyevna
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the department «Cars and carriage economy», OSTU.
E-mail: Motovilova@yandex.ru

Borodin Anatoly Vasilievich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Advanced Doctor Of Engineering Sciences, Professor

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Mikheeev V. A., Tomilova O. S, Borodin A. V. Predictive repair of the traction rolling stock based on onboard microprocessor control systems. Journal of Transsib Railway Studies, vol. 2, no. 38, pp. 8 – 16 (In Russian).

УДК 625.03

Е. П. Капустина[1], Е. Г. Леоненко[2]
[1]Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация;
[2]Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения (КрИЖТ, ИрГУПС), г. Красноярск, Российская Федерация

ВЛИЯНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ИХ ОТКЛОНЕНИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ПОРОЖНЕГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Аннотация. *На основании анализа сходов порожнего подвижного состава на Красноярской и Восточно-Сибирской железных дорогах определены технические параметры, которые оказывают существенное влияние на разгрузку колеса первой по ходу движения колесной пары. Рассмотрены конструкционные особенности вагонов, оказывающие влияние на коэффициент безопасности движения поездов. Статистическая обработка данных сходов согласно материалам служебных расследований позволила выявить ряд интересных особенностей. Одна из них – это ненормированные суммарные зазоры в скользунах по диагоналям вагона. Данный факт при движении порожнего вагона вызывает перекос кузова, что в свою очередь приводит к перераспределению нагрузок, действующих на рессорные комплекты по сторонам тележек вагона. Рассмотрено влияние параметров упругого подвешивания (высота, излом пружин) на перераспределение нагрузок, действующих на стороны тележки. Перекос кузова порожних вагонов, особенно вагонов с достаточно небольшой массой необрессоренных частей и высоким центром тяжести, приводит к значительному уменьшению коэффициента устойчивости против вкатывания гребня колеса на головку рельса. Произведен расчет поперечных направляющих усилий, действующих в точке контакта колеса и рельса, рассмотрено также их влияние на разгрузку колеса. Установлено, что перекос кузова приводит к существенному возрастанию бокового усилия, влияющего на устойчивость движения порожнего подвижного состава.*

Ключевые слова: *безопасность движения поездов, вагон, сход, запас устойчивости, перекос кузова.*

Elena P. Kapustina[1], Elena G. Leonenko[2]
[1]Russian Transport University (RUT), г. Moscow, the Russian Federation;
[2]Krasnoyarsk Institute of Railway Transport - a branch of the Irkutsk State University of Communications (CIRT ISUC), Krasnoyarsk, the Russian Federation

INFLUENCE OF TECHNICAL CHARACTERISTICS AND THEIR DEFINITIONS ON THE STABILITY OF THE MOVEMENT OF EMPTY ROLLING STOCK

Abstract. *Based on the analysis of the empty rolling stock on the Krasnoyarsk and East Siberian Railways, the technical parameters that have a significant impact on the unloading of the wheel of the first wheel pair in the course of movement are determined. The design features of wagons influencing the safety coefficient of train traffic are considered. Statistical processing of these gatherings, according to the materials of official investigations, revealed a number of interesting features. One of them is non-normalized total gaps in the sliders along the diagonals of the wagons. This fact in the movement of empty car causes misalignment of the body, which in turn leads to a redistribution of the loads acting on the spring kits on the sides of carts and wagons. The influence of elastic suspension parameters (height, spring break) on the redistribution of loads acting on the sides of the trolley is considered. The misalignment of the body of empty wagons, especially wagons with a sufficiently small mass of unsprung parts and a high center of gravity, leads to a significant reduction in the safety factor. The calculation of the transverse guiding forces acting at the point of contact of the wheel and rail, as well as their effect on the unloading of the wheel. It is revealed that the body skew leads to a significant increase in lateral force, which affects the stability of the empty rolling stock.*

Keywords: *train traffic safety, wagon, derailment, stability factor, misalignment of the body.*

Анализ работы подвижного состава на Красноярской и Восточно-Сибирской железных дорогах по результатам наблюдений в течение последних 20 лет позволил установить, что сходам, как правило, подвержены порожние грузовые вагоны и цистерны, т. е. подвижной состав с высоким центром тяжести, короткой базой и жестким кузовом [2, 6]. Особенность конструкции таких экипажей состоит в том, что они оснащены трехэлементными двухосными тележками, в которых колесные пары через буксы связаны между собой боковыми рамами с левой и правой сторон вагона для передачи усилий тяги и торможения, а также рамных сил, возникающих при движении [9].

Вертикальные силы передаются через рессорные комплекты пружин, установленных между боковыми рамами и надрессорными балками [1].

При движении в кривой колесная пара подвергается действию поперечных сил со стороны рельсовой колеи, боковых рам тележки и сил сопротивления движению в контакте колес и рельсов [4, 5].

В эксплуатации отклонения диаметров колес по кругам катания одной колесной пары, колес тележки и колесных пар вагона, как правило, отличаются от номинальных значений. На процесс движения вагона существенно влияют различие упругих характеристик пружинных комплектов и разброс значений зазоров в скользунах и в буксовых проемах. Наиболее существенную роль играют изменения зазоров по диагонали вагонной рамы из-за наличия короткой базы и большой предрасположенности кузова к перекосам.

Интенсивная эксплуатация вагонов приводит к изнашиванию узлов трения – контактирующих между собой поверхностей узла «пятник – подпятник», наклонных поверхностей карманов надрессорной балки, фрикционных клиньев и фрикционных планок. При этом достаточно часто возникает замыкание регламентированных зазоров в скользунах. В результате увеличивается сопротивление повороту тележки в процессе движения, ухудшаются условия динамического взаимодействия пути и подвижного состава [7, 10]. Допустимое суммарное значение зазоров в скользунах одной тележки должно составлять 4 – 14 мм. При этом значение зазора между скользунами одной стороны и по диагоналям вагона не контролируется, а предельные значения этих величин не установлены. Как правило, эти отклонения превышают допустимые инструкцией значения.

По результатам замеров параметров сошедших вагонов установлено, что в большинстве случаев схода внутрь кривой зазоры в скользунах, ограничивающие наклон кузова вагона по диагоналям, существенно отличаются друг от друга. Их разность при этом достигает 10 – 11 мм.

Таким образом, процесс движения вагонов сопровождается отклонением кузова наружу или внутрь кривой в зависимости от направления движения. При этом возникает ситуация кососимметричного нагружения вагона (рисунок 1). В итоге в левых по ходу кривых кузов в том месте, где расположен скользун с большим зазором, наклоняется свободно, не нагружая пружины подвешивания. В то же время там, где располагается скользун с минимальным зазором, практически сразу нагружаются и сжимаются пружины упругого подвешивания тележки. Степень сжатия пружин в конечном итоге зависит от степени кривизны пути. В любом случае при этом разгружаются колесные пары первой по ходу тележки и нагружаются колесные пары второй по ходу тележки на $\Delta R_{\text{компл}}$.

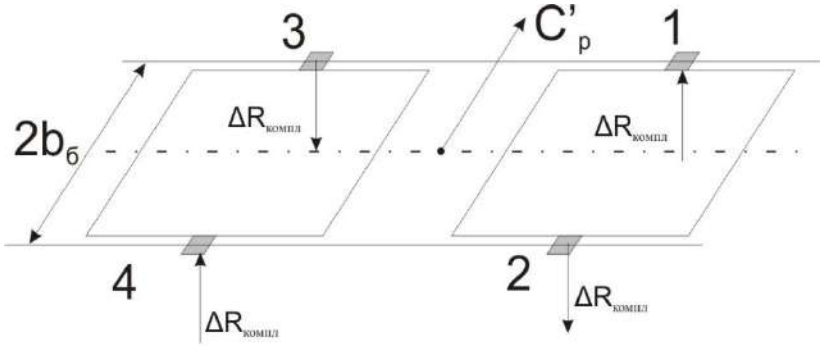


Рисунок 1 – Схема действия сил при кососимметричном нагружении вагона

Практически во всех случаях схода порожнего подвижного состава на Красноярской и Восточно-Сибирской железных дорогах по пути следования поезда на участках длиной 80 – 100 км располагалось от 88 до 115 кривых радиусом от 300 до 1300 м, из них половина – левосторонние. Таким образом, в течение часа первая по ходу тележка приблизительно 44 – 55 раз подвергалась разгрузке, а вторая – дополнительной нагрузке. Значение дополнительного сжатия комплекта пружин второй по ходу тележки зависит не только от скорости движения и радиуса кривой, но и от разницы упругих характеристик комплектов пружин. Различная высота пружин в комплекте приводит к уменьшению жесткости всего комплекта по сравнению с расчетной и, следовательно, к уменьшению силы упругой отдачи. Аналогичный результат возникает при изломе одной или нескольких пружин в комплектах упругого подвешивания.

Кроме того, наличие зазоров в скользунах изменяет значения сил, действующих на комплекты рессорного подвешивания (рисунок 2). Чем больше зазор, тем больше сила упругой отдачи в точке подвешивания, что приводит к разгрузке одной стороны и дополнительной нагрузке второй стороны тележки. При наличии зазоров в скользунах более 7 мм, как правило, происходит излом одной или нескольких внутренних пружин, так как напряжение в них превышает допустимые значения.

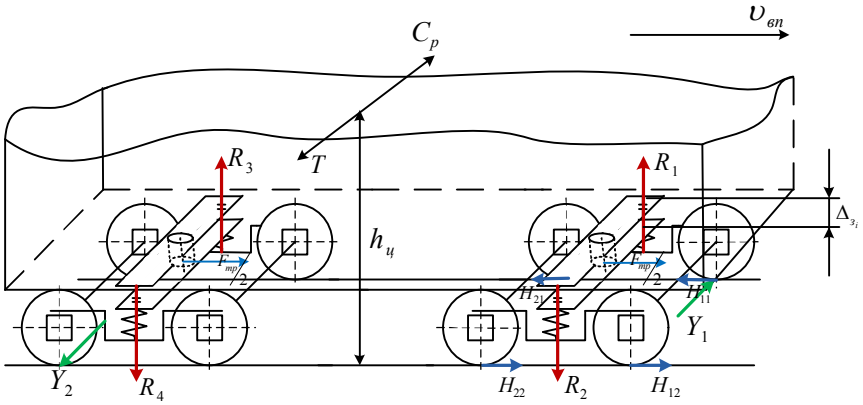


Рисунок 2 – Схема сил, действующих на грузовой вагон, с учетом перекоса кузова из-за наличия избыточных зазоров в скользунах

На рисунке 2 приняты следующие обозначения: R_i – суммарная реакция упругого подвешивания от действия всех приложенных сил; Y_i – направляющее усилие, действующее на первую и последнюю колесную пару; $F_{тр}$ – сила трения скольжения в скользуне; $h_ц$ – высота центра масс; C_p – центробежная сила; T – центростремительная сила; $\Delta_{зi}$ – зазор в скользунах.

Анализ сходов порожних вагонов показал, что по результатам служебных расследований и актов комиссионного осмотра технического состояния вагонов в 70 % случаев имел место излом внутренних пружин в комплектах упругого подвешивания.

Были обнаружены от одного до пяти изломов на вагон, причем места излома пружин были покрыты ржавчиной, что говорит о возникновении излома не в момент схода, а значительно раньше. В рассмотренных случаях высота пружин на сошедших тележках с левой и правой сторон существенно различалась и в ряде случаев превышала допустимые пределы. Минимальная высота пружин рессорных комплектов тележек составляла 238 мм при норме не менее 246 мм, максимальная высота достигала 261 мм при норме не более 255 мм. Жесткость комплектов пружин на тележках по сторонам различна, что приводило к перераспределению нагрузок на левой и правой сторонах тележек и разрушению пружин со стороны перегрузки. Жесткость комплектов по сторонам тележек в рассмотренных случаях различается на 9 – 12 %. Кроме того, при осмотре рессорных комплектов после схода вагонов в ряде случаев обнаружены затиры и вмятины поверхности прутков, что свидетельствует о наличии полного смыкания витков пружин при движении вагонов в прямых и кривых участках пути (рисунок 3).

Наличие таких нарушений создает серьезную угрозу безопасности движения.

Для определения степени влияния обнаруженных нарушений в конструкции и работе пружин выполнены расчеты параметров комплектов пружин с учетом выявленных нарушений и особенности работы колес вагонов при этом.

Нагрузка от массы кузова вагона на четыре упругих комплекта при исправных или находящихся в пределах установленных норм характеристик пружин распределяется прямо пропорционально количеству двухрядных пружин в комплекте.

Рисунок 3 – Дефекты пружин рессорного комплекта

В соответствии с массой кузова усилия, действующие в точках подвешивания, распределяются в зависимости от упругих характеристик внутренних и наружных пружин комплекта. Если при этом имеет место перекос в скользунах, то происходит увеличение прогиба пружин одного из комплектов и соответственно его упругой отдачи. При этом возникает крутящий момент, что приводит к излому и уменьшению сопротивления кручению пружины [8].

Результаты расчетов показали, что наличие изломов внутренних пружин существенно увеличивает жесткость упругого комплекта, при этом уменьшает вертикальную нагрузку на одну сторону тележки и таким образом способствует всползанию гребня ведущего колеса на головку рельса и нарушению безопасности движения.

В ходе анализа выяснилось, что наиболее часто возникают случаи сходов, когда имеет место разница зазоров по диагонали вагона, которая практически не нормируется. При этом существенно уменьшается вертикальная нагрузка одного из колес первой по ходу колесной

пары, что при недостаточном зазоре между колесом и рельсом, а также избытке или недостатке возвышения наружного рельса в кривой резко снижает коэффициент запаса устойчивости и приводит к возникновению условий для всползания колеса на рельс с последующим перемещением внутрь кривой [1].

Чем выше нагрузка от кузова вагона на скользуны, тем больше сила трения скольжения пары скользунов и тем более затруднен поворот тележки в процессе движения, что приводит к увеличению угла набегания гребней колес на рабочую грань головки рельса и повышает вероятность его всползания на рельс. При избытке возвышения наружного рельса, что наблюдается в ряде случаев, нагрузка на внутренний скользун увеличивается почти в 1,5 раза.

Под действием непогашенной части центробежного ускорения кузова вагон отклоняется от нормального положения и частично опирается на один из наружных или внутренних скользунов в зависимости от направления действия непогашенного ускорения [6].

При наличии большой разницы зазоров в скользунах в некоторых случаях наблюдается изменение положения тележки в кривой (переход из положения свободной установки в положение наибольшего перекоса). Значения поперечных направляющих усилий, рассчитанных с учетом существующих зазоров в скользунах, во всех рассмотренных случаях на 4 – 10 % выше (таблица), что способствовало обезгруживанию колес и последующему всползанию их гребней на рельс. Таким образом, возможность безопасного движения вагона в кривых малого и большого радиусов при существующих скоростях движения и нормах содержания подвижного состава и пути практически исключена во всех рассмотренных случаях сходов.

Выполнен расчет нагрузки на колесо с учетом перераспределения дополнительных усилий, возникающих при перекосе кузова, зависящем от зазоров в скользунах (см. таблицу).

В качестве примера из общего массива сходов порожних вагонов внутрь кривой на Красноярской и Восточно-Сибирской железных дорогах приведены пять случаев.

Результаты расчета направляющих усилий при учете разницы зазоров в скользунах

Радиус кривой $R_{кр}$, м	Скорость движения вагона в момент схода $V_{дв}$, км/ч	Зазоры в скользунах по диагонали кузов вагона $\Delta_{зi}$, мм	Боковое усилие $Y_{бок}$, кН		Нагрузка на колесо $P_{кол}$, кН	
			без учета $\Delta_{зi}$, мм	с учетом $\Delta_{зi}$, мм	без учета $\Delta_{зi}$, мм	с учетом $\Delta_{зi}$, мм
583	76	10-1	13,68	16,72	18,469	15,241
641	73	10-4	14,42	15,67	19,255	17,02
1033	70	11-2	15,11	17,02	20,336	18,5
1180	78	4-1	14,87	15,49	20,28	18,94
1309	71	9-1	15,2	17,5	20,592	19,3

Перекос кузова из-за зазора в скользунах приводит к разгрузке первой по ходу колесной пары на 7 ÷ 15 %, что достаточно существенно (рисунок 4).

Расчет и анализ усилий, действующих на первую по ходу колесную пару, позволили установить, что при перераспределении нагрузок на вертикальные пружинные комплекты направляющее усилие увеличивается более чем на 9 %. Это приводит к увеличению бокового усилия, что оказывает существенное влияние на устойчивость колеса в рельсовой колее. Увеличение бокового усилия влечет за собой уменьшение коэффициента запаса устойчивости до критических значений. На основе анализа полученных значений коэффициента безопасности против схода установлено, что при учете зазоров в скользунах от 4 – 16 мм значение коэффициента безопасности уменьшается на 10 ÷ 30 % (рисунок 5).

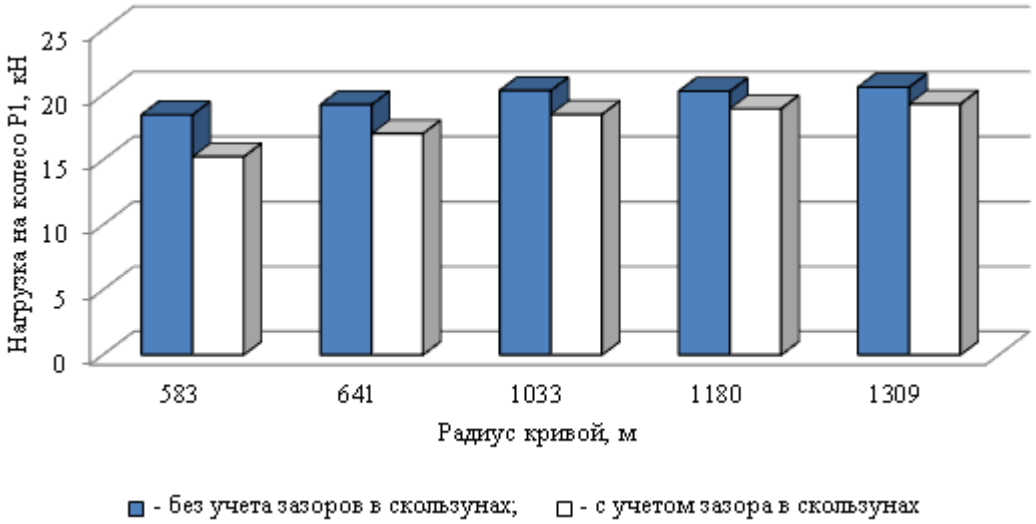


Рисунок 4 – Нагрузка от колеса на рельс при учете перекоса из-за наличия различных зазоров в скользунах

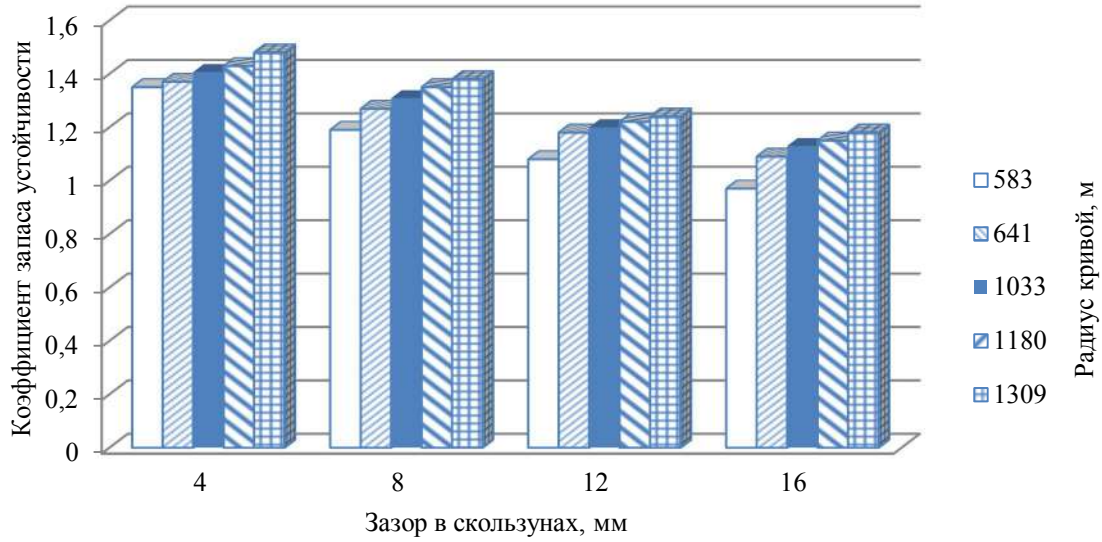


Рисунок 5 – Коэффициент запаса устойчивости в кривых различного радиуса при различных зазорах в скользунах по диагонали вагона

Наибольшее снижение коэффициента запаса устойчивости получено в тех случаях, когда суммарный зазор в скользунах по диагонали вагона составлял 9 – 15 мм.

Список литературы

1. Влияние параметров подвижного состава и пути на устойчивость движения [Текст] / Н. П. Буйнова, Е. П. Капустина и др. // Вестник транспорта Поволжья / Самарский гос. ун-т путей сообщения. – Самара. – 2011. – № 1(25). – С. 24 – 30.

2. Кузьмич, Л. Д. Вагоны [Текст] / Л. Д. Кузьмич. – М.: Трансжелдориздат, 1956. – 336 с.

3. Данилов, В. Н. Железнодорожный путь и его взаимодействие с подвижным составом [Текст] / В. Н. Данилов. – М.: Трансжелдориздат, 1961. – 111 с.

4. Коган, А. Я. Оценка достаточного условия устойчивости колеса на рельсе с учетом вероятностного характера влияющих на нее некоторых факторов [Текст] / А. Я. Коган, Е. А. Черняков // Вестник ВНИИЖТа / ВНИИЖТ. – М. – 2008. – № 2. – С. 36 − 41.

5. Лазарян, В. А. Устойчивость движения рельсовых экипажей [Текст] / В. А. Лазарян, Л. А. Длугач, М. Л. Коротенко. – Киев: Наукова думка, 1972. – 198 с.

6. Леоненко, Е. Г. Модели схода грузовых вагонов (цистерн) наружу и внутрь кривой [Текст] / Е. Г. Леоненко // Материалы всерос. молодежной науч.-практ. конф. «Безопасность транспорта и сложных технических систем глазами молодежи» / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2018. – С. 111 – 114.

7. Михальченко, Г. С. Совершенствование динамических качеств подвижного состава железных дорог средствами компьютерного моделирования [Текст] / Г. С. Михальченко, Д. Ю. Погорелов, В. А. Симонов // Тяжелое машиностроение. – 2003. – № 12. – С. 2 – 6.

8. Медель, В. Б. Подвижной состав электрических железных дорог [Текст] / В. Б. Медель. – М.: Транспорт, 1965. – 280 с.

9. Петров, Г. М. Оценка безопасности движения вагонов при отклонениях от норм содержания ходовых частей и пути [Текст]: дис… докт. техн. наук: 05.22.07 / Петров Геннадий Михайлович. – Москва, 2000. – 348 с.

10. Сокол, Э. Н. Сходы с рельсов и столкновения подвижного состава (Судебная экспертиза. Элементы теории и практики) [Текст] / Э. Н. Сокол. – Киев: Транспорт Украины, 2004. – 368 с.

References

1. Buinova, N. P., Kapustina, E. P., Leonenko E. G., Churinova, O. V. Impact of the parameters of the rolling stock and the track on the motion stability [Vliyanie parametrov podvizhnogo sostava i puti na ustoichivost' dvizheniya]. *Vestnik transporta Povolzhya – Bulletin of transport of the Volga region*, 2011, no. 1 (25), pp. 24 – 30.

2. Kuzmich, L. D. *Vagony* (Wagons). Moscow: Transzheldorizdat, 1956, 336 p.

3. Danilov, V. N. *Zheleznodorozhnyi put' i ego vzaimodeistvie s podvizhnym sostavom* (Railway track and its interaction with rolling stock). Moscow: Transzheldorizdat, 1961, 111 p.

4. Kogan A.Y., Chernyakov Y.A. Evaluation of sufficient condition of the wheel stability on the rail, taking into account the probabilistic nature of some factors influencing it [Otsenka dostatochnogo usloviya ustoychivosti kolesa na relse s uchetom veroyatnostnogo kharaktera vliyayushchego na neye nekotorykh faktorov]. *Vestnik VNIIZhT – VNIIZhT Bulletin*, 2008, no. 2, pp. 36 – 41.

5. Lazaryan V. A., Dlugach L. A., Korotenko M. L. *Ustoichivost' dvizheniya relsovykh ekipazhei* [Movement stability of railway vehicles]. Kiev: Naukova Dumka, 1972, 198 p.

6. Leonenko, E. G. The models of freight car (tank car) derailments to the outside and inside of the curve [Modeli skhoda gruzovykh vagonov (tsistern) naruzhu i vnutr' krivoi]. *Materialy vseros. molodezhnoj nauch.-prakt. konf. «Bezopasnost' transporta i slozhnyh tekhnicheskih sistem glazami molodezhi»* (Proceedings from The All-Russian Youth Research and Practice Conference). – Irkutsk, 2018, pp. 111 – 114.

7. Medel, V. B. *Podvizhnoi sostav elektricheskikh zheleznykh dorog* (Rolling stock of electrical railways). Moscow: Transport, 1965, 280 p.

8. Mikhalchenko G. S, Pogorelov D. Y., Simonov V. A. Improvement of dynamic qualities of rolling stock of railways by means of computer modeling [Sovershenstvovanie dinamicheskih kachestv podvizhnogo sostava zheleznyh dorog sredstvami komp'yuternogo modelirovaniya].*Tyazheloe mashinostroenie – Heavy mechanical engineering*, 2003, no. 12, pp. 2 – 6.

9. Petrov G. M. *Ocenka bezopasnosti dvizheniya vagonov pri otkloneniyah ot norm soderzhaniya hodovyh chastej i puti* (Evaluation of the safety of the movement of cars in the event of deviations from the norms of maintenance of running parts and track). Thesis the doctor of technical sciences, Moscow, MIIT, 2000, 348 p.

10. Sokol E. N. *Skhody s relsov i stolknoveniya podvizhnogo sostava (Sudebnaya ekspertiza. Elementy teorii i praktiki)* [Derailments and collisions of rolling stock. (Expert evidence. Elements of theory and practice)]. Kiev: Transport Ukrainy, 2004, 368 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Капустина Елена Петровна
Российский университет транспорта (МИИТ).
Образцова ул., д. 9, г. Москва, 127055, Российская Федерация.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Тяговый подвижной состав», МИИТ.

Леоненко Елена Геннадьевна
Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения (КрИЖТ, ИрГУПС).
Новая заря ул., д. 2и, г. Красноярск, 660041, Российская Федерация.
Преподаватель отделения «Электромеханическое», КрИЖТ, ИрГУПС.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kapustina Elena Petrovna
Russian Transport University (RUT).
9, Obraztsova st., Moscow, 127055, The Russian Federation.
Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor at the department of «Traction Rolling Stock », RUT (MIIT).

Leonenko Elena Gennadievna
Krasnoyarsk Institute of Railway Transport - a branch of the Irkutsk State University of Communications (CIRT ISUC).
2i, New dawn st., Krasnoyarsk, 660041, the Russian Federation.
Lecturer at the department of "Electromechanical", CIRT ISUC.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Капустина, Е. П. Влияние технических характеристик и их отклонений на устойчивость движения порожнего подвижного состава [Текст] / Е. П. Капустина, Е. Г. Леоненко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 2 (38). – С. 16 – 23.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kapustina E. P., Leonenko E. G. Influence of technical characteristics and their definitions on the stability of the movement of empty Rolling. Journal of Transsib Railway Studies, 2019, vol. 2 no. 38, pp. 16 – 23 (In Russian).

УДК 629.423:621.311.004.18

А. А. Бакланов, А. П. Шиляков
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ ПАССАЖИРСКИХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Аннотация. *Цель работы заключается в оценке энергетической эффективности рекуперативного торможения пассажирского электровоза постоянного тока при движении поезда с неустановившейся и установившейся скоростью, определении степени влияния скорости движения и электроотопления пассажирских вагонов на возврат электроэнергии при рекуперативном торможении электровоза, разработке рекомендаций по повышению энергетической эффективности пассажирских электровозов постоянного тока.*

Использованы методы: сравнительный анализ, методы тяговых расчетов, линейный регрессионный анализ, метод энергетического баланса.

Рассмотрены уравнения энергетического баланса движения пассажирского поезда и его составляющих в режиме рекуперативного торможения, позволяющие выявить основные факторы, влияющие на возврат электроэнергии. Получены зависимости возврата электроэнергии при рекуперативном торможении, позволяющие оценить влияние режима движения поезда и электроотопления пассажирских вагонов на возврат электроэнергии при рекуперативном торможении электровоза. Даны рекомендации по сокращению энергозатрат пассажирских поездов.

Определены условия, при которых можно увеличить возврат электроэнергии при рекуперативном торможении пассажирских электровозов. Разработанные предложения позволят повысить энергетическую эффективность пассажирских электровозов постоянного тока.

Ключевые слова: *пассажирский электровоз, скорость движения, рекуперативное торможение, возврат электроэнергии, электроотопление вагонов.*

Alexander A. Baklanov, Andrey P. Shilyakov
Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

THE REGENERATIVE BRAKING ENERGY EFFICIENCY OF PASSENGER DC ELECTRIC LOCOMOTIVES

Abstract. *The purpose of the work is to assess the energy efficiency of recuperative braking of a passenger DC electric locomotive when a train is moving at an unsteady and steady speed, to determine the degree of influence of the speed of movement and electric heating of passenger cars on the return of electricity during recuperative braking of an electric locomotive, to develop recommendations for improving the energy efficiency of passenger DC electric locomotives.*

The following methods were used: comparative analysis, methods of traction calculations, linear regression analysis, energy balance method.

The equations of the energy balance of the movement of a passenger train and its components are considered in the mode of regenerative braking, allowing to identify the main factors affecting the return of electricity. The dependences of the return of electricity during regenerative braking, allowing to evaluate the influence of the train running mode and electric heating of passenger cars on the return of electricity during regenerative braking of an electric locomotive, are obtained. Developed recommendations to reduce the energy consumption of passenger trains.

The conditions under which it is possible to increase the return of electricity during regenerative braking of passenger electric locomotives are determined. The developed proposals will allow increasing the energy efficiency of passenger DC electric locomotives.

Keywords: *passenger electric locomotive, speed of movement, regenerative braking, return of electric power, electric heating of wagons.*

Повышение энергетической эффективности тягового подвижного состава является важнейшей задачей, определяемой стратегиями развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г. и научно-технологического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2025 г. и на перспективу до 2030 г. (Белая книга ОАО «РЖД»). Применительно к электроподвижному составу (ЭПС) эта задача ставится как для вновь изготавливаемых перспективных серий электровозов, так и для находящихся в эксплуатации.

Возможны разные пути повышения энергетической эффективности электроподвижного состава: повышение КПД, применение рекуперативного торможения, снижение затрат энергии на собственные нужды, применение рациональных режимов работы ЭПС и вождения поездов, лучшее использование сцепных свойств электровозов и др.

В данной статье рассмотрен один из ключевых способов экономии электрической энергии на ЭПС – рекуперативное торможение (РТ) – применительно к пассажирским электровозам постоянного тока, которое позволяет возвращать в контактную сеть электрическую энергию, преобразованную из механической тяговыми электродвигателями (ТЭД), работающими в генераторном режиме.

Традиционно сложилось так, что пассажирские электровозы постоянного тока, эксплуатируемые на сети железных дорог страны, подобными системами не оснащались. Среди причин такого положения дел можно отметить мнение о невысоких значениях количества рекуперируемой электроэнергии при торможении пассажирского поезда, особенно на равнинных

участках железных дорог, а также стремление уменьшить затраты на изготовление, техническое обслуживание и ремонт ЭПС.

Помимо этого существовали проблемы с обеспечением поддержания заданной тормозной силы и ее плавного регулирования в условиях нестабильности напряжения в контактной сети, негативно сказывающихся на комфорте пассажиров. В настоящее время эти проблемы успешно решаются путем применения современных автоматизированных, в том числе микропроцессорных, систем управления ЭПС.

Опыт эксплуатации пассажирских электровозов переменного тока серии ЭП1 различных модификаций, выпускаемых промышленностью в последние десятилетия, показывает, что применение рекуперативного торможения на них позволяет получить заметную экономию электроэнергии, повысить их энергетическую эффективность и безопасность движения поездов. Например, на Красноярской и Восточно-Сибирской железных дорогах электровозы серии ЭП1 с пассажирскими поездами дают удельный возврат электроэнергии в режиме РТ, достигающий 16…18 кВт·ч/10^4 ткм, который даже несколько превышает аналогичный показатель грузовых электровозов ВЛ80Р и ВЛ85, составляющий 12…15 кВт·ч/10^4 ткм в одинаковых условиях работы [1]. Следовательно, можно ожидать, что оснащение пассажирских электровозов постоянного тока системой рекуперативного торможения в эксплуатации позволит получить не меньший эффект.

Исследования разных авторов [2 – 4] также свидетельствуют о высокой эффективности рекуперативного торможения электроподвижного состава в условиях эксплуатации. В них рассмотрено влияние отдельных факторов на возврат электроэнергии грузовых электровозов, однако применительно к пассажирским электровозам, в том числе постоянного тока, результаты подобных исследований не приведены.

Для оценки количества рекуперируемой электроэнергии пассажирским электровозом постоянного тока воспользуемся методом энергетического баланса движения поезда [5], на основании которого результирующий возврат электроэнергии при РТ пассажирского поезда в общем виде характеризуется выражением:

$$\begin{aligned} A_э &= A_{эд} + A_{с.н} + A_о = A_д \eta_д + A_{с.н} + A_о = \\ &= \left(A_к + A_п + A_{с.о} + A_{с.кр} + A_{п.г}\right)\eta_д + A_{с.н} + A_о, \end{aligned} \tag{1}$$

где $A_{эд}$ – электрическая энергия, выработанная ТЭД электровоза;

$A_д$ – механическая энергия, преобразуемая ТЭД в электрическую энергию;

$A_к$, $A_п$ – изменения кинетической и потенциальной энергии поезда;

$A_{с.о}$, $A_{с.кр}$ – затраты энергии на преодоление основного и дополнительного от кривых сопротивления движению;

$A_{п.г}$ – затраты энергии на работу подвагонных генераторов;

$\eta_д$ – КПД ТЭД электровоза в режиме рекуперативного торможения;

$A_{с.н}$, $A_о$ – затраты энергии на собственные нужды электровоза и электроотопление пассажирских вагонов.

Количество механической энергии, которое может быть преобразовано в электрическую, определяется прежде всего изменениями кинетической и потенциальной энергии поезда в процессе торможения со снижением скорости движения:

$$A_к = mk_u \frac{V_2^2 - V_1^2}{2}; \tag{2}$$

$$A_п = mgiL, \tag{3}$$

где $m = m_л + n_в m_в$ – масса поезда;

$m_л$, $m_в$ – массы локомотива и пассажирского вагона;

$n_в$ – число пассажирских вагонов в составе поезда;

k_u – коэффициент инерции вращающихся частей поезда [6];

V_1, V_2 – начальная и конечная скорости на участке рекуперативного торможения;

g = 9,81 м/с^2 – ускорение свободного падения;

i, L – крутизна уклона и длина участка рекуперативного торможения.

Затраты энергии на преодоление основного и дополнительного от кривых сопротивления движению определяются выражениями:

$$A_{\text{с.о}} = mgw_{\text{о}}L\,; \tag{4}$$

$$A_{\text{с.кр}} = mgw_{\text{кр}}L\,, \tag{5}$$

где $w_{\text{о}}$, $w_{\text{кр}}$ – удельные основное и дополнительное от кривых сопротивления движению.

Затраты энергии на собственные нужды электровоза, а также на электроотопление пассажирских вагонов и работу подвагонных генераторов определяются выражениями:

$$A_{\text{с.н}} = P_{\text{с.н}}T\,; \tag{6}$$

$$A_{\text{о}} = n_{\text{в}}P_{\text{о}}T\,; \tag{7}$$

$$A_{\text{п.г}} = n_{\text{в}}P_{\text{п.г}}T\,, \tag{8}$$

где $P_{\text{с.н}}$, $P_{\text{о}}$, $P_{\text{п.г}}$ – мощности собственных нужд электровоза, электроотопления пассажирского вагона и подвагонного генератора;

T – время движения в режиме рекуперативного торможения.

Удельные значения возврата электроэнергии в режиме РТ для электровоза в целом и его отдельных составляющих определяются выражением, кВт·ч/10^4 ткм:

$$a_{\text{э}} = \frac{A_{\text{э}} \cdot 10^4}{m_{\text{с}}L}, \tag{9}$$

где $m_{\text{с}}$ – масса состава вагонов, т.

Рассмотрим применение РТ на пассажирском электровозе в двух основных случаях: для остановки поезда на станции и для поддержания заданной скорости движения на спусках. В первом случае РТ производится от начальной скорости до достижения некоторой минимальной скорости, ограниченной условием превышения суммарной электродвижущей силы ТЭД напряжения в контактной сети. Анализ характеристик электровозов постоянного тока и их тяговых двигателей в генераторном режиме показывает, что эта скорость обычно составляет от 9 до 15 км/ч. Следовательно, для остановки поезда на конечном этапе снижения скорости до нуля необходимо применять механическое торможение. Во втором случае РТ на спуске реализуется обычно при постоянной скорости движения.

Эффективность применения рекуперативного торможения рассмотрим на примере пассажирских электровозов постоянного тока серии ЭП2К, оснащенных системой реостатного торможения. В настоящее время электровозы этой серии выпускаются отечественной промышленностью и заменяют на железных дорогах электровозы ЧС2, ресурс которых полностью исчерпан.

Для оценки возврата электроэнергии при движении электровоза постоянного тока в режиме РТ с пассажирским поездом для случая остановочного торможения примем следующие исходные данные: участок пути прямой с нулевым уклоном; путь бесстыковой; диапазон измененения скорости движения V = 120…15 км/ч; масса электровоза $m_{\text{л}}$ = 132 т; КПД тяговых двигателей в режиме РТ $\eta_{\text{д}}$ = 0,8; мощность собственных нужд электровоза $P_{\text{с.н}}$ = 100 кВт; тормозная сила электровоза $B_{\text{к}}$ = 150 кН; коэффициент инерции вращающихся частей поезда k_u = 1,06; масса состава вагонов $m_{\text{с}}$ = 1020 т; масса вагона $m_{\text{в}}$ = 60 т; количество вагонов $n_{\text{в}}$ = 17; мощность электроотопления пассажирского вагона $P_{\text{о}}$ = 30 кВт; мощность подвагонного генератора $P_{\text{п.г}}$ = 10 кВт.

Возможность реализации постоянной тормозной силы электровоза $B_к$ = 150 кН во всем диапазоне скорости движения оценим путем сравнения ее с максимальной тормозной силой, ограниченной сцеплением колес с рельсами и характеризуемой выражением [6, 7]:

$$B_{к.сц} = m_л g \psi_{к.р}, \quad (10)$$

где $\psi_{к.р}$ – коэффициент сцеплением колес электровоза с рельсами.

Согласно Правилам тяговых расчетов [7, 8] в режиме РТ коэффициент сцепления принимается равным 0,8 от коэффициента сцепления в режиме тяги, т. е. $\psi_{к.р} = 0{,}8\psi_к$. Применительно к пассажирскому электровозу постоянного тока серии ЭП2К с реостатным торможением коэффициент сцепления в режиме тяги определяется по формуле:

$$\psi_к = 0{,}28 + \frac{3}{50 + 20V} - 0{,}0007V. \quad (11)$$

Тогда при начальной скорости торможения 120 км/ч коэффициент сцепления в режиме РТ $\psi_{кр}$ = 0,8·0,197 = 0,158 и максимальная тормозная сила электровоза $B_{к.сц}$, ограниченная сцеплением колес с рельсами, составит 204,3 кН.

Как известно, при снижении скорости движения коэффициент сцепления колес электровоза с рельсами и, соответственно, тормозная сила возрастают. Следовательно, реализация заданной тормозной силы 150 кН для пассажирского электровоза с указанными выше параметрами во всем диапазоне скорости движения 120…15 км/ч вполне допустима по условиям безъюзового торможения.

В расчетах использованы формулы для определения удельного основного сопротивления движению, взятые из Правил тяговых расчетов [7] для бесстыкового пути, Н/кН:

для электровоза под током

$$w'_о = 1{,}9 + 0{,}008V + 0{,}00025V^2; \quad (12)$$

для пассажирских вагонов

$$w''_о = 0{,}7 + \frac{8 + 0{,}16V + 0{,}0023V^2}{m_{в.о}}, \quad (13)$$

где V – скорость движения, км/ч;

$m_{в.о}$ – масса на ось вагона; в нашем случае $m_{в.о}$ = 15 т.

Кривые движения и энергетические показатели перспективного пассажирского электровоза постоянного тока без электроотопления вагонов для летнего периода года и с электроотоплением вагонов для зимнего периода в случае применения РТ для остановки поезда на станции приведены на рисунке 1.

Анализ полученных кривых движения показывает, что в режиме РТ пассажирского электровоза с поездом массой 1020 т при снижении скорости от 120 до 15 км/ч на участке пути с нулевым уклоном пройденный путь L = 3292 м; время движения T = 195,5 с = 3,3 мин; средняя скорость $V_{ср}$ = 60,6 км/ч, ускорение (замедление) поезда находится в диапазоне u = – 0,16…– 0,18 м/с^2. Возврат энергии в тяговую сеть без электроотопления вагонов $A_{э.б.о}$ составляет 106,1 кВт·ч, а с электроотоплением вагонов – $A_{э.с.о}$ = 81,1 кВт·ч. Удельный возврат энергии без электроотопления вагонов находится в диапазоне $a_{э.б.о}$ = 321…279 кВт·ч/10^4 ткм, его среднее значение – 316,0 кВт·ч/10^4 ткм; с электроотоплением вагонов – $a_{э.с.о}$ = 279,0 кВт·ч/10^4 ткм, его среднее значение – 241,5 кВт·ч/10^4 ткм. Расход электроэнергии на собственные нужды электровоза $A_{с.н}$ составляет 3,7 кВт·ч, на работу подвагонных генераторов – $A_{п.г}$ = 10,4 кВт·ч, на электроотопление вагонов – $A_о$ = 25,0 кВт·ч.

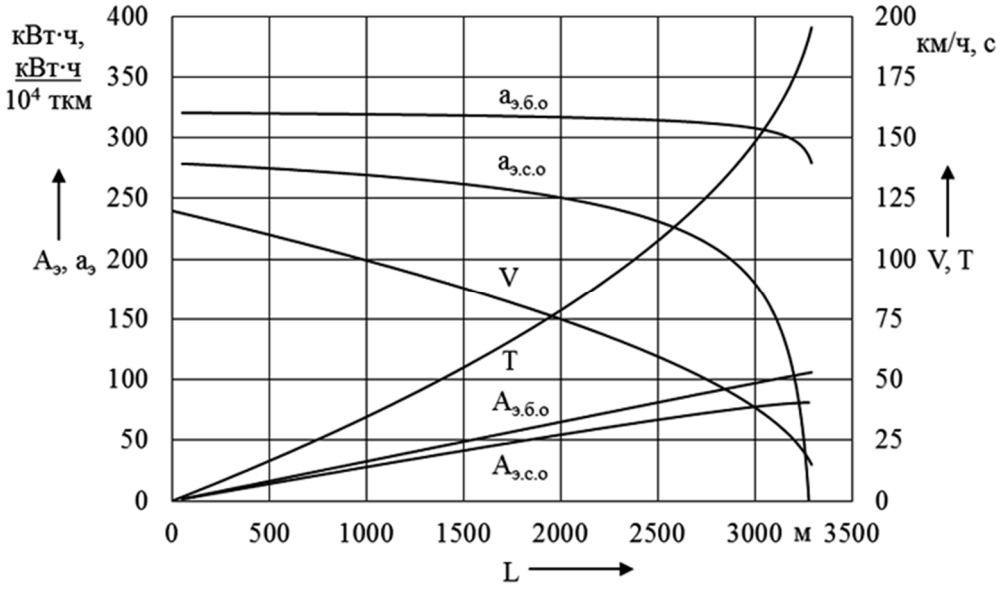


Рисунок 1 – Кривые движения пассажирского поезда массой состава 1020 т
в режиме рекуперативного торможения электровоза при снижении скорости от 120 до 15 км/ч

Несмотря на снижение скорости движения, удельный возврат электроэнергии за период торможения достаточно стабильный, и только в конце торможения существенно снижается, особенно с электроотоплением вагонов, когда практически вся выработанная ТЭД электроэнергия расходуется на электроотопление вагонов и собственные нужды электровоза.

Для оценки возврата электроэнергии в режиме РТ электровоза постоянного тока с пассажирским поездом при движении на спусках разной крутизны с постоянной скоростью приняты такие же исходные данные, как и в случае остановочного торможения. Кривые удельного возврата электроэнергии перспективного пассажирского электровоза постоянного тока в режиме РТ без электроотопления вагонов для летнего периода года и с электроотоплением вагонов для зимнего периода при движении с установившимися скоростями на спусках различной крутизны приведены на рисунках 2 и 3.

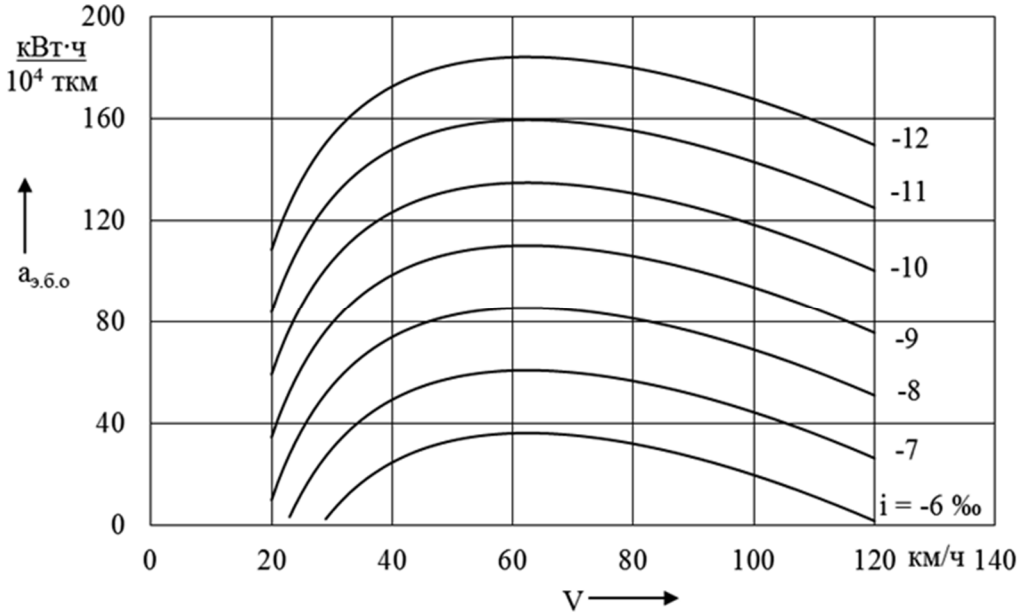


Рисунок 2 – Удельный возврат электроэнергии пассажирского электровоза в режиме рекуперативного торможения при движении с составом массой 1020 т без электроотопления вагонов
с установившейся скоростью на спусках различной крутизны

Полученные зависимости показывают, что удельный возврат электроэнергии в режиме РТ пассажирского электровоза имеет высокие значения, не уступающие грузовым электровозам. Он пропорционально возрастает с увеличением крутизны спуска и на каждом уклоне достигает максимума при определенной скорости движения, причем для поезда с электроотоплением вагонов эта скорость выше. Особенно большие значения удельного возврата электроэнергии при РТ получаются в летний период без электроотопления вагонов, достигающие 140…180 кВт·ч/10^4 ткм на спусках крутизной 10…12 ‰. В зимний период значительная часть выработанной при РТ электроэнергии потребляется собственными нуждами электровоза и электроотоплением пассажирских вагонов, поэтому удельный возврат электроэнергии при прочих равных условиях существенно меньше, чем в летний период.

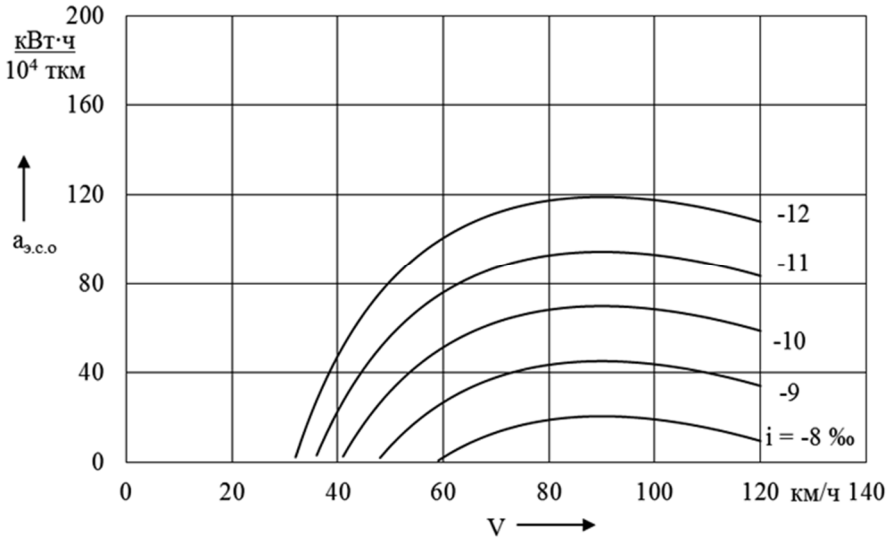


Рисунок 3 – Удельный возврат электроэнергии пассажирского электровоза в режиме рекуперативного торможения при движении с составом массой 1020 т и электроотоплением вагонов с установившейся скоростью на спусках различной крутизны

Расчеты показывают, что в целом за поездку на участке с холмистым профилем пути возврат электроэнергии в режиме РТ электровоза с пассажирским поездом без электроотопления вагонов может достигать 10…15 %, а на на участке с равнинным профилем пути – 3…5 %. Разумеется, значения возврата электроэнергии существенно зависят от профиля пути конкретного участка, условий движения поезда и других факторов. Учитывая положительный опыт работы пассажирских электровозов переменного тока ЭП1 с рекуперативным торможением, имеющих примерно такой же возврат электроэнергии, который получен в приведенных выше расчетах, можно уверенно сказать, что оснащение пассажирских электровозов постоянного тока системами рекуперативного торможения будет экономически выгодным.

Кривые на рисунках 2 и 3 достигают максимальных значений при определенной скорости движения, для вычисления которой исследуем зависимости на экстремум. Для этого на основании энергетического баланса движения поезда с установившейся скоростью запишем уравнение удельного возврата электроэнергии в режиме РТ пассажирского электровоза, кВт·ч/10^4 ткм:

$$a_э = 27{,}25 k_{т.л} \eta_o (i - w_о - w_{с.кр}) - \frac{10^4}{m_с V} (P_{п.г} n_в \eta_д + P_{с.н} + P_о n_в), \qquad (14)$$

где $k_{т.л} = 1 + \frac{m_л}{m_с}$ – коэффициент влияния массы локомотива на удельный возврат энергии.

Приравняв к нулю первую производную уравнения (14) по скорости, после преобразований получим кубическое уравнение вида:

$$bV^3 + cV^2 + d = 0, \tag{15}$$

где b, c, d – коэффициенты, определяемые по выражениям:

$$b = 27,25k_{т.л}\eta_д \cdot 2e_2; \tag{16}$$

$$c = 27,25k_{т.л}\eta_д e_1; \tag{17}$$

$$d = -\frac{10^4}{m_c}(P_{п.г}n_в\eta_д + P_{с.н} + P_о n_в). \tag{18}$$

Здесь коэффициенты e_1, e_2 соответствуют выражению для удельного основного сопротивления движению поезда, получаемому, в свою очередь, из формул удельного основного сопротивления движению электровоза под током и пассажирских вагонов:

$$w_о = e_0 + e_1V + e_2V^2, \tag{19}$$

которое для принятых параметров поезда имеет вид:

$$w_о = 1,31 + 0,0104V + 0,000164V^2. \tag{20}$$

С учетом принятых выше исходных данных запишем кубическое уравнение для режима РТ электровоза с пассажирским поездом:

с электроотоплением вагонов –

$$0,008095V^3 + 0,255V^2 - 7313,7 = 0; \tag{21}$$

без электроотопления вагонов –

$$0,008095V^3 + 0,255V^2 - 2313,7 = 0. \tag{22}$$

Кубическое уравнение можно решить в радикалах с помощью формулы Кардано, подстановки Виета и другими способами [9, 10]. Воспользовавшись способом Кардано, с помощью подстановки $V = y - \frac{c}{3b}$ запишем кубическое уравнение в приведенной форме:

$$y^3 + 3py + 2q = 0, \tag{23}$$

в котором $3p = \frac{3b - c^2}{3b^2}$; $2q = \frac{2c^3}{27b^3} + \frac{d}{b}$.

Анализ данных показывает, что дискриминант кубического уравнения больше нуля, т. е.

$$D = p^3 + q^2 > 0. \tag{24}$$

В таком случае кубическое уравнение имеет один вещественный корень и два комплексно сопряженных корня, при этом действительный корень равен сумме вспомогательных величин $y = u + s$, которые характеризуются выражениями:

$$u = \sqrt[3]{-q + \sqrt{q^2 + p^3}}; \tag{25}$$

$$s = \sqrt[3]{-q - \sqrt{q^2 + p^3}}. \tag{26}$$

После выполнения соответствующих вычислений с учетом принятых выше исходных данных получим значения оптимальной установившейся скорости движения пассажирского

поезда, при которой достигаются максимальный удельный возврат электроэнергии в режиме РТ электровоза:

в летний период без электроотопления вагонов $V_{опт}$ = 56,9 км/ч;

в зимний период с электроотоплением вагонов $V_{опт}$ = 87,2 км/ч.

Полученные результаты согласуются с зависимостями, приведенными на рисунках 2 и 3. Использование разработанной методики позволяет определить оптимальные значения установившейся скорости движения пассажирского поезда по критерию максимума возврата электроэнергии в тяговую сеть в режиме РТ электровоза для различных условий, которые можно использовать при разработке рациональных режимов вождения поездов.

Сравнивая полученные зависимости, можно отметить, что в режиме РТ пассажирского поезда с электроотоплением вагонов возврат электроэнергии в тяговую сеть существенно снижается, так как значительная его часть потребляется электроотоплением вагонов. Следует подчеркнуть, что вообще в зимний период на электроотопление вагонов затрачивается значительная часть электроэнергии, которая при низкой температуре воздуха может составлять 20…50 % от общего расхода электроэнергии пассажирского поезда.

Таким образом, рекуперативное торможение пассажирского поезда имеет высокую энергетическую эффективность, так как позволяет возвратить в тяговую сеть и, таким образом, сэкономить значительное количество электроэнергии не только на спусках, но и при остановках на станциях. Конкретное значение возврата электроэнергии зависит от количества вагонов в поезде (массы состава), начальной скорости рекуперативного торможения, количества остановок и ограничений скорости, крутизны и протяженности спусков и др.

Приведенная оценка возврата электроэнергии позволяет утвердительно ответить на вопрос о целесообразности применения систем рекуперативного торможения на пассажирских электровозах постоянного тока, даже не принимая во внимание аспекты повышения безопасности движения поездов. Следовательно, выпускаемые в настоящее время пассажирские электровозы постоянного тока ЭП2К целесообразно оснащать системой рекуперативного торможения, тем более, что на них уже есть реостатное торможение и требуются минимальные затраты на их дооснащение для рекуперации энергии.

Учитывая особенности взаимодействия ЭПС и системы тягового электроснабжения на участках постоянного тока, можно отметить, что с технической точки зрения наиболее выгодным вариантом применения рекуперативного тормоза является его совмещение с реостатным тормозом по аналогии с новыми сериями грузовых электровозов 2ЭС4К, 2ЭС6 и электропоездов ЭД4. Это позволит обеспечить поезд готовым к работе электрическим тормозом, общая эффективность которого, обусловленная экономией электроэнергии и тормозных колодок, а также повышением безопасности движения, не будет зависеть от уровня напряжения в контактной сети.

Перспективы и эффективность подобных систем будут выше при использовании электровозов с рекуперацией на полигонах с холмистым и горным профилем. Применительно к железным дорогам Урала и Сибири существенный эффект от использования рекуперации на пассажирских электровозах постоянного тока можно ожидать на участках с холмистым и горным профилем пути Кузбасского региона Западно-Сибирской железной дороги, а также Свердловской, Южно-Уральской и Куйбышевской железных дорог.

Список литературы

1. Бакланов, А. А. Пути повышения энергоэффективности применения систем рекуперативного торможения на Красноярской железной дороге [Текст] / А. А. Бакланов, С. В. Швецов, А. П. Шиляков // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: Матер. всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2012. – С. 300 – 308.

2. Мазнев, А. С. Повышение эффективности электроподвижного состава [Текст] / А. С. Мазнев, А. М. Евстафьев // Железнодорожный транспорт. – 2010. – № 9. – С. 33 – 36.

3. Мельниченко, О. В. Повышение энергетических показателей электровозов [Текст] / О. В. Мельниченко, Ю. В. Газизов // Железнодорожный транспорт. – 2010. – № 3. – С. 50, 51.

4. Сопов, В. И. Количественная оценка объемов энергии тяги и торможения на основе обработки экспериментальных данных [Текст] / В. И. Сопов, А. А. Штанг, Е. А. Спиридонов // Транспортные системы Сибири: Материалы междунар. науч.-техн. конф. / Красноярский гос. техн. ун-т. – Красноярск, 2004. – С. 143.

5. Бакланов, А. А. Энергетический баланс движения для решения задач снижения расхода электроэнергии на тягу поездов [Текст] / А. А. Бакланов // Транспорт: наука, техника, управление. – 2005. – № 6. – С. 32 – 35.

6. Астахов, П. Н. Справочник по тяговым расчетам [Текст] / П. Н. Астахов, П. Т. Гребенюк, А. И. Скворцова. – М.: Транспорт, 1973. – 256 с.

7. Правила тяговых расчетов для поездной работы [Текст]. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.

8. Правила тяговых расчетов для поездной работы [Текст]: Утв. распоряж. ОАО «РЖД» от 12.05.2016 № 867р. – М., 2016. – 515 с.

9. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике [Текст] / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М.: Наука, 1965. – 608 с.

10. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров [Текст] / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1974. – 832 с.

References

1. Baklanov A. A., Shvetsov S. V., Shilyakov A. P. Puti povysheniya energoeffektivnosti primeneniye sistem rekuperativnogo tormozheniya na Krasnoyarskoy zheleznoy doroge [Ways to improve energy efficiency the use of regenerative braking systems on the Krasnoyarsk Railway]. *Mater. vseros. nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar. uchastiyem «Ekspluatatsionnaya nadezhnost' lokomotivnogo parka i povysheniye effektivnosti tyagi poyezdov»* (Materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation «Operational reliability of the locomotive fleet and increasing the efficiency of train traction»). Omsk, 2012. pp. 300 – 308.

2. Maznev A. S., Evstafyev A. M. Povysheniye effektivnosti elektropodvizhnogo sostava [Improving the efficiency of electric rolling stock]. *Railway transport*, 2010, no 9, pp. 33 – 36.

3. Melnichenko O. V., Gazizov Y. V. Povysheniye energeticheskikh pokazateley elektrovozov [Increasing the energy performance of electric locomotives]. *Railway transport*, 2010, no 3, pp. 50 – 51.

4. Sopov V. I., Shtang A. A., Spiridonov E. A. Kolichestvennaya otsenka ob"yemov energii tyagi i tormozheniya na osnove obrabotki eksperimental'nykh dannykh [Quantitative assessment of the energy of thrust and braking based on the processing of experimental data]. *Materialy II mezhdunarodnoy nauch.-tekh. konf. «Transportnyye sistemy Sibiri»* (Materials of the II International Scientific-Technical. conf. «Transport Systems of Siberia»). Krasnoyarsk, 2004. 143 p.

5. Baklanov A. A. Energeticheskiy balans dvizheniya dlya resheniya zadach snizheniya raskhoda elektroenergii na tyagu poyezdov [The energy balance of the movement to solve problems of reducing power consumption for train traction]. *Transport: science, technology, management*, 2005, no 6, pp. 32 – 35.

6. Astakhov P. N., Grebenyuk P. T., Skvortsova A. I. *Spravochnik po tyagovym raschetam* (Handbook of traction calculations). Moscow: Transport, 1973. 256 p.

7. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poyezdnoy raboty* (Traction rules for train operation). Moscow: Transport, 1985. 287 p.

8. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poyezdnoy raboty* (Traction rules for train operation), approved by the order of JSC «RZD» from 12.05.2016 № 867r. Moscow, 2016, 515 p.

9. Bronstein I. N., Semendyayev K. A. *Spravochnik po matematike* (Math Handbook). Moscow: Science, 1965. 608 p.

10. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* (Mathematics Handbook for Scientists and Engineers). Moscow: Science, 1974. 832 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бакланов Александр Алексеевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.
Тел.: +7 (3812) 31-34-19.
E-mail: aleksbakl@mail.ru

Шиляков Андрей Петрович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.
Тел.: +7 (3812) 31-34-19.
E-mail: ShilyakovAP@omgups.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Baklanov Alexandr Alexeevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.
Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the department «Electric Railways Rolling Stock», OSTU.
Phone: +7 (3812) 31-34-19.
E-mail: aleksbakl@mail.ru
.

Shilyakov Andrey Petrovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.
Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the department «Electric Railways Rolling Stock», OSTU.
Phone: +7 (3812) 31-34-19.
E-mail: ShilyakovAP@omgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Бакланов, А. А. Энергетическая эффективность рекуперативного торможения пассажирских электровозов постоянного тока [Текст] / А. А. Бакланов, А. П. Шиляков // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 2 (38). – С. 23 – 33.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Baklanov A. A., Shilyakov A. P. The regenerative braking energy efficiency of DC passenger electric locomotives. Journal of Transsib Railway Studies, 2019, vol. 2, no. 38, pp. 23 – 33 (In Russian).

УДК 534.134

А. Ю. Портной, О. В. Мельниченко, К. П. Селедцов, А. О. Линьков
Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), г. Иркутск, Российская Федерация

ОСОБЕННОСТИ ВИБРАЦИИ, ВОЗНИКАЮЩЕЙ В ПАРЕ «КОЛЕСО ЭЛЕКТРОВОЗА – РЕЛЬС» В КРИВЫХ МАЛОГО РАДИУСА

Аннотация. *Статья посвящена экспериментальному исследованию параметров вибраций, возникающих при вписывании в кривые малого радиуса, при помощи вибропреобразовательных датчиков. Представлены значения амплитуд виброускорений с математической обработкой и анализом данных. Приведены результаты исследования амплитуды вибрации, возникающей на буксе электровоза при взаимодействии колеса и рельса на горно-перевальном участке с большим количеством кривых малого радиуса. Установлено, что при вписывании в кривую малого радиуса даже в режиме выбега возникает псевдослучайная вибрация, по уровню превышающая вибрацию при прохождении стыка на прямом участке пути, а по времени эта вибрация является непрерывной. В режимах тяги также регистрируются гармоники, связанные с частотой зубчатой передачи. Спектральная плотность виброускорений представлена в трехмерном виде, кодируется цветом на двумерной диаграмме «время – частота» для оценки спектров колебаний и их вероятных источников.*

Ключевые слова: *тяговый подвижной состав, вибрация, система «колесо электровоза – рельс», вибрационное воздействие, кривые малого радиуса, тяга поездов, вейвлет-анализ.*

Aleksandr Y. Portnoy, Oleg V. Melnichenko, Konstantin P. Seledtsov, Aleksey O. Linkov
Irkutsk State Transport University (ISTU), Irkutsk, the Russian Federation

FEATURES OF VIBRATION ARISING IN A PAIR OF «ELECTRIC LOCOMOTIVE WHEEL – RAIL» IN CURVES OF SMALL RADIUS

Abstract. *The paper is vibration investigation in a case of guiding of railroad vehicle in curves with low radius. Experimental methods. Examine results of the investigation of vibrations on box bearing of railroad locomotive in a case of mountain trucking with large count of curves with low radius. It is show, that in a case of locomotive guiding in a low radius curves a pseudo-random vibration arise. The level of the pseudo-random vibration in a low radius curves exceeds the vibration in the rail joint, but vibration in the guiding is semi continuous. In a case of locomotive working, also the harmonics of gearing is shown. The spectral density of vibration accelerations is presented in a three-dimensional form, coded in color on a two-dimensional time-frequency diagram for estimating the vibration spectra and their probable sources.*

Keywords: *traction rolling stock, vibration, "wheel – rail" system, vibration impact, small radius curves, traction trains, wavelet analysis.*

В настоящее время уменьшение количества отказов элементов тягового подвижного состава в эксплуатации с обеспечением увеличения скорости поездов является приоритетной задачей в сфере железнодорожного транспорта [1]. Взаимодействие в системе «колесо электровоза – рельс», особенно в кривых малого радиуса, до сих пор остается лимитирующим фактором, ограничивающим как скорость движения, так и надежность рельсов и подвижного состава. В связи с ростом процессов грузоперевозок, в том числе весов поездов, и соответственно возрастающих нагрузок на тяговое оборудование локомотивов одним из актуальных неизбежных требований является обеспечение безотказной работы техники. Исследование вибрационного воздействия пути на тяговый подвижной состав в условиях кривых малого радиуса позволит выявить причины критического износа колеса и рельса в кривых малого радиуса, а также причины возникающих вибраций на деталях локомотивов и в дальнейшем разработать инженерные решения для уменьшения амплитуд вибраций или уменьшения влияния вибраций на надежность пути и подвижного состава.

Наличие вибрационных колебаний в сложных системах, особенно с повышенными амплитудами, приводит к резкому уменьшению срока службы механического оборудования и конструкций [2]. В качестве только одного из примеров можно привести кожух зубчатой передачи колесно-моторного блока грузового электровоза, на который непосредственно передаются вибрации при моторно-осевом подвешивании.

Наиболее полно взаимодействие пары «колесо электровоза – рельс» отражено в работе [3], однако в ней отсутствуют данные о характеристиках вибрационных возмущений, особенно в кривых малого радиуса.

Исследование фрикционного взаимодействия в системе «колесо электровоза – рельс» обычно проводится с точки зрения предельно возможной тяги на прямых участках пути, при этом вибрацией, возникающей дополнительно в кривых малого радиуса, пренебрегают [4].

Использование же гребнесмазывания колеса и (или) рельса в горно-перевальных условиях [5] является недостаточным, поскольку возможное попадание смазки на поверхность качения рельса резко уменьшает силу тяги локомотива.

Целью данной работы являлось экспериментальное исследование характеристик вибраций, возникающих при вписывании в кривые малого радиуса.

Вибрация, возникающая при работе машин и механизмов, является одним из определяющих факторов надежности их элементов. В практически важных случаях вибрация приводит к самораскручиванию элементов конструкции, трещинообразованию и т. п.

Традиционно считается, что основная вибрация, влияющая на подвижной состав железных дорог, возникает в районе стыков рельсов. С введением бесстыкового пути с длиной плетей около 2 км влияние вибрации на стыках, естественно, падает. Диапазоны частот и

максимальные амплитуды ускорения вибраций для различных условий эксплуатации приведены в ГОСТ 30631-99 [6], который устанавливает единые требования по стойкости к механическим внешним воздействующим факторам для технических изделий. Требования представлены в виде групп механического исполнения, для каждой из которых установлены конкретное описание условий применения, а также виды и значения механических внешних воздействующих факторов.

Для необрессоренных изделий тележек транспортных средств железнодорожного транспорта механического исполнения М27 предъявляется ряд требований.

По стойкости изделий к воздействию номинальных механических внешних воздействующих факторов предъявляются следующие технические требования:

– диапазон частот синусоидальных вибраций – 0,5 – 100 Гц;

– максимальная амплитуда ускорения синусоидальных вибраций – 150 (15) м/с^2 (g).

Предельные рабочие значения механических внешних воздействующих факторов:

– диапазон частот синусоидальных вибраций – 100 – 500 Гц;

– максимальная амплитуда ускорения синусоидальных вибраций – 40 (4) м/с^2 (g).

При анализе причин вибраций, возникающих на электровозе, необходимо учитывать сложность самой системы; наличие зубчатых передач, имеющих свой спектр частот; набор зазоров; наличие мощного магнитного поля, способного изгибать оболочки [7].

Разработка такой достаточно сложной модели без экспериментальных данных затруднительна. Получение экспериментальных данных о вибрации с их последующей интерпретацией необходимо для понимания причин, приводящих к выходу из строя элементов системы.

В настоящее время появилась возможность измерения длительных сигналов вибрации в практически непрерывном режиме с документированием вибрационных сигналов в файлах [8]. При этом после измерения сигнал может быть преобразован в удобную для рассмотрения форму. В настоящей работе использовалась аналогичная система, позволяющая по восьми каналам собирать информацию с частотой дискретизации 12,8 кГц.

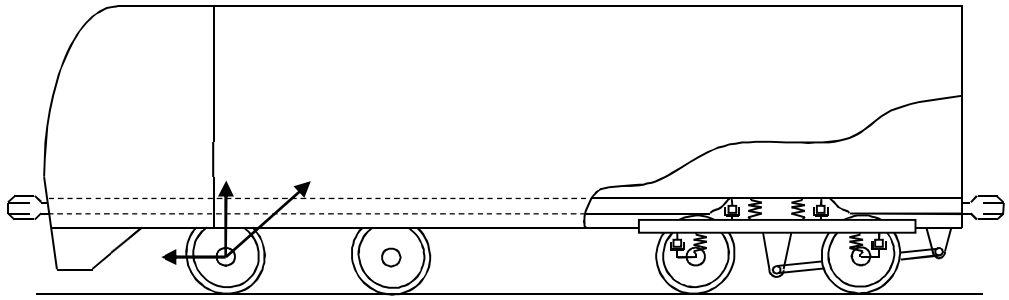
Измерение вибраций осуществлялось на электровозе 3ЭС5К «Ермак» при помощи вибропреобразователя АР-2038-100. Упрощенная схема головной секции электровоза 3ЭС5К «Ермак» в соответствии с руководством [9] представлена на рисунке 1,а. Данный электровоз имеет двухступенчатое подвешивание, которое показано на примере задней тележки. Установка вибропреобразователя производилась на буксу первой колесной пары (рисунок 1,б). Оси вибропреобразователя представлены на рисунке 1,а: X – ось поперек пути; Y – ось вдоль пути; Z – вертикальная ось.

Электровоз, на котором производились измерения, был предоставлен после проведения ТР-1 и обточки бандажей колесных пар.

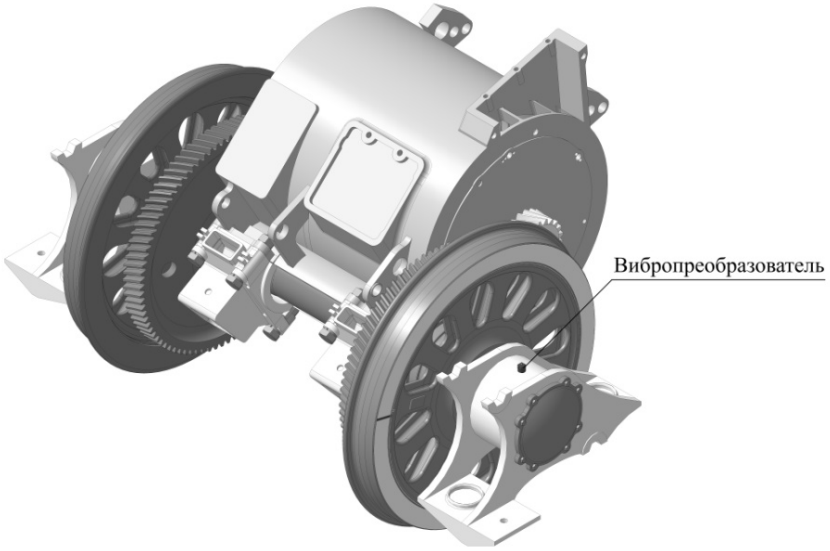
Расчетные собственные частоты первой и второй ступеней рессорного подвешивания электровоза 3ЭС5К «Ермак» составляют от 0,4 до 2 Гц.

На рисунке 2 представлены диаграммы скорости и тока двигателя электровоза 3ЭС5К-034 с поездом массой 6900 т при опытной поездке на участке Большой Луг – Подкаменная в режиме подталкивания. Температура воздуха от + 5 до + 10 ºС, погода ясная, рельсы сухие.

В нижней части рисунка приведен упрощенный профиль пути.



а



б

Рисунок 1 – Расположение вибропреобразователя на буксе колесной пары: а – упрощенная схема головной секции электровоза 3ЭС5К «Ермак»; б – расположение преобразователя на буксе колесной пары (зубчатая передача представлена без кожухов)

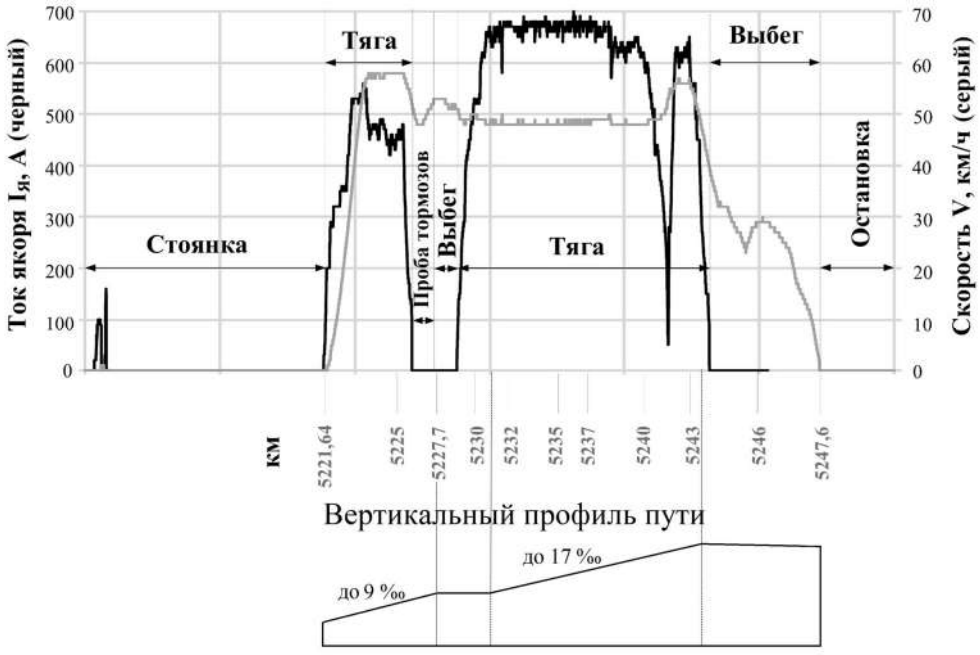


Рисунок 2 – Параметры работы электровоза 3ЭС5К-034 с поездом № 2326 при опытной поездке 25.10.2017

Параметры измерений соответствовали типовым хорошим условиям на данном участке. Путь является в большей части бесстыковым, рельс Р65. Железобетонные шпалы уложены по стандарту: 1840 шпал на 1 км в прямых участках пути и 2000 шпал на 1 км в кривых участках пути.

Типовые дефекты на участках с кривыми малого радиуса:

боковой износ головки на внешнем рельсе (код дефекта 44 по инструкции [10]), где типовым режимом является выбег;

боковой износ головки на внешнем рельсе и волнообразный износ на внутреннем рельсе (код дефекта 40 по инструкции [10]), где типовым режимом является режим тяги или режим рекуперативного торможения.

На участках, где рельс имеет боковой износ от 15 до 20 мм, установлена максимально допустимая скорость 50 км/ч.

Типовая длина рифлей в кривых малого радиуса составляет 0,2 – 0,6 м, типовая глубина – 2 мм (двойная амплитуда).

В ходе опытной поездки регистрировались виброускорения на буксе. На рисунках 3 – 5 приведены среднеквадратические значения ускорений на буксе по осям *X*, *Y*, *Z* соответственно.

В верхней части рисунков в виде условных обозначений приведены направления, радиусы поворотов и длины участков с поворотами.

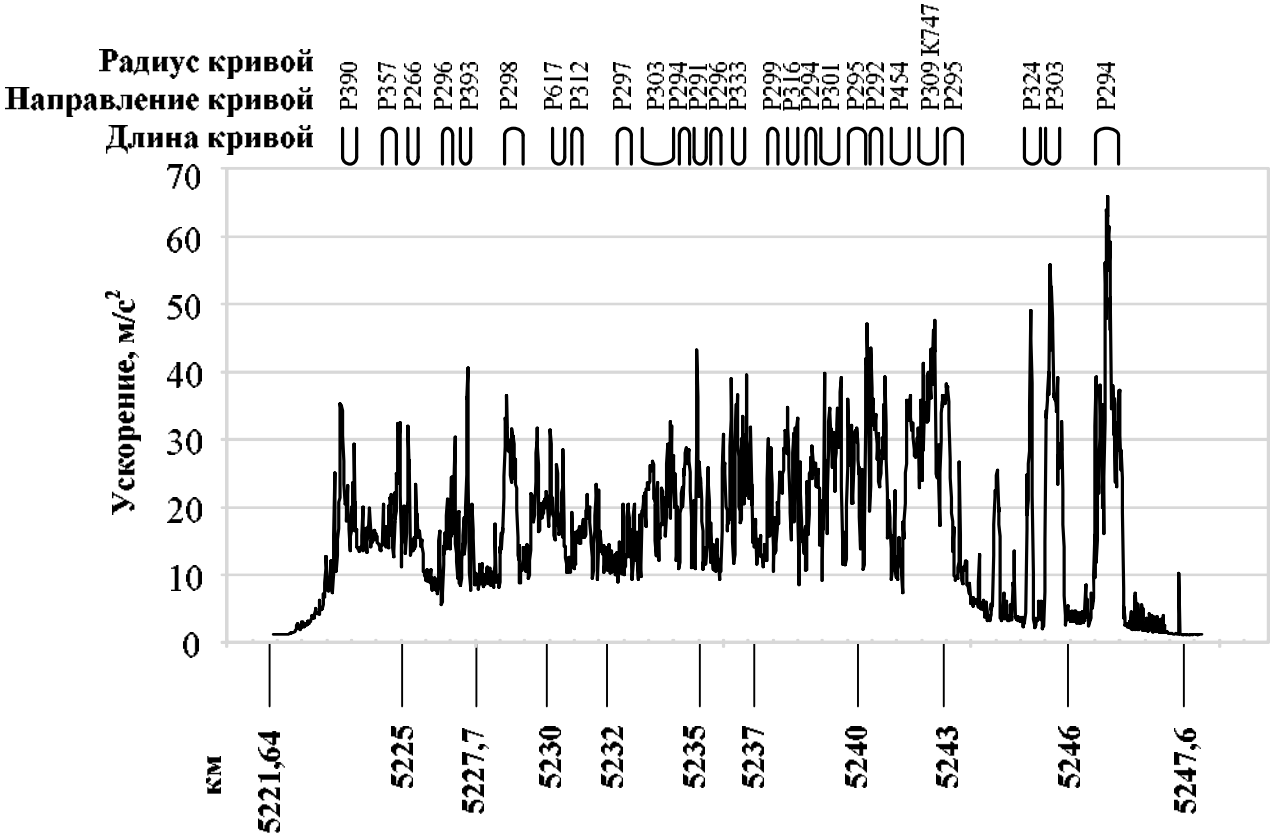


Рисунок 3 – Зависимость среднеквадратичных значений ускорений на буксе колесной пары по оси *X*

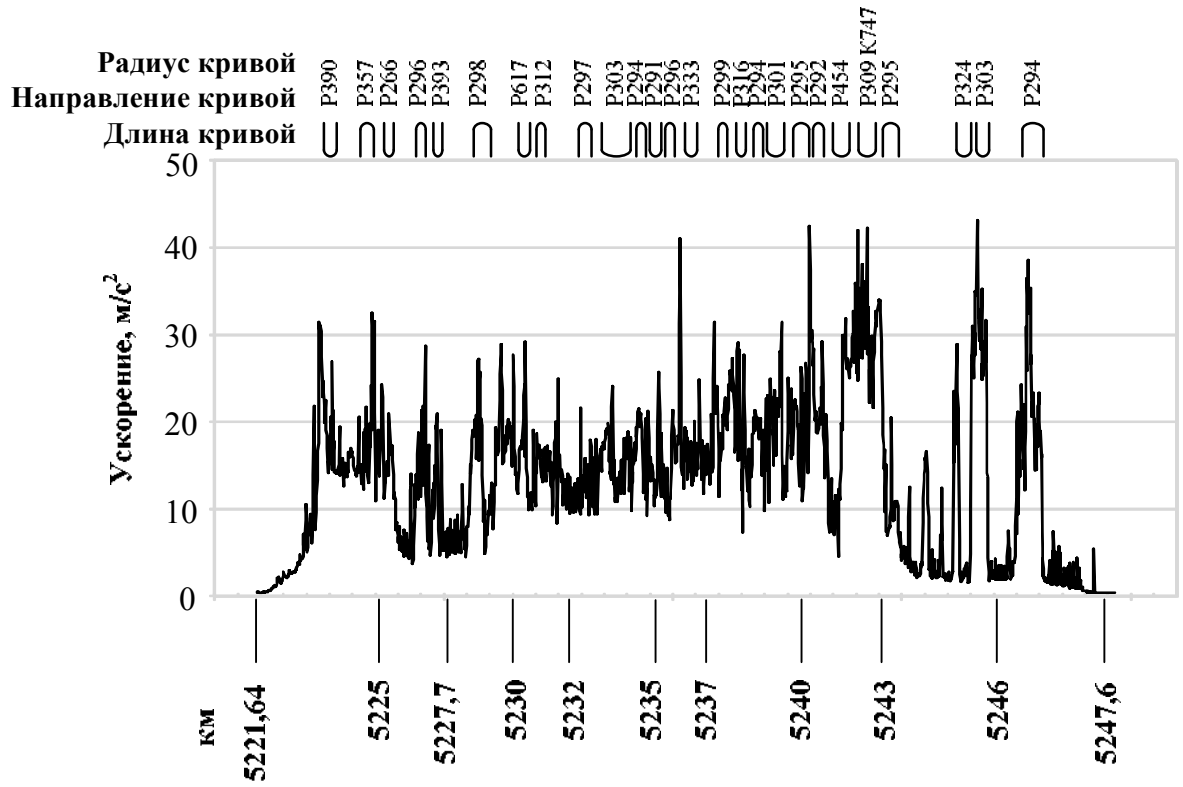


Рисунок 4 – Зависимость среднеквадратичных значений ускорений на буксе колесной пары по оси *Y*

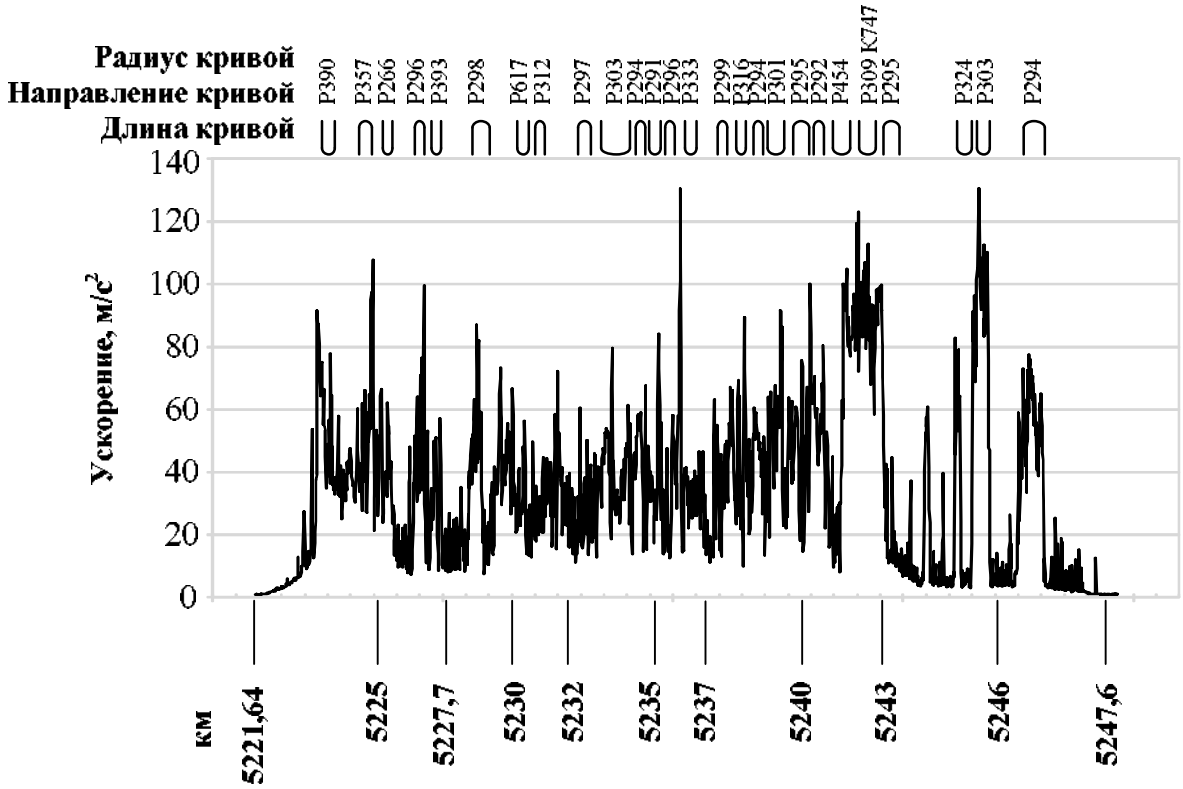


Рисунок 5 – Зависимость среднеквадратичных значений ускорений на буксе колесной пары по оси *Z*

Даже по предварительным данным измерения среднеквадратичных значений виброускорений видно, что как только электровоз входит в кривую малого радиуса, резко возрастает уровень вибрации.

На рисунке 6 представлены зависимости амплитуды ускорений на буксе от времени по трем координатам, полученные при прохождении стыка на прямом участке стыкового пути.

Характер сигнала и анализируемого спектра в прямых участках пути не дает оснований списывать дальнейшую возникающую вибрацию на радиальные биения колеса.

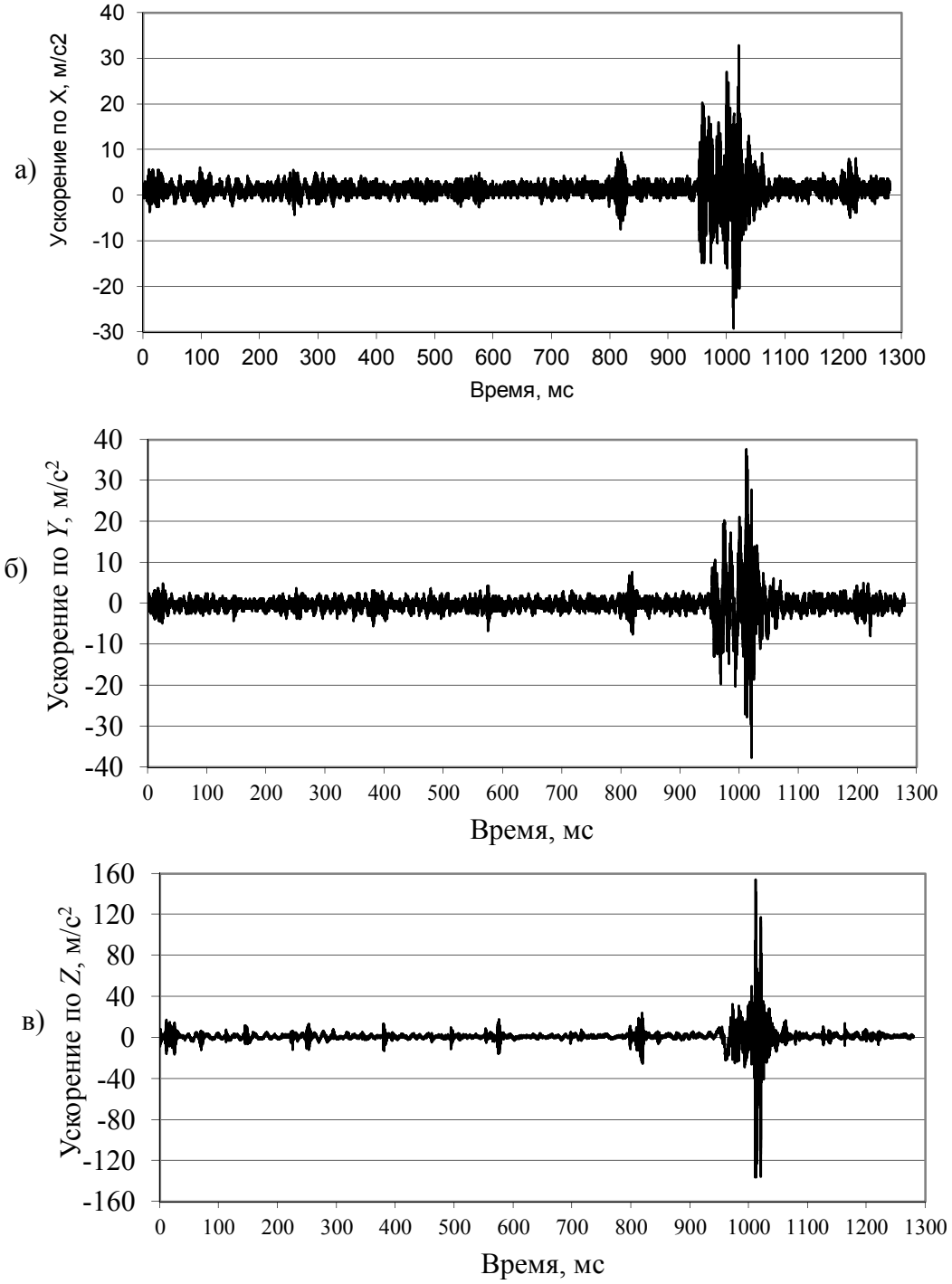


Рисунок 6 – Зависимость амплитуды ускорений на буксе от времени по трем координатам при прохождении стыка на прямом участке стыкового пути

На рисунках 7, 8 представлены зависимости амплитуды ускорений на буксе от времени по трем координатам, полученные при вписывании в кривую радиусом 300 м по внутреннему и внешнему рельсам соответственно. Данные получены в режиме выбега при скорости около 30 км/ч. Режим выбега в кривой выбран для упрощения анализа колебаний, возникающих именно в кривых. На указанных участках в режиме выбега был подрез внешнего рельса, визуально рифли зафиксированы не были.

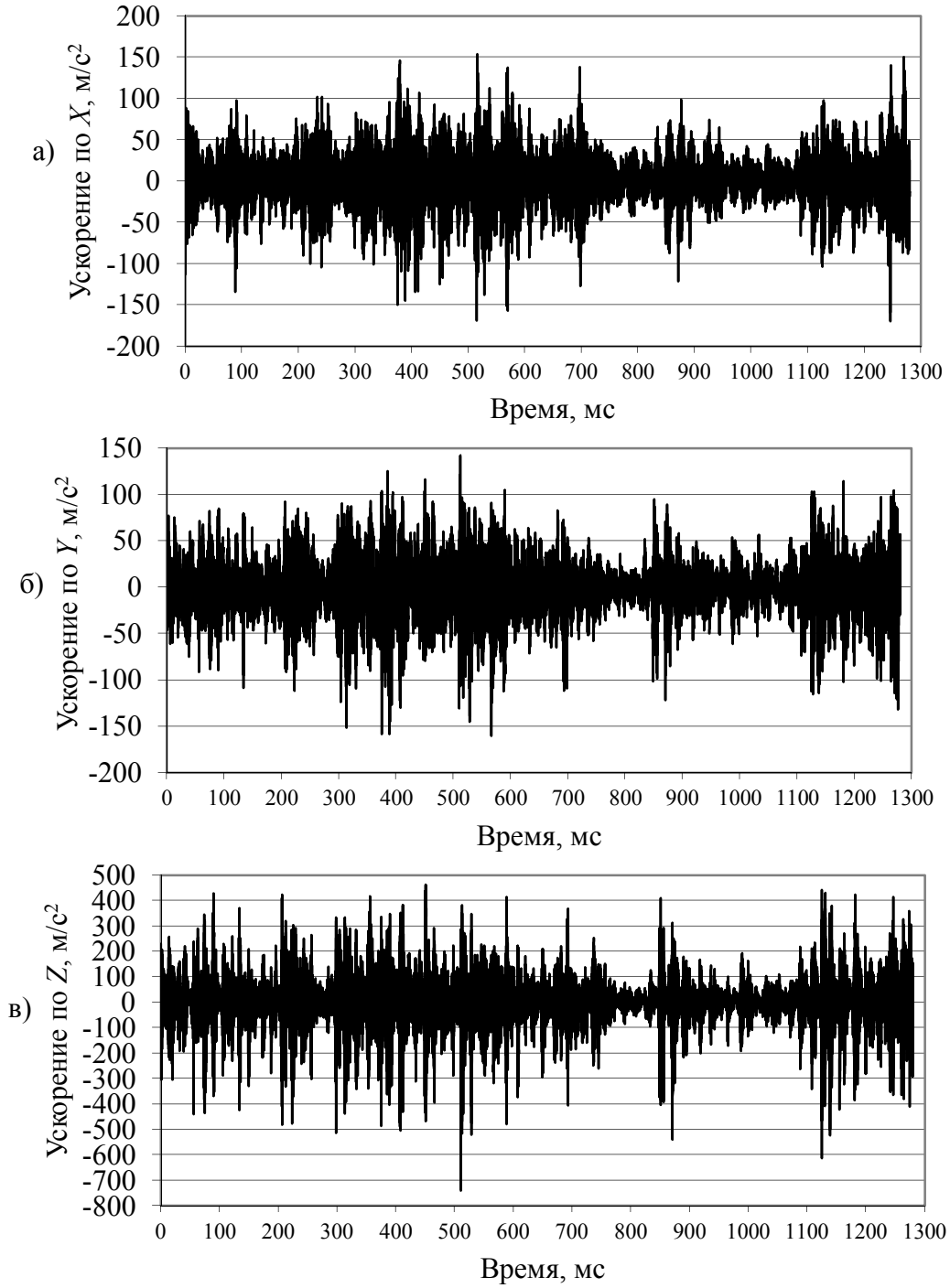


Рисунок 7 – Зависимость амплитуды ускорений на буксе от времени по трем координатам при вписывании в кривую радиусом 300 м по внутреннему рельсу в режиме выбега

Тем не менее вид ускорения по оси *Z* как по внутреннему, так и по внешнему рельсу в режиме выбега дает основание предположить, что происходит процесс набегания гребня колеса на рельс с последующими резким срывом и ударом. Так как частота ударов лишь условно периодическая (псевдопериодическая), то в спектре сигнала четко выделить данные частоты не удалось, даже применяя метод огибающих.

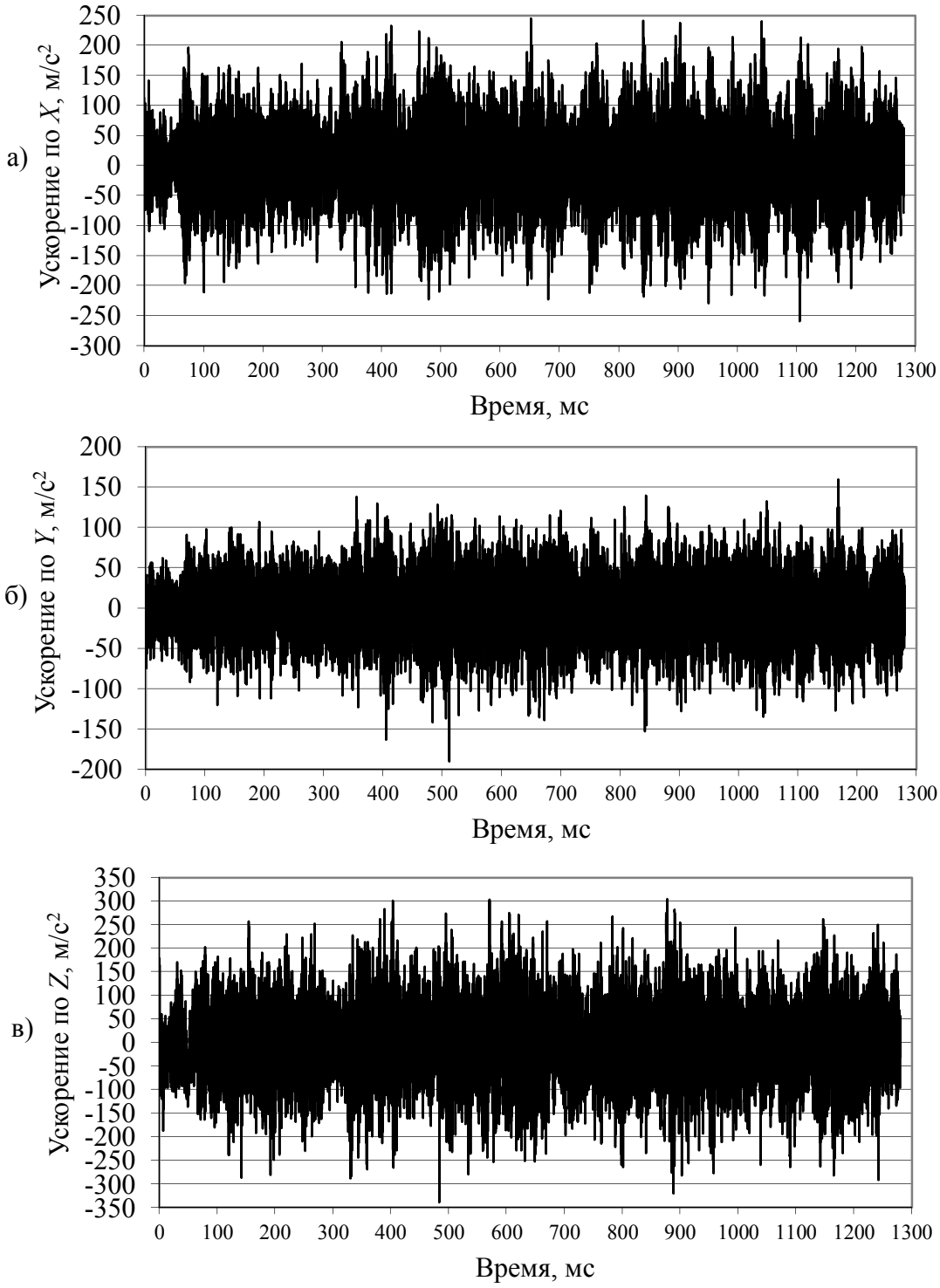


Рисунок 8 – Зависимость амплитуды ускорений на буксе от времени по трем координатам при вписывании в кривую радиусом 300 м по внешнему рельсу в режиме выбега

Очевидно, что вибрация в кривых малого радиуса даже на выбеге возрастает настолько, что подходит к предельным значениям по ГОСТ 30631-99.

Спектральный анализ [11] является одним из мощных средств анализа колебательных процессов, в том числе при анализе вибрационных колебаний [12].

На рисунках 9 и 10 показаны спектры виброускорений в режимах тяги при вписывании в кривую большого радиуса и выбега в условиях вписывания в кривую малого радиуса (300 м) соответственно. В режиме тяги четко видны гармоники 1 – 4 зубчатой частоты. Спектр вибрации при вписывании в кривую малого радиуса является широкополосным без преимущественно выделенных гармоник, что также позволяет говорить о большом количестве псевдослучайных событий типа ударов, приводящих к вибрации.

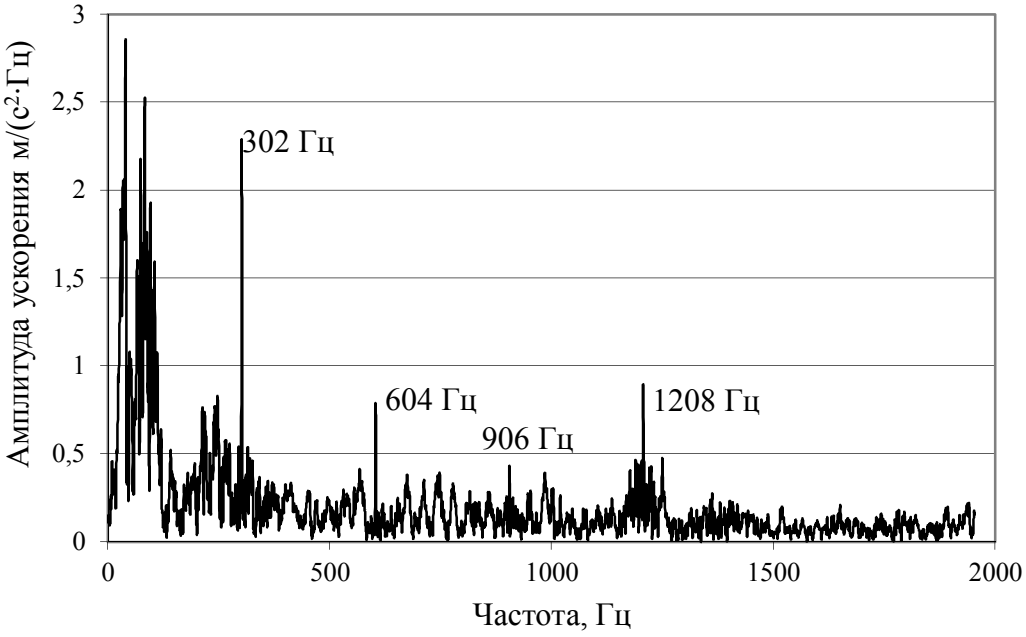


Рисунок 9 – Спектр при вписывании в кривую большого радиуса в режиме тяги по оси *Z*

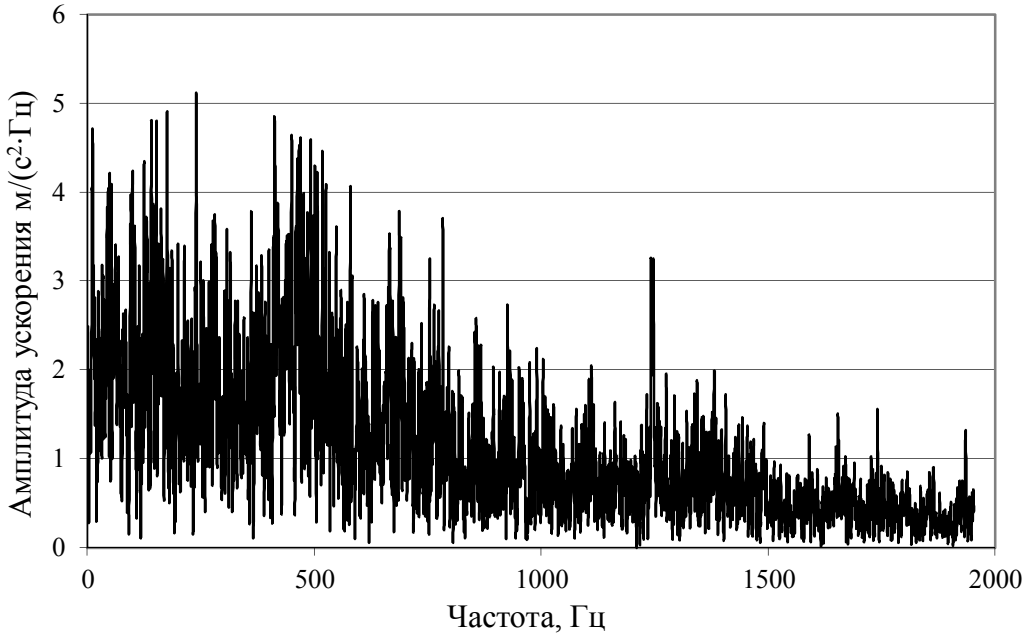


Рисунок 10 – Спектр при вписывании в кривую в режиме выбега по оси *Z*, соответствующий временной части рисунка 8

Ручной анализ большого количества спектров является трудоемким и сложным для понимания, поэтому для последующего анализа многочисленных спектров вибраций применялся следующий способ.

Кадр измерений за 1, 2 с подвергался Фурье-преобразованию (с разрешением по частоте примерно 0,8 Гц). В дальнейшем спектральная плотность виброускорений кодировалась цветом в логарифмическом масштабе и наносилась на график зависимости спектральной плотности виброускорений от времени. На данных зависимостях приведены направления поворотов и их радиусы, что позволяет достаточно четко различать вибрации от пути и от механизмов колесно-моторного блока. Полученный трехмерный график для печати «на бумаге» удобнее представлять, если амплитуду спектральной плотности ускорений кодировать цветом.

Такой способ построения спектральных данных может быть рассмотрен как способ вейвлет-преобразования со стандартным для спектрального анализа гармоническим базисом [13].

На рисунках 11 – 13 представлены зависимости спектральной плотности амплитуды ускорения вибрации буксы колесной пары по осям *X*, *Y*, *Z* от времени.

При таком рассмотрении гармоники зубчатой передачи представляют собой кривые, пропорциональные скорости, а широкополосные спектры от вписывания с увеличенной амплитудой вибрации представлены как вертикальные полосы. Горизонтальные полосы, которые могли бы быть связаны с резонансами конструкции электровоза на конкретных звуковых частотах, отсутствуют по сравнению с вибрацией, возникающей в паре «колесо электровоза – рельс».

Очевидно, что рассматриваемый колесно-моторный блок электровоза должен быть устойчивым к вибрациям, возникающим при его работе, в диапазоне примерно до 2 кГц, что по частоте выше, чем вибрации, определяемые по ГОСТ 30631-99 группой М27.

Следует отметить, что надежность узлов локомотивов, работающих на горно-перевальных участках с большим количеством кривых малого радиуса, будет меньше, чем у локомотивов, работающих на равнинных участках из-за гораздо большей вибрации, поэтому и межремонтные пробеги для локомотивов, работающих в существенно разных условиях, должны быть разными. Учет вибрации, возникающей в кривых малого радиуса с большей, чем по группе М27, частотой, в будущем необходим для оптимизации механических узлов тягового подвижного состава.

Полученные данные по вибрации, возникающей в кривых малого радиуса на бесстыковом пути, говорят о том, что нет оснований считать переход к бесстыковому пути эффективной мерой подавления вибрации для кривых малого радиуса, поскольку возникающие колебания в ряде случаев являются близкими к предельным и их спектр значительно шире, чем указано в ГОСТе [6].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ОАО «РЖД» в рамках научного проекта № 17-20-01059/18.

В статье представлены результаты исследования амплитуды вибрации, возникающей на буксе электровоза при взаимодействии колеса и рельса на горно-перевальном участке с большим количеством кривых малого радиуса.

При вписывании в кривую малого радиуса даже в режиме выбега возникает случайная вибрация, по уровню превышающая вибрацию при прохождении стыка на прямом участке пути, а по времени эта вибрация является непрерывной. В режимах тяги регистрируются также гармоники, связанные с частотой зубчатой передачи.

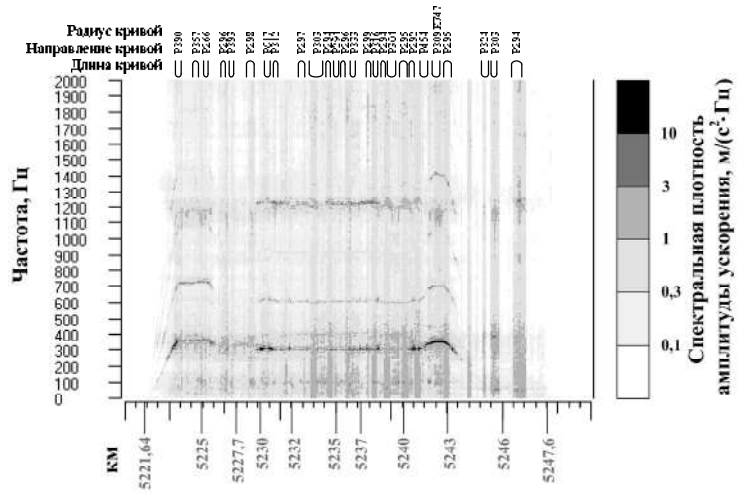


Рисунок 11 – Зависимость спектральной плотности амплитуды ускорения вибрации буксы колесной пары от времени по оси *X*

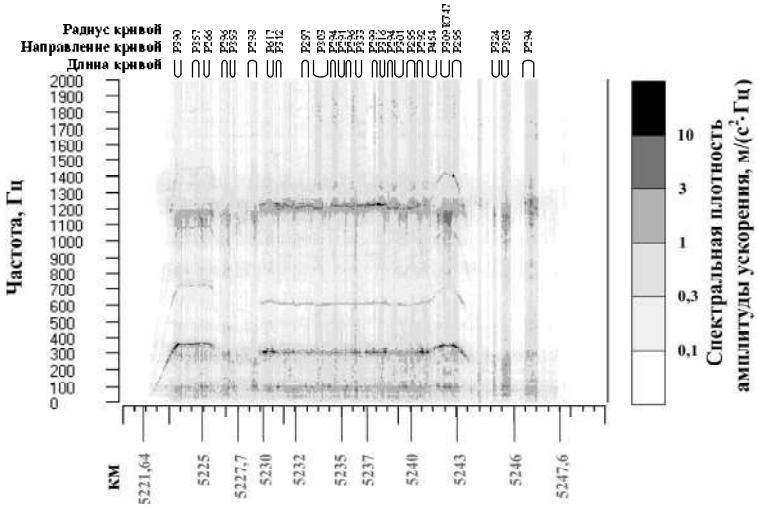


Рисунок 12 – Зависимость спектральной плотности амплитуды ускорения вибрации буксы колесной пары от времени по оси *Y*

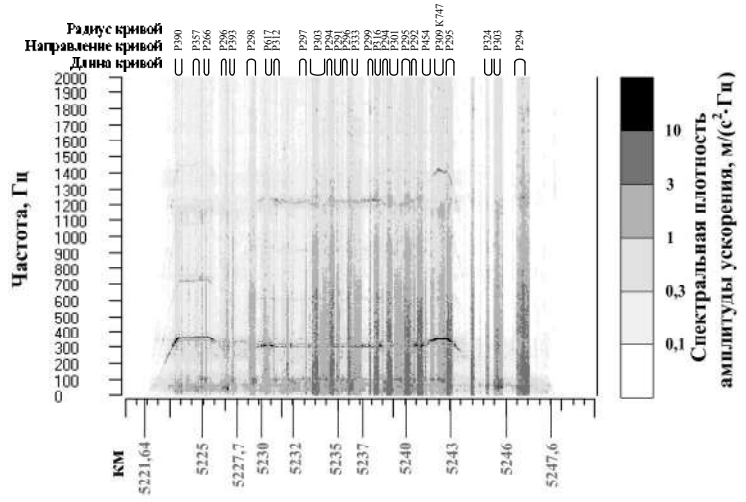


Рисунок 13 – Зависимость спектральной плотности амплитуды ускорения вибрации буксы колесной пары от времени по оси *Z*

Полученные данные позволяют предположить, что надежность локомотивов, работающих в условиях горно-перевальных участков, будет существенно меньше таковой при работе на равнинных участках. Указанные данные могут использоваться в целях оценки многоцикловой усталости сборных и сварных конструкций элементов колесно-моторного блока.

Список литературы

1. Стратегия научно-технологического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2025 года. «Белая книга» [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2015. – 63 с. Режим доступа: http://www.rzd-expo.ru /innovation / BelKniga_2015. pdf. (Дата обращения: 14.01.2019).

2. Вибрации в технике: Справочник: В 6 т. [Текст] / Под ред. В. Н. Челомея. – М.: Машиностроение, 1978. – Т. 1. – 352 с.

3. Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса: Пер. с англ. [текст] / У. Дж. Харрис, С. М. Захаров и др. М.: Интекст, 2002. – 408 с.

4. Самме, Г. В. Фрикционное взаимодействие колесных пар локомотива с рельсами. Теория и практика сцепления локомотива: Монография [Текст] / УМЦ ЖДТ. – М., 2014. – 104 с.

5. Черняк, А. Ю. Проблема износа трибосистемы «колесо – рельс» [Текст] / А. Ю. Черняк, Е. О. Гриндей // Вісник Хмельницького національного університету. – № 6. – 2014 (219).– С. 53 – 58.

6. ГОСТ 30631-99. Межгосударственный стандарт. Общие требования к машинам, приборам и другим техническим изделиям в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам при эксплуатации [Электронный ресурс] / Техэксперт URL: http://docs.cntd.ru/document/gost-30631-99 (Дата обращения: 20.01.2019).

7. Вибрации в технике: Справочник: В 6 т. [Текст] / Под ред. В. Н. Челомея. – М.: Машиностроение, 1980. – Т. 3. – 544 с.

8. Лукьянов, А. В., Система защиты обрабатывающих центров от опасных динамических нагрузок на основе параметров вибрации и силы [Текст] / А. В. Лукьянов, Д. П. Алейников, А. Ю. Портной // Вестник Иркутского гос. техн. ун-та / Иркутский гос. техн. ун-т. – Иркутск. – 2017. – Т.21. – № 4 (123). – С. 30 – 38.

9. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К): Руководство по эксплуатации [Текст] / Новочеркасский электровозостроительный завод. – Новочеркасск, 2007. – Т. 1. – 635 с.; Т. 2.– 640 с.

10. Инструкция «Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и остродефектных рельсов», утвержденная распоряжением ОАО «РЖД» от 23.10.2014 № 2499р [Электронный ресурс] / Трудовой десант URL: https://www.tdesant.ru/info/item/144 (Дата обращения: 10.06.2019).

11. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов [Текст] / А. Б. Сергиенко. – СПб.: Питер, 2003. – 604 с.

12. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. [Текст] / Под общ. ред. В. В. Клюева.– М.: Машиностроение, 2005. – Т. 7. – Кн. 2. – 489 с.

13. J. Kovacevic, V.K. Goyal, M. Vetterli. Fourier and Wavelet Signal Processing, *Creative Commons*, 2013, p. 280.

References

1. Strategiiya nauchno-tehnologicheskogo razvitiya holdinga «Rossiiskie zheleznye dorogi» na period do 2020 goda i na perspektivu do 2025 goda. «Belaya kniga» (The strategy of scientific and technological development of the holding «Russian Railways» for the period up to 2020 and to the perspective up to 2025. «White paper») http://www.rzd-expo.ru/innovation/BelKniga_2015.pdf.

2. Chelomej V. N., Bolotin V. V. *Vibratsii v tekhnike: Spravochnik: V 6 t.* (Vibrations in the technique: Reference book in 6 volumes). Moscow: *Engineering*, 1978. Vol. 1. 352 p.

3. U. Dzh. Harris, Zaharov S. M., Dzh. Landgren, H. Turne, V. Jebersen. *Obobshhenie peredovogo opyta tjazhelovesnogo dvizhenija: voprosy vzaimodejstvija kolesa i rel'sa: Per. s angl.* (Generalization of the best practices of heavy traffic: issues of the interaction of the wheel and rail: Trans. from English). Moscow: *Intext*, 2002, 408 p.

4. Samme G. V. *Frikcionnoe vzaimodejstvie kolesnyh par lokomotiva s rel'sami. Teorija i praktika sceplenija lokomotiva: Monografija* (The frictional interaction of the locomotive wheelsets with rails. Theory and practice of locomotive coupling: Monograph). Moscow, 2014, 104 p.

5. Chernjak A. Ju., Grindej E. O. The problem of wear tribosystem "wheel – rail" [Problema iznosa tribosistemy «koleso – rel's»]. *Bulletin of the Khmelnytsky National University*, 2014, no. 6 (219), pp. 53-58.

6. Mezhgosudarstvennyj standart. Obshhie trebovanija k mashinam, priboram i drugim tehnicheskim izdelijam v chasti stojkosti k mehanicheskim vneshnim vozdejstvujushhim faktoram pri jekspluatacii. GOST 30631-99 (Interstate standard. General requirements for machines, instruments and other technical products in terms of resistance to mechanical external factors affecting the operation. State standard 30631-99) http://docs.cntd.ru/document/gost-30631-99.

7. Chelomej V. N., Dimentbeerg F. M., Kolesnikov K. S. *Vibratsii v tekhnike: Spravochnik: V 6 t.* (Vibrations in the technique. Reference book in 6 volumes). Moscow: Engineering, 1980. Vol. 3. 544 p.

8. Luk'janov A. V., Alejnikov D. P., Portnoj A. Ju. *Vibration and force parameter analysis-based system of machining center protection from dangerous dynamic loads* [Sistema zashhity obrabatyvajushhih centrov ot opasnyh dinamicheskih nagruzok na osnove parametrov vibracii i sily]. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2017, no. 4 (123), pp. 30-38.

9. Jelektrovoz magistral'nyj 2JeS5K (3JeS5K). Rukovodstvo po jekspluatacii (Main-line electric locomotive 2ES5K (3ES5K). Operator's manual). Novocherkassk, 2007. Vol. 1. 635 p., vol. 2. 640 p.

10. Instruktsiya «Defekty relsov. Klassifikatsiya, katalog i parametry defektnykh i ostrodefektnykh relsov», utverzhdennaya rasporyazheniyem OAO "RZhD" № 2499r. (Instruction "Defects of rails. Classification, catalog and parameters of defective and sharp-defect rails", approved by the decree of the Russian Railways OJSC № 2499r) https://www.tdesant.ru/info/item/144.

11. Sergiyenko A. B. *Tsifrovaya obrabotka signalov* (Digital signal processing). St. Petersburg, 2003, 604 p.

12. Kljuev V. V., Balickij F. Ja., Barkov A. V., Barkova N. A. *Nerazrushajushhij kontrol': Spravochnik: V 7 t.* (Non-destructive testing: A Handbook: In 7 volumes). Moscow: *Engineering*, 2005. Vol. 7, Book 2. 489 p.

13. J. Kovacevic, V.K. Goyal, M. Vetterli. Fourier and Wavelet Signal Processing, *Creative Commons*, 2013, p. 280.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Портной Александр Юрьевич
Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).
Литвинова ул., д. 9, кв. 11, г. Иркутск, 664003, Российская Федерация.
Доктор физико-математических наук, доцент кафедры «Физика, механика и приборостроение», ИрГУПС.
Тел.: +7 (914) 903-64-19.
E-mail: portnoyalex@yandex.ru

Мельниченко Олег Валерьевич
Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).
Байкальская ул., д. 202/4, кв. 65, г. Иркутск,

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Portnoy Aleksandr Yuryevich
Irkutsk State Transport University (ISTU).
9, Litvinova st., Irkutsk, 664003, the Russian Federation.
Advanced Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department «Physics, Mechanics and Instrument Engineering» (ISTU).
Phone: +7 (914) 903-64-19.
E-mail: portnoyalex@yandex.ru

Melnichenko Oleg Valeryevich
Irkutsk State Transport University (ISTU).
202/4, Baykalskaya st., Irkutsk, 664075, the Russian Federation.

664075, Российская Федерация.
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроподвижной состав».
Тел.: +7 (3952) 63-83-99, доб. 0666.
E-mail: olegmelnval@mail.ru

Селедцов Константин Павлович
Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).
Лермонтова ул., д. 75, к. 328, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.
Аспирант кафедры «Электроподвижной состав».
Тел.: +7 (983) 409-43-93.
E-mail: kostyans7kss@gmail.com

Линьков Алексей Олегович
Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).
Пушкина ул., д. 62а, г. Иркутск, 664039, Российская Федерация.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроподвижной состав».
Тел.: +7 (3952) 63-83-99, доб. 0666.
E-mail: linkovalex@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Портной, А. Ю. Особенности вибрации, возникающей в паре «колесо электровоза – рельс» в кривых малого радиуса / А. Ю. Портной, О. В. Мельниченко, К. П. Селедцов, А. О. Линьков // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 2 (38). – С. 33 – 47.

Advanced Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department «Electric Rolling Stock».
Phone: +7 (3952) 63-83-99, ext. 0666.
E-mail: olegmelnval@mail.ru.

Seledtsov Konstantin Pavlovich
Irkutsk State Transport University (ISTU).
75, Lermontova st., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.
Postgraduate student of the Department «Electric Rolling Stock».
Phone: +7 (983) 409-43-93.
E-mail: kostyans7kss@gmail.com

Linkov Aleksey Olegovich
Irkutsk State Transport University (IrGUPS).
62a, Pushkina st., Irkutsk, 664039, the Russian Federation.
Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department «Electric Rolling Stock».
Phone: +7 (3952) 63-83-99, ext. 0666.
E-mail: linkovalex@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Portnoy A Y., Melnichenko O. V., Seledtsov K. P., Linkov A. O. Features of vibration arising in a pair of "electric locomotive wheel-rail" in curves of small radius. Journal of Transsib Railway Studies, 2019, vol. 2, no. 38, pp. 33 – 47 (In Russian).

УДК 629.42-19(045)

Э. С. Оганьян, Г. М. Волохов, А. С. Гасюк
АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»),
г. Коломна, Российская Федерация

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЛОКОМОТИВОВ ПО УСЛОВИЯМ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Аннотация. *Детерминированная оценка долговечности конструкций железнодорожного подвижного состава по коэффициентам запаса сопротивления усталости, установленная нормативными требованиями, не в полной мере учитывает случайный характер нагрузок, под действием которых происходит накопление усталостных повреждений, интенсивность эксплуатации (наработку), не позволяет оценить ресурс и его исчерпание за срок службы. В то же время с развитием тяжеловесного и высокоскоростного движения, а также в связи с введением в действие технических регламентов задачи оценки и обоснования назначенных сроков службы и ресурса объектов железнодорожного транспорта становятся все более актуальными. Предметом исследования, результаты которого представлены в настоящей статье, являлось сопротивление усталости конструкций базовых частей локомотива. Целью проведенной работы было прогнозирование их предельного состояния по ресурсу критических элементов. В представленной работе выполнены расчетно-экспериментальные исследования с проведением ходовых динамико-прочностных испытаний локомотива во всем диапазоне рабочих скоростей его движения, определением напряженно-деформированного состояния конструкций методом тензометрирования, расчетом коэффициентов запаса прочности с вероятностной оценкой сопротивления усталости деталей. По полученным результатам показано влияние характеристик эксплуатационной нагруженности на запас сопротивления усталости и его исчерпание по мере наработки*

объекта. По результатам проведенной работы можно сделать выводы о том, что основные показатели прочности, ресурса и срока службы локомотива дают возможность сопоставить и связать между собой их определяющие параметры для последующего анализа, обоснования, нормирования и управления ресурсом безопасной эксплуатации железнодорожной техники.

Ключевые слова: *нагруженность, предел выносливости, динамические напряжения, сопротивление усталости, наработка, среднесуточный пробег, ресурс.*

Eduard S. Oganyan, Grigory M. Volokhov, Aleksandr S. Gasyuk
JSC "Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock"
(JSC "VNIKTI"), Kolomna, Russian Federation

THE LOCOMOTIVES LOAD-BEARING CONSTRUCTIONS RESOURCE PREDICTION BY OPERATING CONDITIONS

Abstract*. The deterministic evaluation of the durability of railway rolling stock structures according to fatigue safety factors, established by regulatory requirements, does not fully take into account the random nature of loads that cause the accumulation of fatigue damages, the operation rate (operating time), does not allow to evaluate the operating life and its depletion over the service lifetime. At the same time, with the development of heavy and high-speed traffic, as well as due to the introduction of technical regulations, the task to evaluate and substantiate the assigned service lifetime and operating life of railway vehicles are becoming more important. The subject of the study, the results of which are presented in this article, was the fatigue strength of elements of locomotive basic parts. The purpose of the work was the prediction of their limit state by the operating life of critical elements. In the present work, design and experimental studies have been performed with running dynamic and strength tests of the locomotive in the entire range of operating speeds of its running, determining the stress-strain state of structures using strain-gauge methods, calculating safety factors with the probabilistic estimate of the fatigue strength of parts. According to results obtained, the influence of the operation loading performance on the fatigue strength margin and its depletion during the element operating life is shown. According to the results of this work, it can be concluded that main indicators of the strength, operating life and service lifetime of the locomotive make it possible to compare and link their key parameters for the subsequent analysis, substantiation, rating and control of safe operating life of railway equipment.*

Keywords*: loading, endurance limit, dynamic stresses, fatigue strength, operating time, average daily run, operating life.*

Объекты железнодорожной техники, их критические элементы и другие ответственные детали во время эксплуатации подвергаются статическим, квазистатическим и динамическим нагрузкам, вызывающим упругие и упругопластические деформации в отдельных зонах и элементах деталей, работают в условиях тепловых воздействий и низких температур, износа и коррозии. При этом накопление повреждений в материале под действием указанных факторов не должно приводить к внезапным отказам и полной потере работоспособности объектов и их элементов, что изначально должно обеспечиваться принятыми методами проектирования, нормативными требованиями к прочности и ресурсу, а также правилами эксплуатации, технического обслуживания и ремонта [1, 2].

Для разработки научно-методических подходов к решению задач обеспечения и подтверждения прочности, ресурса, надежности и безопасности железнодорожной техники на различных этапах жизненного цикла в течение заданного срока ее эксплуатации в заданных условиях [3, 4] необходимо совершенствование численных и экспериментальных методов анализа нагруженности, напряженно-деформированного и предельного состояния объектов железнодорожной техники с учетом геометрической и физической нелинейностей процессов накопления повреждений на основе более полного учета спектра эксплуатационных воздействий, исследования многофакторной деградации свойств материалов [5 – 7].

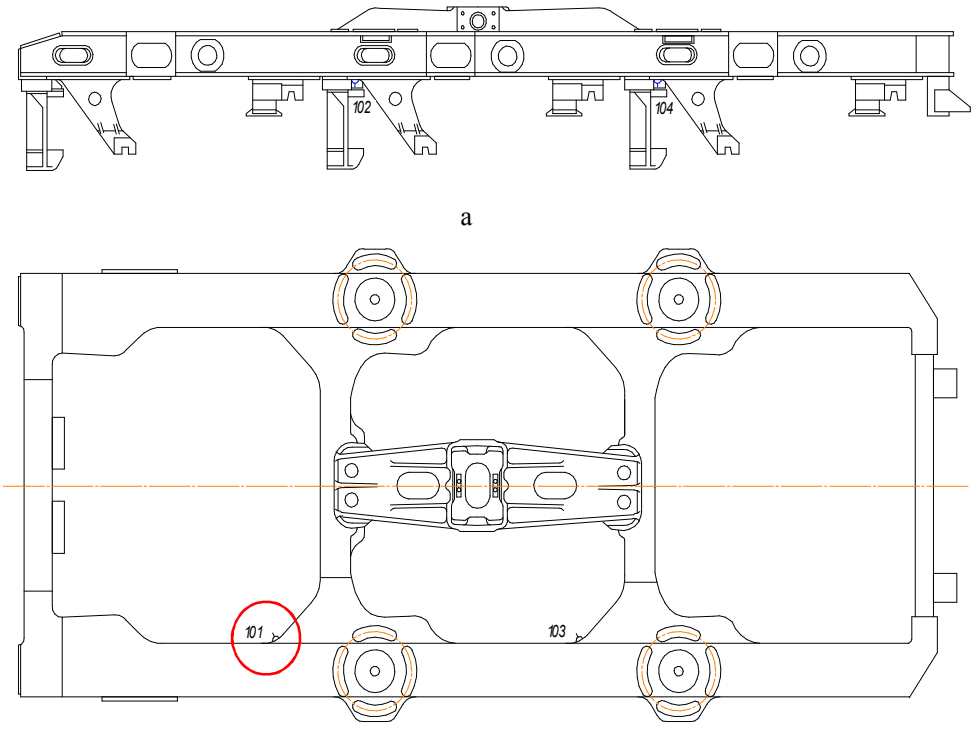
Представленный в настоящей статье материал является частью решения поставленных задач.

При длительном циклическом нагружении детали в металле происходят процессы, обусловленные усталостью (накопление микропластических деформаций, возникновение дислокаций, смещения зерен, микроочаговое «разрыхление» решетки кристаллов), которые приводят к его разупрочнению и появлению микро- и макротрещин.

По действующим нормативным требованиям [1] методика оценки сопротивления усталости несущих конструкций локомотивов предусматривает определение запаса прочности при его минимальной допускаемой величине $[n_\sigma]$, равной 2,0. Она обоснована результатами исследований и анализа технического состояния деталей, подтверждена многолетним опытом эксплуатации локомотивов и соответствует конструкторско-технологическим особенностям экипажной части локомотивов, а также сложившимся условиям их эксплуатации. Однако коэффициент запаса не в полной мере учитывает случайный характер эксплуатационных нагрузок, под воздействием которых происходит накопление усталостных повреждений, не позволяет оценить ресурс и судить о вероятности появления трещины в конструкции или степени такого риска за срок ее службы. В то же время в условиях увеличения нагруженности конструкций с развитием тяжеловесного и скоростного движения, а также в связи со старением подвижного состава и выработкой назначенных сроков службы эти показатели в ближайшей перспективе на железнодорожном транспорте наряду с прочностью и надежностью становятся определяющими [2, 5].

В этих условиях является актуальным применение вероятностных методов расчета на прочность при переменных напряжениях, учитывающих случайный характер действующих нагрузок, вариативность характеристик сопротивления усталости материалов и деталей, а также технологические (вызывающие концентрации напряжений, остаточные напряжения, дефекты в результате сварки, литья и других операций) и эксплуатационные (характер воздействий, интенсивность использования и др.) факторы на основе проведения комплекса теоретических и экспериментальных исследований.

Расчет коэффициента запаса n_σ в зависимости от наработки (среднесуточного пробега локомотива) выполняется с использованием характеристик сопротивления усталости детали (по результатам стендовых испытаний на усталость) и эквивалентной амплитуды динамических напряжений при натурном тензометрировании (рисунок 1) от эксплуатационных нагрузок $\sigma_{аэ}$.



а

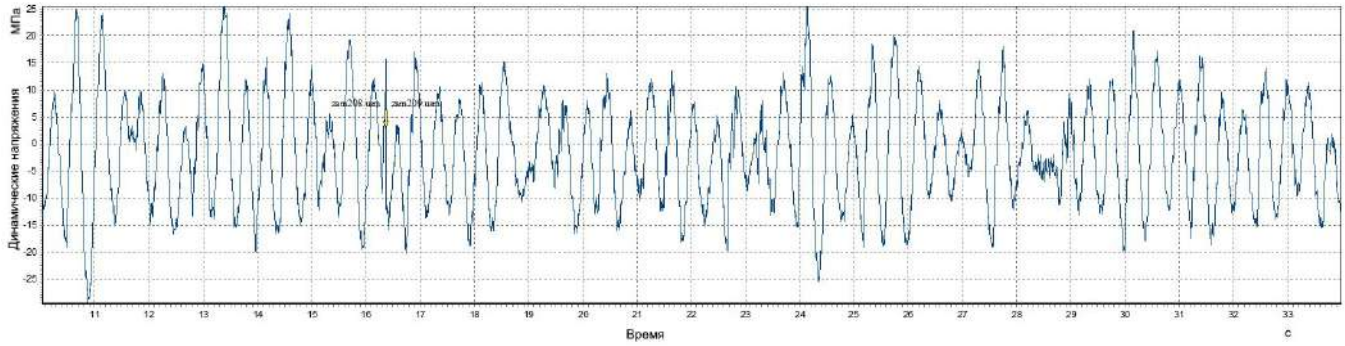
б

Рисунок 1 − Схема размещения тензорезисторов в наиболее нагруженных зонах рамы тележки тепловоза: а – вид спереди; б – вид сверху

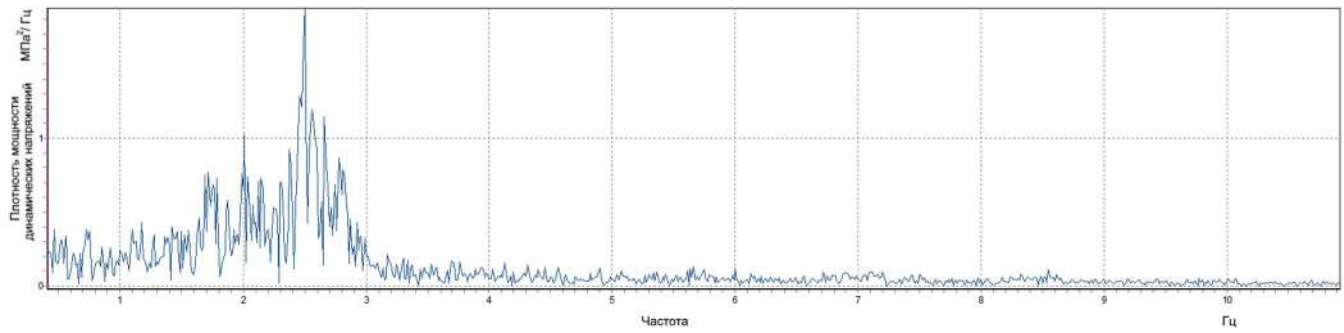
Величина $\sigma_{аэ}$ определяется путем статистической обработки схематизированных случайных процессов изменения напряжений (рисунок 2) с построением гистограмм распределения их текущих значений σ_{ai} при различных скоростях движения объекта и с учетом их доли P_{V_i} в эксплуатации локомотива по формуле [1, табл. 8.3]:

$$\sigma_{аэ} = \sqrt[m]{\frac{N_C}{N_0} \cdot \sum P_{V_i} \cdot \sum \sigma_{ai}^m \cdot P_{\sigma_i}}, \quad (1)$$

где m – показатель наклона кривой усталости (для стальных сварных конструкций $m = 4…6$); $N_с = f_э \cdot \frac{365 \cdot 10^3}{\overline{V}} \cdot \overline{L}$ – суммарное число циклов динамических напряжений за расчетный срок службы; $f_э = f_i \cdot P_{V_i}$ – эффективная частота процесса нагружения (находится в зависимости от доли каждого уровня частоты f_i на каждой скорости движения локомотива); $\overline{L}$ – среднесуточный пробег локомотива (км/сут); $\overline{V}$ – средняя техническая скорость движения поезда; $N_0 = 10^7$ – базовое число циклов; P_{σ_i} – вероятность появления амплитуды напряжения i-го уровня.



а



б

Рисунок 2 − Характер изменения величин динамических напряжений в раме (а) и их спектральная плотность (б) при движении со скоростями 50 – 70 км/ч

Результаты расчета, полученные с учетом изложенного и с использованием данных тензометрирования рамы тележки (см. рисунки 1 – 3) локомотива в составе грузового поезда при $\overline{V}$ =19,2 м/с (69 км/ч) [1, табл. 8.3], $f_э$=2,5 Гц, $N_с$=2,5·19010·$\overline{L}$ циклов, приведены в таблице. Анализ приведенных в таблице данных показывает, что с увеличением наработки (или интенсивности эксплуатации) в два раза напряжение, эквивалентное этой наработке по повреждающему действию (повреждаемость), увеличивается на 18 – 20 % или на столько же снижается (расходуется) коэффициент запаса сопротивления усталости n_σ. Это означает, что для увеличения срока службы объекта в два раза необходимо компенсировать такое сни-

жение n_σ путем увеличения предела выносливости детали (на ≈ 20 %) или снизить интенсивность эксплуатации (в два раза). Заметим также, что уменьшение n_σ на 20 % равносильно повышению вероятности разрушения детали на 30 % (или возрастанию такого риска в 30 раз).

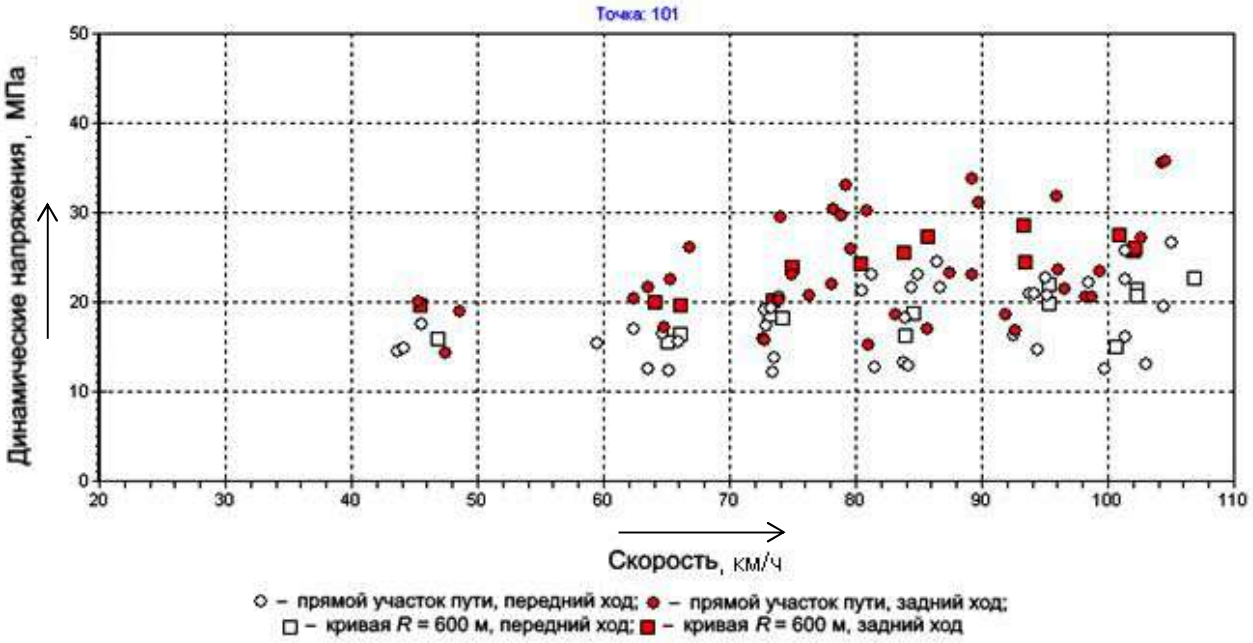


Рисунок 3 − График зависимости амплитуд динамических напряжений от скорости движения локомотива

Показатели нагруженности рамы тележки в зависимости от наработки

Наработка	Среднесуточный пробег $\overline{L}$, км/сут	N_C, цикл	$\sigma_{аэ}$, МПа	n_σ
За год	10	475 260	4,65	12,69
За назначенный срок службы*		19 010 417	11,7	5,0
За год	100	4 752 604	8,27	7,13
За назначенный срок службы*		190 104 167	20,8	2,83
За год	200	9 505 208	9,84	6,0
За назначенный срок службы*		380 208 333	24,74	2,38
За год	400	19 010 417	11,7	5,0
За назначенный срок службы*		760 416 667	29,42	2,0
За год	800	38 020 833	13,91	4,24
За назначенный срок службы*		1 520 833 333	34,98	1,68

*Назначенный срок службы принят равным 40 годам по ГОСТ 31187-2011 – «Тепловозы магистральные. Общие технические требования».

Как установлено выше, амплитуды напряжений в элементах рассматриваемых конструкций изменяются с частотой основных колебаний на рессорном подвешивании тележки $f_э$, Гц (цикл/с). Число таких колебаний на 1 км пути при средней эксплуатационной скорости движения $\overline{V}$ составит $N_1 = 10^3 \cdot f_э / \overline{V}$, цикл/км.

Из уравнения кривой усталости (для второй наклонной ветви), основанной на гипотезе линейного суммирования повреждений [5, 8],

$$\sigma_{-1\partial}^{m_2} \cdot N_0 = \sigma_{аэ}^{m_2} \cdot N_p = \text{const}, \qquad (2)$$

определяется

$$N_p = \left(\frac{\sigma_{-1д}}{\sigma_{аэ}} \right)^{m_2} \cdot N_0 = n_\sigma^{m_2} \cdot N_0, \quad (3)$$

где $\sigma_{аэ}$ – амплитуда (эквивалентная) динамических напряжений от эксплуатационных нагрузок; N_p – число циклов нагружения детали до исчерпания сопротивления усталости (разрушения); $m_2 = 9$ (при $m_1 = 5$);

$$\sigma_{-1д} = \bar{\sigma}_{-1д} \cdot \left(1 - U_p \cdot \nu\right), \quad (4)$$

где $\sigma_{-1д}$ – предел выносливости детали для заданной вероятности неразрушения *P,* определяется в зависимости от квантиля нормального распределения U_p [9] при $P \geq 0,95$ и $\nu = 0,05…0,12$ – коэффициент вариации); $\bar{\sigma}_{-1д}$ – среднее значение предела выносливости (при $P = 0,5$).

Соответственно, если рассчитанный по экспериментальным данным коэффициент запаса сопротивления усталости принять за среднее значение, то при его пересчете по формуле (4) получим n_σ с заданной вероятностью *P*.

Тогда по зависимости $n_N = \varphi(n_\sigma)$ [10] определяем n_N – запас по долговечности (например, при $n_\sigma = 2,0$ $n_N = 10$), по формуле (3) N_p и $N = N_p / n_N$, циклов – безопасное число циклов нагружения детали (ресурс по числу циклов).

Если за N принять $N_c \approx 760,5 \cdot 10^6$ циклов при нормативном коэффициенте запаса $n_\sigma = 2,0$ (см. таблицу), то $L = N / N_1 = 5,85 \cdot 10^6$ км – безопасный (допускаемый) пробег локомотива (ресурс по пробегу).

Безопасный срок эксплуатации локомотива от даты постройки составит:

– при $\bar{L}$ = 100 км/сут (36,5 тыс. км/год), $T = L / \bar{L} = 58,5 \cdot 10^3$ сут, или 160 лет;

– при $\bar{L}$ = 400 км/сут (~150 тыс. км/год), $T \cong 14,6 \cdot 10^3$ сут, или 40 лет;

– при $\bar{L}$ = 800 км/сут (~300 тыс. км/год), $T \cong 7,3 \cdot 10^3$ сут, или 20 лет.

На основании изложенного можно сделать выводы.

1. Анализ статистических характеристик эксплуатационной нагруженности несущих конструкций подвижного состава выявляет существенное влияние на запас сопротивления усталости n_σ его показателей: амплитуд циклических (динамических) напряжений, частот их изменения, параметров, характеризующих интенсивность эксплуатации (число циклов нагружения, скорости движения, среднесуточный или среднегодовой пробег).

2. Интенсивность эксплуатации или наработка локомотива (в циклах нагружения, километрах пробега, часах работы), уровень (эквивалентная амплитуда) циклических эксплуатационных (рабочих) напряжений и коэффициент запаса сопротивления усталости детали взаимосвязаны. Анализ и сопоставление указанных величин дают возможность для обоснования ресурса безопасной эксплуатации ответственных объектов железнодорожного подвижного состава и управления им.

Список литературы

1. ГОСТ Р 55513-2013. Локомотивы. Требования к прочности и динамическим качествам [Текст]. – М.: Стандартинформ, 2014. – 42 с.

2. Оганьян, Э. С. Расчеты и испытания на прочность несущих конструкций локомотивов: Учебное пособие [Текст] / Э. С. Оганьян, Г. М. Волохов / УМЦ ЖДТ. – М., 2013. – 326 с.

3. Обеспечение безопасной эксплуатации подвижного состава на основе стратегии управления ресурсом на этапах жизненного цикла [Текст] / Э. С. Оганьян, В. С. Коссов и др. // Железнодорожный транспорт. – 2018. – № 12. – С. 36 – 40.

4. Безопасная эксплуатация локомотивов по ресурсу их базовых частей [Текст] / Э. С. Оганьян, А. С. Гасюк и др. // Безопасность труда в промышленности. – 2017. – №6. – С. 54 – 58.

5. Методы определения ресурса и циклической прочности конструкций экипажной части локомотивов [Текст] / Н. А. Махутов, В. А. Гапанович и др. // Транспорт: наука, техника, управление. – 2016. – № 10. – С. 3 – 12.

6. Методические аспекты исчерпания ресурса несущих конструкций локомотива [Текст] / В. С. Коссов, Э. С. Оганьян и др.// Тяжелое машиностроение. – 2016. – № 10. – С. 29 – 31.

7. Расчетно-экспериментальная оценка ресурса базовых частей локомотивов для обеспечения их безопасной эксплуатации [Текст] / Э. С. Оганьян, Г. М. Волохов и др. // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2018. – № 2. – С. 39 – 43.

8. Когаев, В. П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени [Текст] / В. П. Когаев; под ред. А. П. Гусенкова. – М.: Машиностроение, 1993. – 364 с.

9. Шор, Я. Б. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности [Текст] / Я. Б. Шор. – М.: Советское радио, 1962. – 553 с.

10. Махутов, Н. А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность: В 2 ч. [Текст] / Н. А. Махутов. – Новосибирск: Наука, 2005. – Ч. 2. – 610 с.

References

1. *Lokomotivy. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam*, *GOST R 55513-2013* (Locomotives. Requirements to strength and dynamic qualities, State Russian Standart 55513-2013). Moscow, Standardinform, 2014, 42 p.

2. Oganyan E. S., Volokhov G. M. *Raschety i ispytaniya na prochnost' nesushchih konstruktsiy lokomotivov* (Strength calculations and tests of locomotive load-bearing elements: study guide): ucheb. posobiye. Moscow: FGBOU “Uchebno-metodich. tsentr po obrazovaniyu na zh.-d. transp.”, 2013, 326 p.

3. Oganyan E. S., Kossov V. S., Volokhov G. M., Ovechnikov M. N., Gasyuk A. S. Ensuring the safe operation of the rolling stock based on the life management strategy at the stages of the life cycle [Obespecheniye bezopasnoy ekspluatatsii podvizhnogo sostava na osnove strategii upravleniya resursom na etapakh zhiznennogo tsikla]. *Zheleznodorozhnyy transport – Railway Transport*, 2018, no. 12, pp. 36 – 40.

4. Oganyan E. S., Gasyuk A. S., Volokhov G. M., Fazliahmetov D. M., Muravlev E. V. Safe operation of locomotives according to the service life of their basic parts [Bezopasnaya ekspluatatsiya lokomotivov po resursu ikh bazovykh chastey]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti – Occupational Safety in Industry,* 2017, no. 6, pp. 54 – 58.

5. Mahutov N. A., Gapanovich V. A., Kossov V. S., Oganyan E. S., Krasyukov N. F., Volokhov G. M. Methods for determining the service life and the cyclic strength of structures of the locomotives underframe [Metody opredeleniya resursa i tsiklicheskoy prochnosti konstruktsiy ekipazhnoy chasti lokomotivov]. *Transport: nauka, tekhnika, upravleniye – Transport: science, equipment, management*, 2016, no. 10, pp. 3 – 12.

6. Kossov V. S., Oganyan E. S., Volokhov G. M., Gasyuk A. S., Benevolenskaya E. M. Methodological aspects of the exhaustion of the service life of the locomotive load-bearing structures [Metodicheskiye aspekty ischerpaniya resursa nesushchikh konstruktsiy lokomotiva]. *Tyazheloye mashinostroyeniye – Heavy machine building*, 2016, no. 10, pp. 29 – 31.

7. Oganyan E. S., Volokhov G. M., Gasyuk A. S., Fazliahmetov D. M. Computational-experimental assessment of the service life of the locomotive basic parts for ensuring their safe operation [Raschetno-eksperimental'naya otsenka resursa bazovykh chastey lokomotivov dlya obespecheniya ikh bezopasnoy ekspluatatsii]. *Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin – Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2018, no. 2, pp. 39 – 43.

8. Kogaev V. P. *Raschety na prochnost' pri napryazheniyakh, peremennykh vo vremeni* (Strength calculations at voltages varying with time) / V.P. Kogaev; ed. by A.P. Gusenkov. Moscow: Machine Building, 1993, 364 p.

9. Shor Ya. B. *Statisticheskiye metody analiza i kontrolya kachestva i nadezhnosti* (Statistical methods for the analysis and quality control and reliability). Moscow: Sovetskoye radio, 1962, 553 p.

10. Makhutov N. A. *Konstruktsionnaya prochnost', resurs i tekhnogennaya bezopasnost': v 2 ch. Ch. 2: Obosnovaniye resursa i bezopasnosti* (Structural strength, operating life and technotoronic security: in 2 parts. Part 2: Substantiation of the operating life and safety). Novosibirsk: Nauka, 2005, 610 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Оганьян Эдуард Сергеевич
Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»).
Октябрьской революции ул., д. 410, г. Коломна, Московская обл., 140402, Российская Федерация.
Доктор технический наук, главный научный сотрудник АО «ВНИКТИ».
Тел.: +7(496) 618-82-48, доб. 11-20.
E-mail: vnikti@ptl-kolomna.ru

Волохов Григорий Михайлович
Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»).
Октябрьской революции ул., д. 410, г. Коломна, Московская обл., 140402, Российская Федерация.
Доктор технический наук, заведующий отделением динамики и прочности подвижного состава и инфраструктуры АО «ВНИКТИ».
Тел.: +7(496) 618-82-48, доб. 11-12.
E-mail: vnikti@ptl-kolomna.ru

Гасюк Александр Сергеевич
Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»).
Октябрьской революции ул., д. 410, г. Коломна, Московская обл., 140402, Российская Федерация.
Заведующий отделом прочности АО «ВНИКТИ».
Тел.: +7(496) 618-82-48, доб. 13-48.
E-mail: vnikti@ptl-kolomna.ru

INFORMATIONS ABOUT THE AUTHORS

Oganyan Eduard Sergeyevich
JSC “Scientific-research and Design-technology Institute of Rolling Stock” (JSC “VNIKTI”).
410 Oktyabrskoy Revolutsii str., Kolomna, Moscow region, 140402, Russian Federation.
Advanced Doctor of Engineering Sciences, Senior Research Scientist of JSC “VNIKTI”.
Tel.: +7(496) 618-82-48, ext. 11-20.
E-mail: vnikti@ptl-kolomna.ru

Volokhov Grigory Mikhailovich
JSC “Scientific-research and Design-technology Institute of Rolling Stock” (JSC “VNIKTI”).
410 Oktyabrskoy Revolutsii str., Kolomna, Moscow region, 140402, Russian Federation.
Advanced Doctor of Engineering Sciences, Head of Rolling Stock Dynamics and Strength and Infrastructure Department of JSC “VNIKTI”.
Tel.: +7(496) 618-82-48, ext. 11-12
E-mail: vnikti@ptl-kolomna.ru

Gasyuk Aleksandr Sergeyevich
JSC “Scientific-research and Design-technology Institute of Rolling Stock” (JSC “VNIKTI”).
410 Oktyabrskoy Revolutsii str., Kolomna, Moscow region, 140402, Russian Federation .
Head of Strength Department of JSC “VNIKTI”.
Tel.: +7(496) 618-82-48, ext. 13-48
E-mail: vnikti@ptl-kolomna.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Оганьян, Э. С. Прогнозирование ресурса несущих конструкций локомотивов по условиям эксплуатации [Текст] / Э. С. Оганьян, Г. М. Волохов, А. С. Гасюк // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 2 (38). – С. 47 – 54.

BIBLIOGRAFIC DESCRIPTION

Oganyan E. S., Volokhov G. M., Gasyuk A. S. The locomotives load-bearing constructions resource prediction by operating conditions. Journal of Transsib Railway Studies, 2019, vol. 2, no. 38, pp. 47 – 54 (In Russian).

УДК 629.46

В. В. Петров, К. С. Петров
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ОТКЛОНЕНИЙ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВАГОННОЙ ТЕЛЕЖКИ ОТ НОМИНАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ НА ЕЕ КИНЕМАТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Аннотация. *В статье представлены результаты исследования влияния отклонений некоторых конструктивных параметров вагонной тележки от установленных нормативных значений на относительное смещение гребней колесной пары в междурельсовом пространстве железнодорожного транспорта. Такие отклонения возникают в процессе постепенного износа движущихся деталей в реальных условиях эксплуатации вагонного парка и приводят к изменению кинематических параметров вагонной тележки. Представлен анализ зависимости поперечного смещения колесной пары относительно рельсового пути от разности диаметров конических поверхностей катания колесной пары, от несоосности колесных пар и различия коэффициентов жесткости рессорных комплектов в составе вагонной тележки. Предложенная математическая модель позволяет не только диагностировать техническое состояние вагонных тележек, но и прогнозировать сроки технического обслуживания подвижного состава на основе измерения положения колесных пар относительно рельсового пути.*

Ключевые слова: *математическая модель, прогнозирование, функция потерь, вагонная тележка, отклонения конструктивных параметров, несоосность колесных пар, различие коэффициентов жесткости рессорных комплектов.*

Vladimir V. Petrov, Konstantin S. Petrov
Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

MATHEMATICAL MODEL FOR ASSESSING THE IMPACT DEVIATIONS OF DESIGN PARAMETERS OF BOGIE FROM THE NOMINAL VALUES AT ITS KINEMATICAL PROPERTIES

Abstract. *The article presents the results of the study of the influence of deviations of certain design parameters of bogie from established normative values on a relative offset from the crests of wheel pair in mezhdurelsovom space of railway transport. Such deviations occur in the process of the gradual wear of moving parts in real-world conditions of rolling stock and lead to a change of kinematic parameters of bogie. An analysis of dependence of lateral displacement relative to the wheelset of railway track from the difference between the diameters of the tapered surfaces of wheelset, skating from lack of alignment of wheelsets and difference coefficients rigidity of springs of bogie. The proposed mathematical model allows to not only diagnose technical condition of wagon bogies during their movements on the straight section of railway track, but also forecast the rolling stock maintenance dates the whole on the basis of position measurements of wheel pairs regarding railway track.*

Keywords: *mathematical model , forecasting, loss function, bogie, deviation design parameters, position of wheel pairs regarding railway track, lack of alignment of wheelsets, difference coefficients rigidity spring kits.*

Важную роль в практическом применении современных цифровых технологий на железнодорожном транспорте играет математическое моделирование различных объектов подвижного состава, которые позволяют реализовать автоматические информационно-измерительные системы для диагностирования технического состояния вагонных тележек на основе накопления больших объемов данных, поступающих от измерительных преобразователей различных параметров колесных пар движущегося поезда [1 – 4]. Контроль механического износа ответственных деталей вагонов в настоящее время осуществляется в вагонных депо с помощью специальных измерительных средств после разборки этих сложных узлов во время ремонта или технического обслуживания, которые требуют больших материальных затрат и времени [5]. При наличии математических моделей, описывающих функциональную связь между измеренными отклонениями конструктивных параметров вагонной тележки (возникающих в результате трения и последующего механического износа деталей) и ее

кинематическими свойствами, имеется реальная возможность диагностирования ее технического состояния на основе предложенных интегральных критериев [6, 7]. В работах [8, 9] описан принцип реализации и тестирования измерительной системы для регистрации и ретроспективной обработки данных, поступающих от датчиков осей вагонных тележек, используемых в качестве напольного оборудования в пунктах комплекса технических средств мониторинга (КТСМ).

Целью данной работы является исследование свойств предлагаемой интегральной оценки технического состояния вагонной тележки на основе совместного применения функции потерь и линейной математической модели, описывающей функциональную связь измеренных значений смещения гребней колесной пары относительно головки рельса в процессе равномерного движения экипажа по прямолинейному участку рельсового пути от отклонений реальных конструктивных параметров вагонной тележки от нормативных значений установленных разработчиком

$$\Delta x_{\text{см}} = f(\Delta x_{\text{нр}}, \Delta x_{\text{нс}}, \Delta x_{\text{нж}}), \quad (1)$$

где $\Delta x_{\text{см}}$ – суммарное смещение гребней колесной пары относительно головки рельса в процессе равномерного движения по прямолинейному участку пути; $\Delta x_{\text{нр}}$ – смещение гребней колесной пары относительно прямолинейного рельсового пути от неравенства радиусов колес в контрольных точках профиля при одинаковой конусности поверхности катания; $\Delta x_{\text{нс}}$ – смещение гребней колесной пары относительно прямолинейного рельсового пути от несоосности колесных пар в тележке при одинаковом диаметре и профиле колес в составе колесной пары; $\Delta x_{\text{нж}}$ – смещение гребней колес относительно прямолинейного рельсового пути от неравенства жесткости комплектов пружин вагонной тележки (правой и левой групп в составе рессорных комплектов).

При формировании интегральной оценки (1) будем исходить из условия независимости рассматриваемых параметров вагонной тележки, что позволяет использовать принцип суперпозиции и исследовать отдельно влияние каждого параметра при фиксированных значениях остальных параметров тележки. Причем термин «несоосность» колесных пар в данной модели рассматривается как отсутствие коллинеарности оси колесной пары с виртуальной осью, перпендикулярной прямолинейному рельсовому пути.

Результаты любых воздействий на объекты можно разделить на наблюдаемые, которые обычно оценивают с помощью прямых измерений, и ненаблюдаемые, которые можно оценить только по результатам косвенных измерений и моделирования соответствующего объекта. К наблюдаемым результатам воздействий на объект можно отнести кинематические свойства тележки подвижного состава, для исследования которых в процессе равномерного движения состава по прямолинейному участку пути имеется соответствующая инфраструктура [10]. К ненаблюдаемым результатам воздействий можно отнести совокупность параметров, определяющих отклонения внутренних конструктивных элементов системы от нормативных значений, которые проявляют себя только в процессе движения, даже если были реализованы все технологические нормы изготовления, сборки и контроля изделия. Поэтому наблюдение кинематики вагонных тележек дает намного больше информации об отклонениях их конструктивных параметров от номинальных значений, чем все априорные контрольно-измерительные процедуры, которые сложны в технологическом плане и требуют высокой культуры производства при разборке и последующей сборке сложных узлов.

В рамках данной статьи в качестве примера применения предлагаемой интегральной оценки рассмотрены только три параметра вагонной тележки из множества возможных для демонстрации влияния их отклонений от номинальных значений на кинематические свойства тележки. При разработке математической модели (1) будем учитывать следующие условия и допущения, определяющие область применения предлагаемого функционала.

1. Движение вагона осуществляется равномерно по прямолинейному участку рельсового пути, имеющего постоянную жесткость.

2. Постоянство конусности поверхности катания колес, имеющего стандартную конусность 1:10 [1], например, согласно ГОСТ 10791-2011 tan(α) = 0,05 в пределах ±30 мм от номинального положения круга катания, где α – угол наклона образующей поверхности конуса профиля колеса, которой принадлежит круг катания, относительно оси колесной пары.

3. Постоянство радиуса круга катания колес при устойчивом равномерном движении по прямолинейному рельсовому пути.

4. При исследовании влияния отклонения отдельного параметра остальные конструктивные параметры тележки имеют номинальные значения с сохранением их симметрии.

5. При разработке и моделировании функционала (1) любые динамические воздействия на объект рассматриваются как дополнительные помехи для формирования интегральной оценки технического состояния движущихся вагонных тележек в составе поезда.

Найдем линейную функциональную связь смещения оси $\Delta x_{\text{нр}}$ от неравенства радиусов поверхностей катания профиля колес Δr в контрольных точках колесной пары в виде:

$$\Delta x_{\text{нр}} = f(\Delta r). \tag{2}$$

Для определения этой зависимости рассмотрим положение прямоугольника, вписанного в ромб, с учетом изменения размера ромба (Δx и Δr), представленного на рисунке 1, где исходный прямоугольник $П_0$ построен по точкам касания поверхностей катания колесной пары и рельсов, имеющих нормативные значения. Требуется найти смещение по оси x другого прямоугольника – $П_1$, вписанного в меньший ромб, таким образом, что диаметры конусов по радиусам катания колес будут равны между собой (стороны нового прямоугольника $П_1$), где Δx – поперечное смещение оси колесной пары до выравнивания радиусов катания.

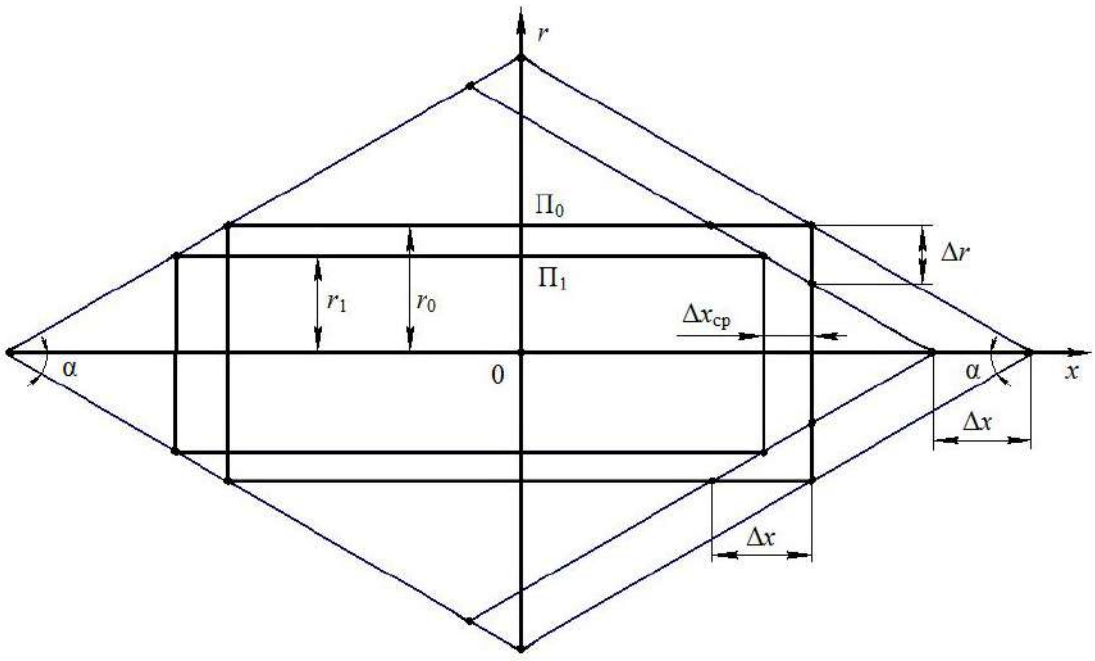


Рисунок 1 – Оценка величины смещения колесной пары при движении тележки по прямолинейному рельсовому пути от разности радиусов поверхностей катания колес Δr в составе колесной пары

Используя обозначения, представленные на рисунке 1, можно убедиться в том, что неравенство радиусов кругов катания колес Δr и смещения точек касания их с рельсом при постоянном значении угла α связаны следующими соотношениями

$$\Delta r = \Delta x \tan\alpha \quad \text{или} \quad \Delta x = \Delta r / \tan\alpha. \tag{3}$$

В процессе движения колесная пара занимает среднее положение, так как колесо с меньшим диаметром сместится в сторону увеличения радиуса круга катания, а колесо с нормативным диаметром сместится в сторону уменьшения радиуса и формируется среднее

(установившееся) значение смещения колесной пары. Окончательное выражение зависимости смещения колесной пары от неравенства радиусов колес в пределах линейного участка нормативной формы профиля имеет вид:

$$\Delta x_{\text{нр}} = \frac{\Delta r}{2\tan\alpha}. \tag{4}$$

Для оценки влияния несоосности колесных пар в составе вагонной тележки на поперечное смещение круга катания относительно нормативного значения рассмотрим рисунок 2, где представлены два треугольника, построенные по точкам касания рельсов и поверхностей катания колесных пар, имеющих несоосность с углом β_1, а Δx_L – расстояние между точками касания колесной пары и рельсов. Требуется найти такое смещение $\Delta x_{\text{нс}}$ колесной пары по оси x, которое обеспечит прямолинейное движение вагонной тележки вдоль прямолинейного рельсового пути.

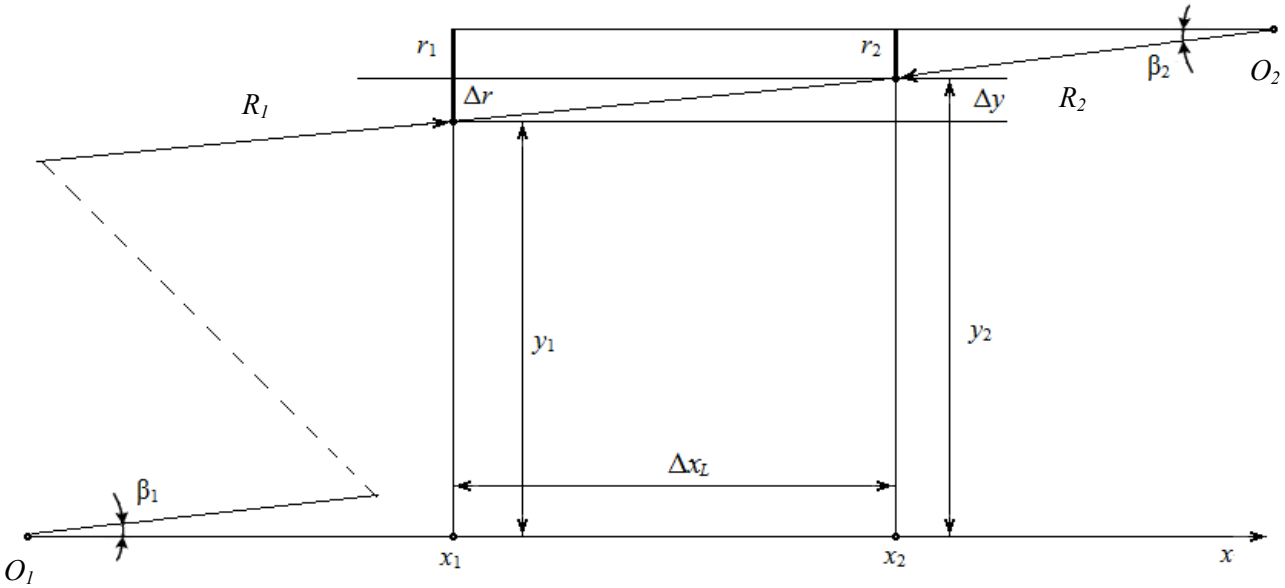


Рисунок 2 – Оценка величины смещения колесной пары при движении тележки
по прямолинейному рельсовому пути от несоосности колесных пар в составе вагонной тележки

Для нахождения соотношений между R_1 и R_2 рассмотрим треугольники с углами β_1 и β_2 (см. рисунок 2). Где R_1 – радиус дуги, определяющей возможную траекторию движения при несоосности колесных пар (угол β_1), а R_2 – необходимый радиус дуги (угол β_2) для обеспечения прямолинейного движения тележки за счет разности радиусов кругов катания колесных пар, компенсирующих влияние R_1 от несоосности колесных пар:

$$\sin\beta_1 = \frac{\Delta y}{\Delta x_L} = \frac{y_1 + \Delta y}{R_1 + \Delta x_L}; \tag{5}$$

$$\sin\beta_2 = \frac{\Delta r}{\Delta x_L} = \frac{r_2 + \Delta r}{R_2 + \Delta x_L}, \tag{6}$$

где y_1 – база тележки, а Δy – несоосность колесных пар в составе тележки.

Используя соотношения (5), (6) находим выражения для вычисления R_1 и R_2:

$$R_1 = \frac{\Delta x_L}{\Delta y} y_1; \tag{7}$$

$$R_2 = \frac{\Delta x_L}{\Delta r} r_2. \tag{8}$$

Для обеспечения прямолинейного движения тележки необходимо выполнить условие равенства радиусов $R_1 = R_2$, т. е.

$$\frac{y_1}{\Delta y} = \frac{r_2}{\Delta r}, \tag{9}$$

из которого можно найти зависимость в пределах линейного диапазона формы профиля колесных пар

$$\Delta r = \frac{r_2}{y_1}\Delta y. \tag{10}$$

С учетом выражения (4) можно найти линейную зависимость смещения колесной пары от несоосности их в составе вагонной тележки

$$\Delta x_{\text{нс}} = \frac{r_2}{2y_1 \tan\alpha}\Delta y\,. \tag{11}$$

Влияние различной жесткости рессорных комплектов тележки рассмотрим при условии, что симметрия геометрических размеров остальных деталей в конструкции тележки не нарушена. Схема воздействия статических сил на рессоры при равномерном движении тележки по прямолинейному рельсовому пути для оценки величины смещения колесной пары $\Delta x_{\text{нж}}$ от неравенства жесткости (при симметричном размещении груза) комплектов пружин правой и левой сторон вагонной тележки представлена на рисунке 3.

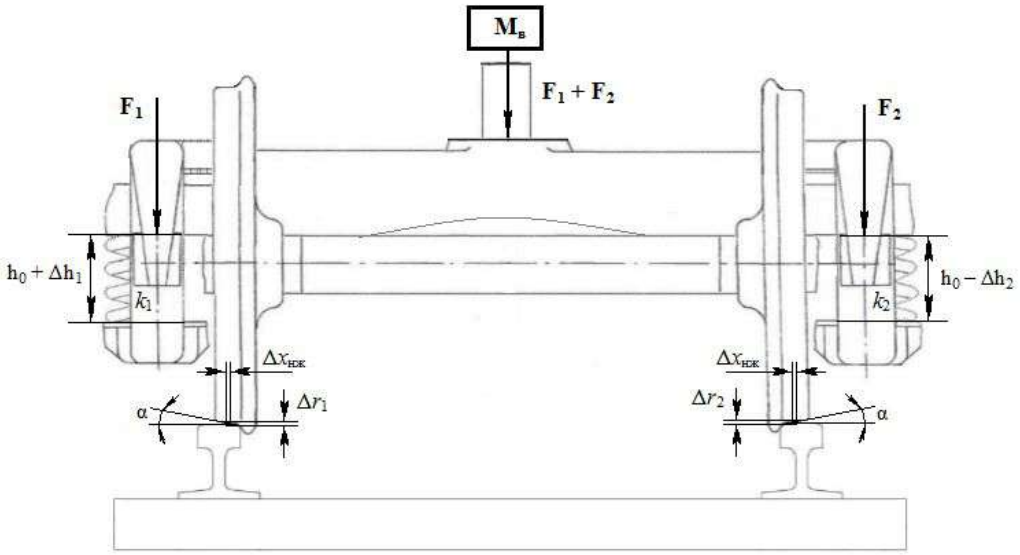


Рисунок 3 – Оценка величины смещения колесной пары при движении тележки
по прямолинейному рельсовому пути от различной жесткости рессорных комплектов вагонной тележки

Статические силы F_1 и F_2 сжимают комплекты пружины, имеющие различные коэффициенты жесткости

$$F_1 = k_1(h_0 + \Delta h_1); \quad F_2 = k_2(h_0 - \Delta h_2). \tag{12}$$

используя выражение (3) можно записать разности высот комплектов пружин:

$$\Delta h_1 = \Delta r_1 = \Delta x \tan\alpha; \quad \Delta h_2 = \Delta r_2 = \Delta x \tan\alpha\,. \tag{13}$$

При выполнении условия симметрии конструкции тележки $F_1 = F_2$, т. е.

$$k_1(h_0 + \Delta h_1) = k_2(h_0 - \Delta h_2), \tag{14}$$

установившееся состояние пружин тележки при равномерном движении вагона по прямолинейному рельсовому пути обеспечивает равенство этих сил и горизонтальное положение надрессорной балки тележки при $|\Delta h_1| = |\Delta h_2| = \Delta h$:

$$k_1 h_0 + k_1 \Delta h = k_2 h_0 - k_2 \Delta h, \tag{15}$$

из которого можно найти установившуюся величину разности высоты комплектов пружин

$$\Delta h = \frac{(k_2 - k_1)}{(k_1 + k_2)} h_0 \approx \frac{\Delta k}{2k} h_0 \quad \text{при } k_1 \approx k_2 \approx k\,. \tag{16}$$

Учитывая соотношения (13), находим смещение колесной пары при неравенстве жесткости рессор:

$$\Delta x_{\text{нж}} = \frac{\Delta k\, h_0}{2k \tan\alpha}\,. \tag{17}$$

Таким образом, неравенство жесткости пружин приводит к неравенству высот рессорных блоков, для минимизации несимметрии которых состав рессорных комплектов должен формироваться на основе тщательного подбора всех пружин. Если движение вагона происходит неравномерно или по неровному профилю пути, то большое влияние на кинематику тележки оказывает масса вагона $M_в$, при этом следует учитывать влияние динамических сил, которые приводят к проскальзыванию колес или вилянию тележки вдоль рельсового пути. В таких условиях осуществлять интегральную оценку (1) состояния вагонной тележки по величине смещения гребня относительно головки рельса становится гораздо сложнее.

Перекос осей колесных пар вагонной тележки (т. е. отсутствие перпендикулярности осей колесных пар к рельсам) при движении по прямолинейному участку рельсового пути – это уже крайняя стадия процесса развития износа деталей вагонной тележки, измерение которого позволяет зафиксировать только факт критического технического состояния тележки. Однако эта информация не позволяет прогнозировать и предупреждать неисправности, которые следует выявлять и устранять на пунктах технического осмотра после остановки поезда. Поэтому в первую очередь необходимо исследовать смещение колес вагонной тележки относительно нормативного круга катания при равномерном движении вагона на прямолинейном участке рельсового пути. Пример реализации модели (1), включающей выражения (4), (11), (17), представлен в таблице 1, причем суммарное смещение можно вычислять как геометрическую сумму, учитывая, что исследуемые параметры в данной модели считаются независимыми.

Таблица 1 – Влияние отклонений параметров тележки модели 18100 от номинальных значений на смещение ее колес относительно нормативного круга катания при равномерном движении вагона по прямолинейному участку рельсового пути

Параметр вагонной тележки	Номинальное значение параметра, мм	Допустимые значения		Максимальные значения	
		отклонение параметра, мм	смещение оси, мм	отклонение параметра, мм	смещение оси, мм
Диаметр колес	950	0,5	2,5	1,0	5,0
База тележки	1850	1,0	2,5	2,0	5,0
Высота пружин	249	0,5	5,0	1,0	10,0

На основе представленных в таблице 1 результатов можно сделать вывод о том, что смещение колес вагонной тележки относительно нормативного круга катания при равномерном движении вагона по прямолинейному рельсовому пути существенно зависит от несимметрии параметров тележки и может быть использовано для интегральной оценки технического состояния тележек подвижного состава железнодорожного транспорта. Это подтверждает то, что кинематические параметры движения вагонной тележки с точки зрения эксплуатации и диагностирования ее технического состояния являются наиболее информатив-

ными для принятия решения о необходимости дополнительного инструментального контроля геометрических параметров тележки и ее конструктивной симметрии.

В настоящее время для оценки пригодности к эксплуатации объектов, которые связаны с обеспечением безопасности движения на любых видах транспорта (авиационного, автомобильного, водного), в том числе и железнодорожного, используется принцип допускового контроля основных параметров транспортных средств. Он заключается в том, что при выходе какого-либо параметра транспортного средства за пределы допустимого значения этот объект считается непригодным к эксплуатации (т. е. осуществляют пороговый контроль). Для реализации этого принципа обычно применяют функцию потерь [11], которая представляет собой весовую функцию (или функционал), оценивающую качество работы системы в зависимости от величины отклонений исследуемого параметра этой системы от требуемого значения. Такой подход справедлив в задачах диагностирования для принятия решения о допуске к эксплуатации сложной системы, но он не позволяет прогнозировать развитие дефектов этой системы, например, из-за постепенного износа поверхностей трущихся деталей, входящих в состав вагонной тележки. Для этой цели можно использовать функциональный подход (непрерывной аппроксимации), при котором функция потерь описывается в виде непрерывной квадратичной модели. Учитывая, что профиль колеса имеет несимметричную форму, для прогнозирования свойств такой сложной системы наиболее адекватная модель функции потерь должна описываться несимметричной функцией, вид которой при реализации системного подхода определяется поставленной целью идентификации. В данном случае для оценки технического состояния вагонной тележки рассмотрим модель в виде симметричной функции потерь, так как колесные пары и тележка в целом должны обладать максимальной симметрией. Экспериментальное исследование смещения круга катания колеса от номинального значения является сложной задачей, прямое измерение такого смещения в реальных условиях реализовать практически невозможно. Поэтому чаще всего предлагается осуществлять вычисление отклонения круга катания от номинального значения на основе косвенных измерений, например, смещения обода или гребня колеса относительно головки рельса.

На рисунке 4, а представлен пример функции потерь, реализующий принцип порогового контроля, где любые отклонения, превышающие значение x_4 и меньшие, чем x_1, считаются недопустимыми, обозначены они соответственно точками *A* и *B* (см. рисунок 4).

В этих крайних точках предельно допустимого диапазона смещения колеса максимальные значения функции потерь равны единице, при достижении которых вагонная тележка должна быть доставлена на пункт технического обслуживания для инструментальной дефектоскопии и последующего ремонта.

Таким образом, значение функции потерь $f(x) = 1{,}0$ можно рассматривать как предельное значение вероятности, которое соответствует запрету эксплуатации тележки. Однако вместо вероятностного подхода это же значение можно рассматривать как 100 %-ный износ некоторых деталей тележки, который соответствует недостаточному уровню ее качества.

Для реализации непрерывного функционального подхода и вычисления конкретных параметров квадратичной функции $f_к(x)$, которая изображена на рисунке 4, б, необходимо найти значения коэффициентов этой функции в общем виде.

Модель функции потерь определим как смещенную по оси *x* параболу

$$f_к(x) = a(x - x_0)^2 + b(x - x_0) + c, \qquad (18)$$

которая должна пройти через точки с соответствующими координатами: A (x_1, 1, 0); B (x_4, 1, 0); *C* (x_0, 0), где $x_1 = (70 - \Delta x_п)$ – предельное допустимое смещение колеса с учетом максимального износа его гребня (точка *A*); $x_2 = (70 - \Delta x_н)$ – смещение колеса с учетом нормативной толщины гребня (точка *D*); $x_0 = -\Delta x_к$ – нормативное значение смещения гребня колеса, которое соответствует номинальному положению круга катания; точки x_3 и x_4 распо-

ложены симметрично соответствующим точкам x_2 и x_1 относительно точки x_0. Для определения параметров функции потерь подставим значения координат этих точек в уравнение (18):

$$a(x-x_0)^2\Big|_{x=x_0} + b(x-x_0)\Big|_{x=x_0} + c = 0 \quad \text{в точке } C \text{ с координатами } (x_0, 0); \tag{19}$$

$$a(x-x_0)^2\Big|_{x=x_1} + b(x-x_0)\Big|_{x=x_1} + c = 1 \quad \text{в точке } A \text{ с координатами } (x_1, 1); \tag{20}$$

$$a(x-x_0)^2\Big|_{x=x_4} + b(x-x_0)\Big|_{x=x_4} + c = 1 \quad \text{в точке } B \text{ с координатами } (x_4, 1). \tag{21}$$

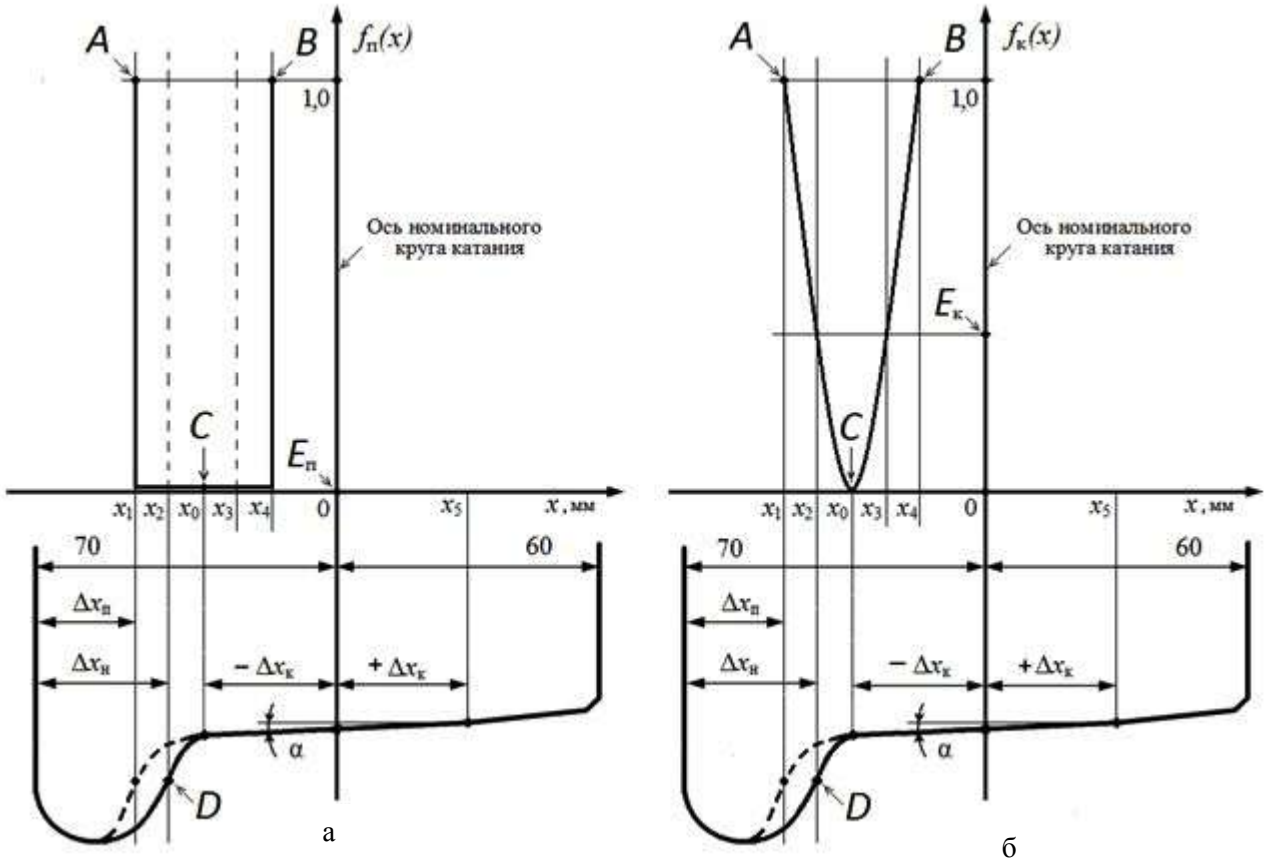


Рисунок 4 – Различные виды функций потерь для оценки технического состояния вагонной тележки по величине смещения колеса от номинального значения x_0,: а – метод порогового контроля по предельным значениям смещения колеса; б – метод на основе применения квадратичной функции потерь для обеспечения возможности прогнозирования технического состояния вагонной тележки

Из уравнения (19) определяем значение параметра $c = 0$ функции потерь $f_к\ (x)$, тогда на основе (20) и (21) составим систему уравнений

$$\begin{cases} a(x_1-x_0)^2 + b(x_1-x_0)=1; \\ a(x_4-x_0)^2 + b(x_4-x_0)=1, \end{cases} \tag{22}$$

решение которой позволяет найти выражения для определения параметров a и b квадратичной функции потерь любого вида для любых типов колесных пар железнодорожного транспорта:

$$a = \frac{(x_4-x_0)-(x_1-x_0)}{(x_1-x_0)^2(x_4-x_0)-(x_4-x_0)^2(x_1-x_0)}; \tag{23}$$

$$b = \frac{(x_1-x_0)^2-(x_4-x_0)^2}{(x_1-x_0)^2(x_4-x_0)-(x_4-x_0)^2(x_1-x_0)}. \tag{24}$$

Таким образом, при нормативной толщине гребня $\Delta x_н = 33$ мм и величине смещения колеса x_2 оценка в точке $E_к$ будет соответствовать значению функции потерь (18)

$$f_к(x_2) = a(x - x_0)^2\Big|_{x=x_2} + b(x - x_0)\Big|_{x=x_2} = a(x_2 - x_0)^2 - b(x_2 - x_0)\,, \qquad (25)$$

которая изображена на рисунке 4, б.

Для примера найдем значения параметров a и b функции потерь для колесной пары, имеющей низкоскоростной тип профиля колес по ГОСТ 10791-2011 «Колеса цельнокатаные». Результаты вычислений представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения параметров функции потерь для оценки технического состояния вагонной тележки по величине смещения гребней колесной пары относительно головки рельса

Координаты точек профиля колеса по оси x	x_1	x_2	x_0	x_3	x_4
Смещение гребня колеса по оси x, мм	– 44	– 37	– 30	– 23	– 16
Значения пороговой функции потерь $f_п(x)$	1,0	0,0	0,0	0,0	1,0
Значения квадратичной функции потерь $f_к(x)$	1,0	0,25	0,0	0,25	1,0
Значения коэффициентов функции потерь $f_к(x)$	a = 0,0051 из (23);		b = 0 из (24);		c = 0 из (19)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Применение интегральной оценки на основе измерения смещения гребней колесной пары относительно головки рельса на прямолинейном участке железнодорожного пути и квадратичной функции потерь позволяет не только идентифицировать предельное техническое состояние вагонных тележек, но и прогнозировать примерные сроки направления вагона для инструментальной дефектоскопии, технического обслуживания или ремонта.

2. Чем меньше угол α (конусности колеса), тем более высокие требования необходимо предъявлять к технологии изготовления, контролю параметров и ремонту вагонных тележек.

3. Применение описанной линейной модели совместно с предложенной функцией потерь поможет повысить эффективность планирования при эксплуатации вагонного парка и безопасность движения на железнодорожном транспорте.

Список литературы

1. Доронин, В. И. Движение колесных пар подвижного состава в прямых и кривых участках рельсовой колеи: Монография [Текст] / В. И. Доронин, С. В. Доронин / Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения. – Хабаровск, 2006. – 120 с.

2. Захаров, С. М. Математическое моделирование влияния параметров пути и подвижного состава на процессы изнашивания колеса и рельса [Текст] / С. М. Захаров, Ю. С. Ромен // Вестник ВНИИЖТа / ВНИИЖТ. – М. – 2010. – № 2. – С. 26 – 30.

3. Панов, Ю. Л. Кинематика колесных пар вагонной тележки [Текст] / Ю. Л. Панов, А. Ю. Панов // Вестник Нижегородского ун-та им. Н. И. Лобачевского / Нижегородский гос. ун-т им. Н. И. Лобачевского. – 2013. – Вып. 4(1). – С. 180 – 185.

4. Шимановский, А. О. Влияние параметров вагонной тележки на склонность колес к буксованию [Текст] / А. О. Шимановский, Д. М. Марченко // Актуальные вопросы машиноведения / Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси. – Минск. – 2016. – Т. 5. – С. 31 – 34.

5. Совершенствование технологии ремонта и технического обслуживания вагонов [Текст] // Межвуз. тем. сборник научных трудов / Под ред. В. В. Лукина. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2009. – 71 с.

6. Петров, В. В. Интегральная оценка для диагностирования отклонений кинематических параметров вагонной тележки и колесных пар движущегося состава [Текст] / В. В. Петров, К. С. Петров, С. А. Ступаков // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава: Материалы всерос. науч.-техн.

конф. с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2017. – С. 113 – 123.

7. Капустьян, М. Ф. Оценка технического состояния подвижного состава на основе интегрального показателя качества [Текст] / М. Ф. Капустьян, О. П. Супчинский, В. П. Кулаковская // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава: Материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2017. – С. 13 – 18.

8. Петров, В. В. Алгоритм формирования сигналов для имитатора осей железнодорожного состава, движущегося с переменной скоростью [Текст] / В. В. Петров, К. С. Петров, С. А. Ступаков // Информационные и управляющие системы на транспорте и в промышленности: Материалы всерос. науч.-техн. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2018. – С. 180 – 188.

9. Автоматизированная система сопровождения транзитных поездов [Текст] / В. А. Кандаев, В. В. Петров и др. // Автоматика, связь, информатика. – 1999. – № 7. – С. 11 – 13.

10. Опыт разработки и эксплуатации лазерных автоматизированных диагностических комплексов для бесконтактного контроля параметров колес грузовых вагонов [Текст] / А. Н. Байбаков, К. И. Кучинский и др. // Измерительная техника. – 2010. – № 4. – С. 61 – 64.

11. Куликов, Е. И. Методы измерения случайных процессов [Текст] / Е. И. Куликов. – М.: Радио и связь, 1986. – 272 с.

References

1. Doronin V. I., Doronin S. V. *Dvizheniye kolesnykh par podvizhnogo sostava v pryamykh i krivykh uchastkakh rel'sovoy kolei* (Motion of wheelsets of rolling stock straight and curved sections of track). Khabarovsk: Dal'nevostochnyy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya, 2006, 120 p.

2. Zakharov S. M., Romen YU. S. Mathematical modeling of impact and rolling path settings on wear of wheel and rail [Matematicheskoye modelirovaniye vliyaniya parametrov puti i podvizhnogo sostava na protsessy iznashivaniya kolesa i rel'sa]. *Vestnik VNIIZHTa – Vestnik of the Railway Research Institute*, 2010, no 2, pp. 26 – 30.

3. Panov Yu. L., Panov A. Yu. Cinematic gauge bogie [Kinematika kolesnykh par vagonnoy telezhki]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta imeni N. I. Lobachevskogo – Vestnik Of Lobachevsky State University Of Nizhni Novgorod*, 2013, no. 4(1), pp. 180 – 185.

4. Shimanovskiy A. O., Marchenko D. M. Bogie parameters influence the tendency of wheels to buksovaniju [Vliyaniye parametrov vagonnoy telezhki na sklonnost' koles k buksovaniyu]. *Aktual'nyye voprosy mashinovedeniya – Topical issues of mechanical engineering*, 2016, vol. 5, pp. 31 – 34.

5. Lukin V. V. (under the edition). *Sovershenstvovaniye tekhnologii remonta i tekhnicheskogo obsluzhivaniya vagonov* (Improvement of technology of repair and maintenance of cars). Omsk, 2009, 71 p.

6. Petrov V. V., Petrov K. S., Stupakov S. A. Cumulative score to diagnose abnormalities of kinematic parameters of bogie and wheelsets moving composition [Integral'naya otsenka dlya diagnostirovaniya otkloneniy kinematicheskikh parametrov vagonnoy telezhki i kolesnykh par dvizhushchegosya sostava]. *Materialy vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiyem «Tekhnologicheskoye obespecheniye remonta i povysheniye dinamicheskikh kachestv zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava»* (Materials of the IV All-Russian scientific and technical conference with international participation «Technological maintenance repair and improvement of the dynamic qualities of the railway rolling stock»). Omsk, 2017, pp. 113 – 123.

7. Kapust'yan M. F., Supchinskiy O. P., Kulakovskaya V. P. Evaluation of technical state of mobile composition on the basis of integral quality index [Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya podvizhnogo sostava na osnove inte-gral'nogo pokazatelya kachestva]. *Materialy vserossijskoj*

nauchno-tekhnicheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiyem «Tekhnologicheskoye obespecheniye remonta i povysheniye dinamicheskikh kachestv zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava» (Materials of the IV All-Russian scientific and technical conference with international participation «Technological maintenance repair and improvement of the dynamic qualities of the railway rolling stock»). Omsk, 2017, pp. 13 – 18.

8. Petrov V. V., Petrov K. S., Stupakov S. A. Algorithm for signal generation for simulation sensors axes of train, moving with variable speed [Algoritm formirovaniya signalov dlya imitatora osey zheleznodorozhnogo sostava, dvizhushchegosya s peremennoy skorost'yu]. *Materialy vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Informatsionnyye i upravlyayushchiye sistemy na transporte i v promyshlennosti»* (Materials of the second All-Russian scientific and technical conference «Information and control systems in transport and in industry»). Omsk, 2018, pp. 180 – 188.

9. Kandayev V. A., Petrov V. V., Chernenko V. M., Zakharov V. A. Automated tracking system for transit trains [Avtomatizirovannaya sistema soprovozhdeniya tranzitnykh poyezdov]. *Avtomatika, svyaz`, informatika – Automation, Communication, Informatics Journal*, 1999, no. 7, pp. 11 – 13.

10. Baybakov A. N., Kuchinskiy K. I., Paterikin V. I., Plotnikov S. V., Sotnikov V. V. Experience in the development and operation of laser automated diagnostic systems for contactless control of parameters of freight car wheels [Opyt razrabotki i ekspluatatsii lazernykh avtomatizirovannykh diagnosticheskikh kompleksov dlya beskontaktnogo kontrolya parametrov koles gruzovykh vagonov]. *Izmeritel`naya texnika – Measuring equipment Journal,* 2010, no. 4, pp. 61 – 64.

11. Kulikov, Ye. I. *Metody izmereniya sluchaynykh protsessov* (Measurement methods of random processes). Moskow: Radio i svyaz', 1986, 272 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Петров Владимир Владимирович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.
Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.
Тел.: +7 (3812) 31-05-89.
E-mail: PetrovVV@omgups.ru

Петров Константин Сергеевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.
Студент ОмГУПСа.
Тел.: (3812) 31-04-09.
E-mail: tef@omgups.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Petrov Vladimir Vladimirovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.
Ph. D. of Engineerind Sciences, Chief scientific worker, Associate Professor of the department «Automation and control systems», OSTU.
Phone: +7 (3812) 31-05-89.
E-mail: PetrovVV@omgups.ru

Petrov Konstantin Sergeevich
Omsk State Transport Univirsity (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, Russian Federation.
The student of OSTU.
Phone: (3812) 31-04-09.
E-mail: tef@omgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Петров, В. В. Математическая модель для оценки влияния отклонений конструктивных параметров вагонной тележки от номинальных значений на ее кинематические свойства [Текст] / В. В. Петров, К. С. Петров // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. № 3 (39). – С. 55 – 65.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Petrov V. V., Petrov K. S. Mathematical model for assessing the impact of deviations of design parameters of bogie from the nominal values at its kinematical properties. Journal of Transsib Railway Studies, 2019, vol. 2, no. 38, pp. 55 – 65. (In Russian).

УДК 621.336.2

С. М. Утепбергенова, В. В. Томилов, О. А. Сидоров
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ПОЛОЗА ТОКОПРИЕМНИКА МАГИСТРАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Аннотация. *В статье представлена разработанная математическая модель тепловых процессов (динамических) контакта токоприемника с контактной подвеской (в режиме движения), позволяющая оценить распределение температуры нагрева полоза токоприемника во время движения. Приведена экспериментальная оценка работоспособности предлагаемого устройства охлаждения. Рассмотрена верифицированная тепловая модель полоза токоприемника в режиме движения.*

Ключевые слова: *электроподвижной состав, высокоскоростное движение, температура твердых тел, токоприемник, полоз, система охлаждения, моделирование.*

Sandugash M. Utepbergenova, Valerii V. Tomilov, Oleg A. Sidorov
Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation,

RESEARCH OF COOLING SYSTEM FOR PANTOGRAPH HEAD OF ELECTRIC TRAIN

Abstract. *A mathematical model of thermal processes (dynamic) contact current collector with contact suspension (in motion), which allows to estimate the temperature distribution of heating the current collector during movement. The experimental evaluation of the proposed cooling device performance is given. The thermal model of the current collector in motion mode has been verified.*

Keywords: *electric stock, high-speed running, the temperature of solids, current collector, pantograph slide, cooling system, modeling.*

Нагрев полоза токоприемника обусловлен электромеханическими процессами в системе «контактный провод – вставка», образующими сильноточный скользящий контакт. Существующие тенденции повышения скоростей, увеличения массы поездов и применения нового подвижного состава в системе тягового электроснабжения постоянного напряжения требуют обеспечения надежности и экономичности системы токосъема при высоких значениях тока до 4000 А и повышают актуальность разработки технических решений для снижения температуры элементов токоприемника и исключения их повреждения.

Современному двухполозному токоприемнику свойственна неравномерность нагрева его элементов, расположенных параллельно с точки зрения электрической цепи. Парность шунтов и полозов обусловливает деление тока, а сопротивления переходных контактов – его пропорциональность. Известны случаи отправления подвижного состава с неукомплектованными шунтами или частично отсутствующими на полозах. В таких случаях наблюдается перегрев оставшихся в работе шунтов и их пережог с последующим превышением максимально допустимой температуры контактных вставок и каркаса рабочего полоза и его разрушением.

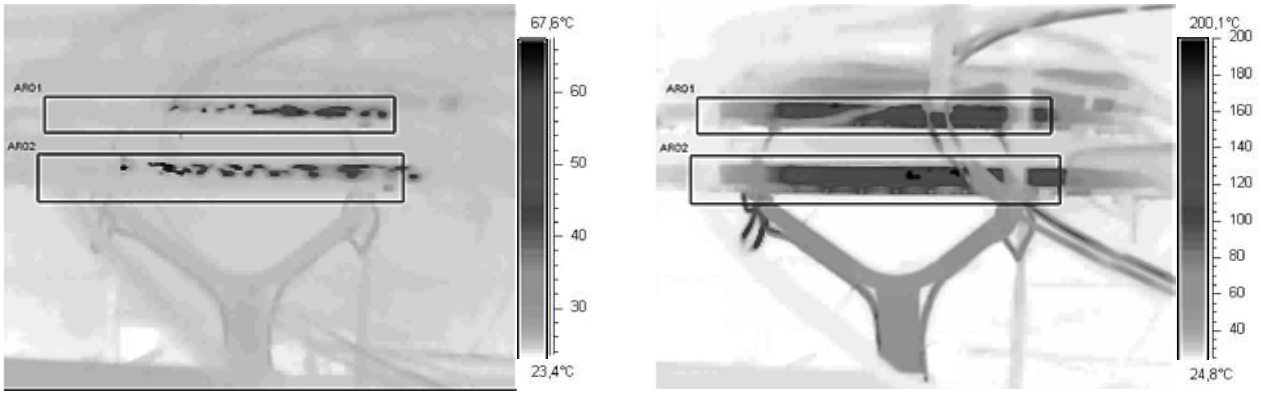
Способы повышения нагрузочной способности токоприемника рассмотрены в работе [1]. Среди этих способов можно выделить применение систем охлаждения. Недостатками активных систем являются сложность конструкции и отказ при утечке хладагента, пассивных с применением оребрения – повышение массы полоза. В работе [2] рассмотрены варианты модернизации каркаса полоза устройствами подачи воздуха.

Тепловые процессы на полозе токоприемника ТАс-24 магистрального электроподвижного состава в режиме движения на лабораторном стенде ОмГУПСа приведены на термограммах рисунка 1. На исследуемом полозе фирмы Пантрак видны характерная тепловая дорожка или пятно, оставляемые сильноточным скользящим контактом. Площадь пятна контакта меньше, чем ширина полоза токоприемника. Распределение положения пятна неравномерно и обусловлено его перемещением вдоль полоза и между самими полозами (рисунок 1, а).

В установившемся режиме нагрева на разогретом полозе дорожка теплового контакта заметна незначительно, но именно она задает максимальное значение температуры (рисунок 1, б).

Термограмма переходного режима (см. рисунок 1, а) интересна в первую очередь с научной точки зрения, поскольку визуально отображаемые в инфракрасном свете тепловые пятна и дорожки сильноточного контакта являются источником нагрева полоза токоприемника и указывают на причины распределения температуры и характер ее неравномерности.

Термограмма установившегося режима (см. рисунок 1, б) характеризует систему токосъема с практической точки зрения, по ней можно определить электрические характеристики токоприемника при максимальной температуре нагрева его элементов и вынести заключение о работоспособности системы и возможности протекания соответствующих значений тока.



а б

Рисунок 1 – Тепловой след сильноточного контакта на полозе токоприемника при движении:
а – переходный режим; б – установившийся режим

Результаты исследования многочисленных термограмм переходных и установившихся режимов легли в основу математического моделирования тепловых процессов на трехмерной модели полоза токоприемника [3 – 6]. Предлагаемая модель выполнена в программе SolidWorks, а исследование тепловых процессов осуществлено в приложении Flow Simulation. Недостатком указанного приложения является отсутствие возможности реализовать перемещение контактного провода вдоль полоза токоприемника. При разработке моделей учитывались результаты расчетов ученых УрГУПСа, приведенные в работах [7, 8],

В общем виде уравнение теплового баланса для полоза токоприемника, приведенное в работе [1], может быть усовершенствовано следующим образом:

$$\Delta P = \Delta P + Q_A + Q_{\lambda k} + Q_\lambda + Q_B, \quad (1)$$

где ΔP – тепловые потери в электрическом скользящем контакте, отнесенные к источнику тепловой энергии;

Q_C – тепловой поток, расходуемый на повышение температуры вставки;

Q_A – тепловой поток, рассеиваемый в окружающую среду естественным способом;

$Q_{\lambda k}$ – тепловой поток, передающийся в каркас полоза;

Q_λ – тепловой поток вдоль полоза;

Q_B – тепловой поток, рассеиваемый принудительно через систему охлаждения.

Имитация процесса перемещения осуществлена неподвижным контактом между вставкой и имитатором контактного провода, расположенным не поперек, а вдоль полоза, и показывающим аналогичные результаты распределения температур по результатам расчета, как на термограммах во время эксперимента (рисунок 2). Высота имитатора провода минимальна

для обеспечения воздушного охлаждения верхней поверхности вставки, в том числе за проводом по ходу движения и обдува полоза. Нагрев формируется двумя способами: заданием постоянной температуры провода, принимаемого за источник бесконечной мощности, или величиной мощности в точке контакта.

Преимуществом предлагаемой модели является возможность оценки температуры не только поверхности твердых тел, но и внутренней составляющей. На рисунке 2 приведены результаты расчета изолиний температуры – изотерм поперечного сечения европолоза фирмы Сименс со вставкой типа Кашпировски с импегнированным углеграфитом в медной обойме. Результат продольного расчета изотерм полоза типовой контракции приведен на рисунке 3, а.

Конструкции каркасных полозов замкнутого типа [9] могут быть дополнены системами охлаждения: конфузором, установленным по центру для максимально эффективного снижения наиболее нагретой средней части (рисунок 3, б), и насадками (конфузором и диффузором) по краям полоза для продольного охлаждения (рисунок 3, в).

Конструктивно у предлагаемых полозов отсутствуют пластиковые заглушки по краям. У полоза, представленного на рисунке 3, б, воздух, забираемый конфузором по центру, проходит по трем внутренним полостям в левый и правые края, выходя наружу по концам каркаса. У полоза, изображенного на рисунке 3, в, воздух движется вдоль каркаса от края с конфузором до края с диффузором независимо от направления движения токоприемника.

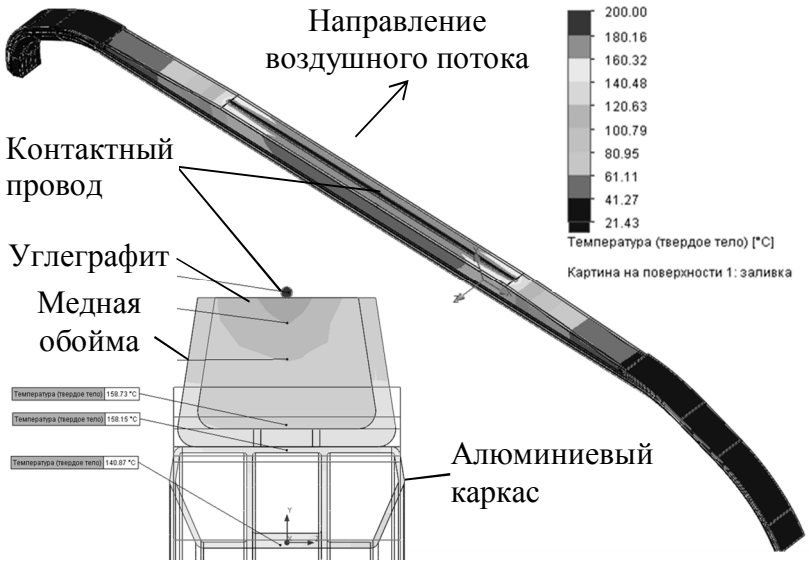


Рисунок 2 – Трехмерная модель тепловых процессов «полоз – контактный провод» в режиме движения

Изолинии температуры на полозе имеют характерное искривление в области конфузора по центру (см. рисунок 3, б), поскольку охлаждение в середине наблюдается больше. Продольное охлаждение (см. рисунок 3, в), являясь односторонним, приводит к смещению изолиний в сторону диффузора, поскольку у конфузора охлаждение интенсивнее, а по пути движения воздуха через каркас последний нагревает его и воздух, как охладитель, теряет свою эффективность.

Распределение температуры в продольном сечении полоза токоприемника позволяет оценить степень влияния охлаждения, осуществляемого в каркасе полоза, через конфузоры.

Результаты расчета изотерм в поперечном сечении центра полоза в номинальном режиме нагрева верхней части вставок 200 °С приведены на рисунке 5. Во всех полозах наблюдается асимметрия изолиний смещенных по направлению движения, поскольку ветровое воздействие с фронтальной стороны охлаждает полоз интенсивнее, чем с тыловой.

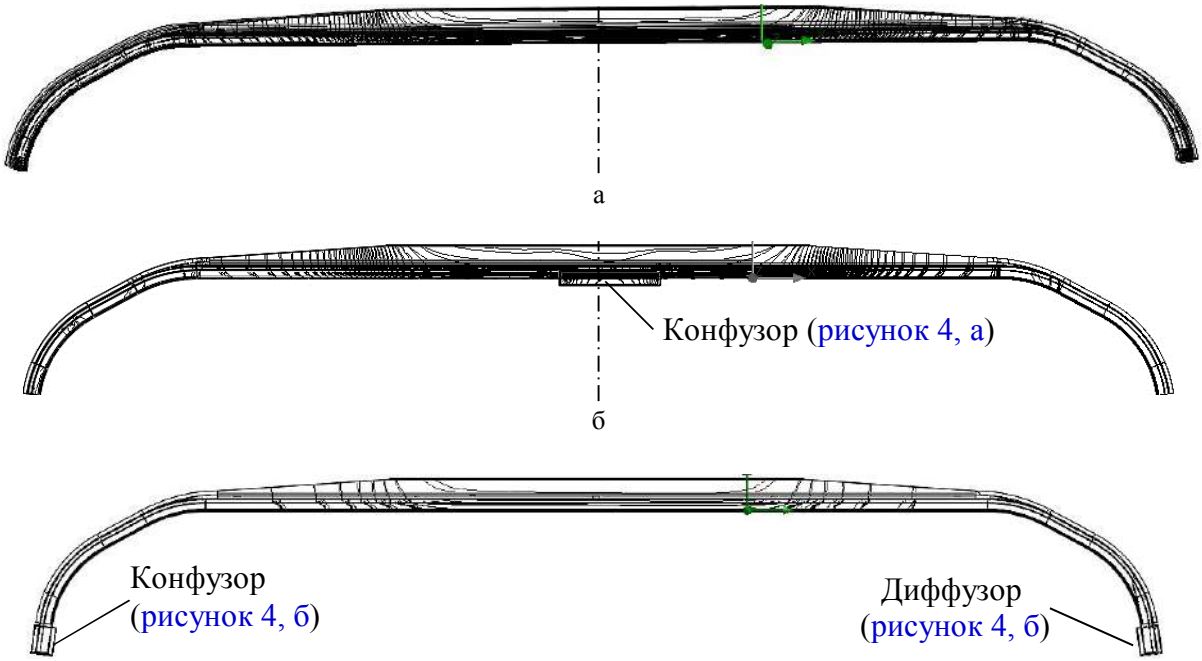


Рисунок 3 – Положение изотерм полоза токоприемника:
а – типовой конструкции; б – с конфузором по центру; в – с продольным охлаждением

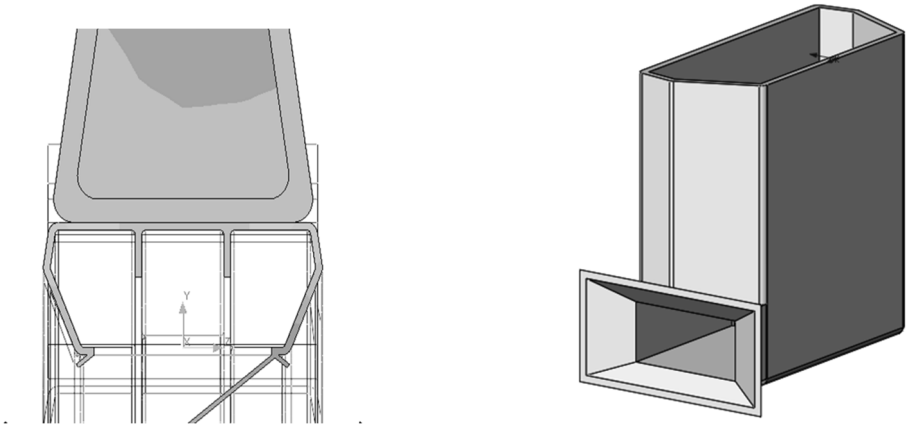


Рисунок 4 – Конструкция устройств охлаждения полозов: а – сечение полоза с конфузором по центру;
б – насадка конфузора (диффузора) на концы каркаса полоза

Оценка эффективности предлагаемых устройств возможна путем сравнения температуры в нижней части вставки. Численные значения температуры нижней части вставки полоза с конфузором по центру меньше типового и составляют 175 °С против 161 °С соответственно, для полоза с продольным охлаждением – 154 °С.

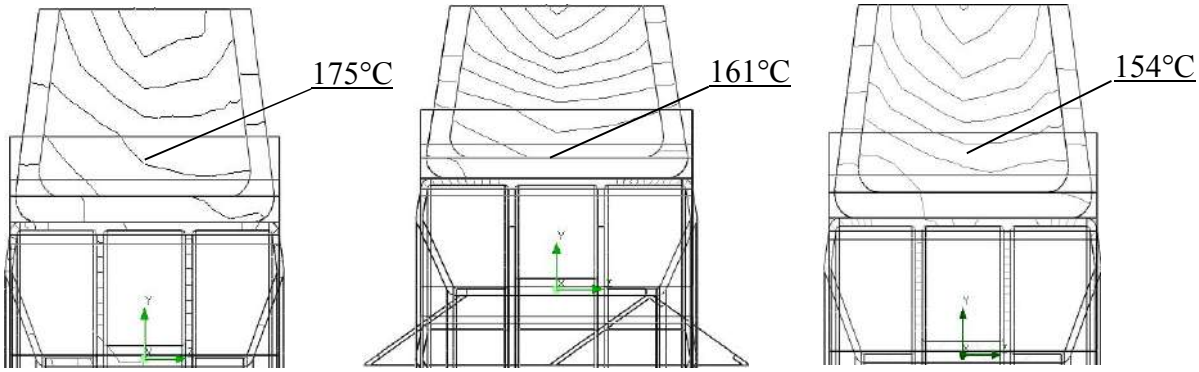


Рисунок 5 – Сравнение результатов расчета тепловых спектров поперечных сечений:
а – типовая конструкция; б – с конфузором по центру; в – с конфузорами по краям полоза

Для адекватного сравнения с экспериментальными исследованиями в предлагаемой методике оценка распределения температур осуществляется в соответствии с ГОСТ 32204-2013 «Токоприемники электроподвижного состава» [10], в котором указывается, что температура нагрева определяется как средняя температура наиболее нагретой площадки шириной не менее 30 мм. Результат численной оценки приведен на рисунке 6, из которого следует, что предлагаемые устройства являются эффективными и приводят к снижению температуры на 10 °С. Конструкция увеличенного конфузора с сечением вдвое большим предлагаемого не дает значительных преимуществ, что следует из результатов расчета.

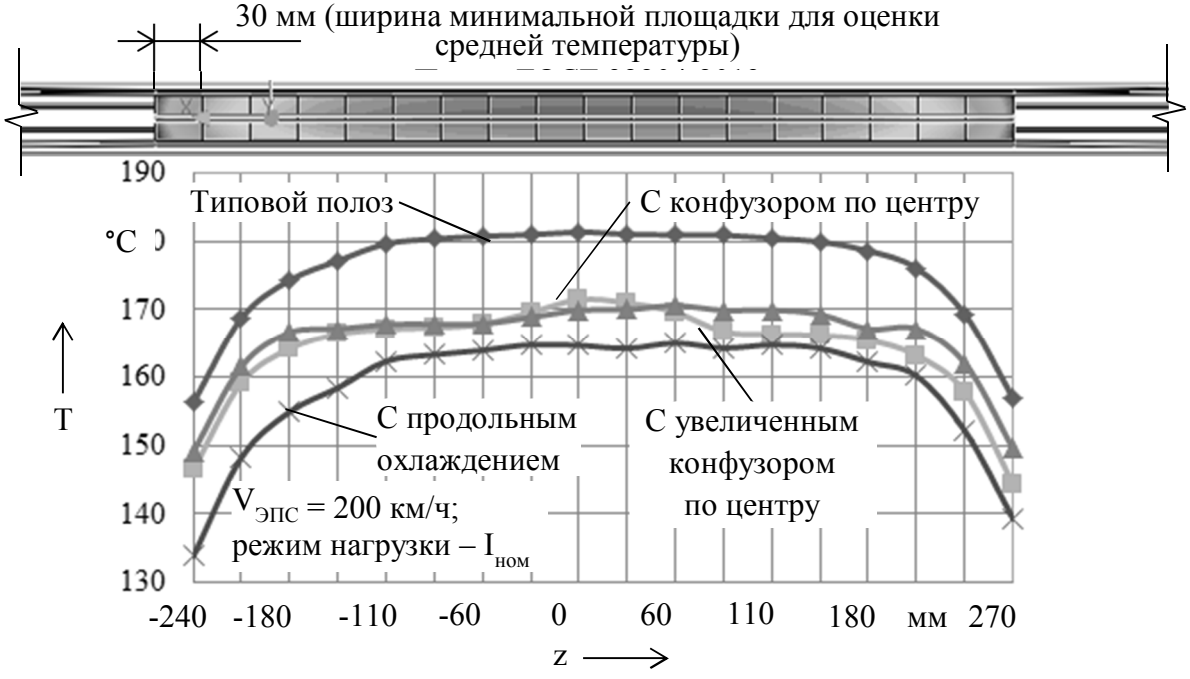


Рисунок 6 – Распределение средней температуры поверхности полоза

Графики разницы температуры верхней и нижней частей вставки, построенные для скорости движения токоприемника 100, 150 и 200 км/ч в номинальном режиме потребления тока и при 80 %, приводящего к максимальному нагреву вставки 200 и 160 °С, приведены на

рисунке 7. Из приведенных графиков видно, что при повышении скорости эффективность охлаждения увеличивается нелинейно. С учетом данных рисунка 6 полоз с продольным охлаждением имеет преимущество, поскольку верхняя часть вставки охлаждается на 5 °С интенсивнее в центральной части.

Для оценки работоспособности системы охлаждения полоза в условиях, максимально приближенных к реальным, был проведен эксперимент с продольным охлаждением одной полости каркаса первого по ходу движения полоза. Охлаждаемая полость расположена ближе к фронтальной части полоза – набегающей стороны.

До момента начала охлаждения полоза (рисунок 8, а) был достигнут установившийся режим его нагрева (рисунок 8, б) при съеме тока 2200 А.

Поверхности распределения температуры полозов токоприемника в режиме охлаждения приведены на рисунке 9. Максимальная величина снижения температуры наблюдается в максимуме нагрева полоза и составляет 3°С. Время охлаждения – 3 минуты. Распределение температуры второго по ходу движения полоза не изменилось.

Из-за специфики конструкции полоза исследуемого токоприемника во вторую и третью полости каркаса подать охлаждение представлялось затруднительным, однако при реализации такого решения снижение температуры будет еще больше.

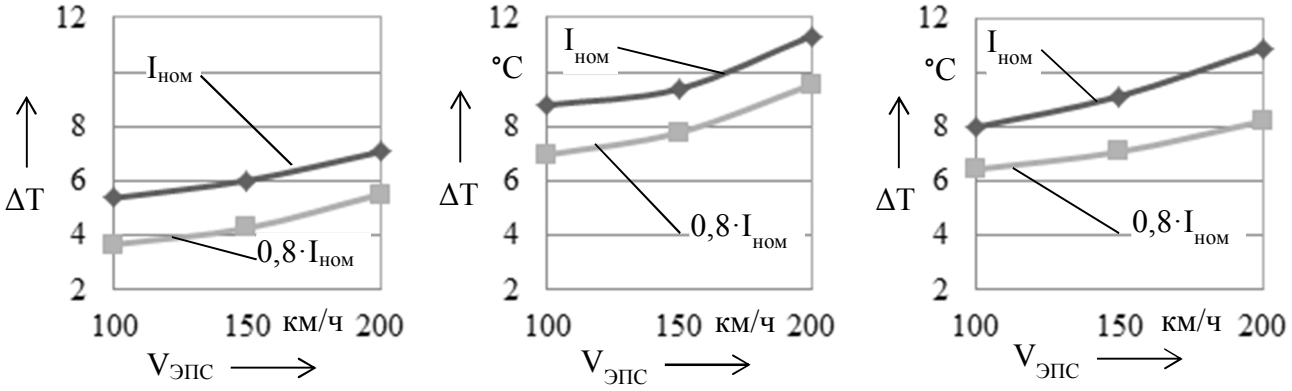


Рисунок 7 – Разница температуры сверху и снизу контактной вставки:
а – типовой конструкции; б – с конфузором по центру; в – с продольным охлаждением

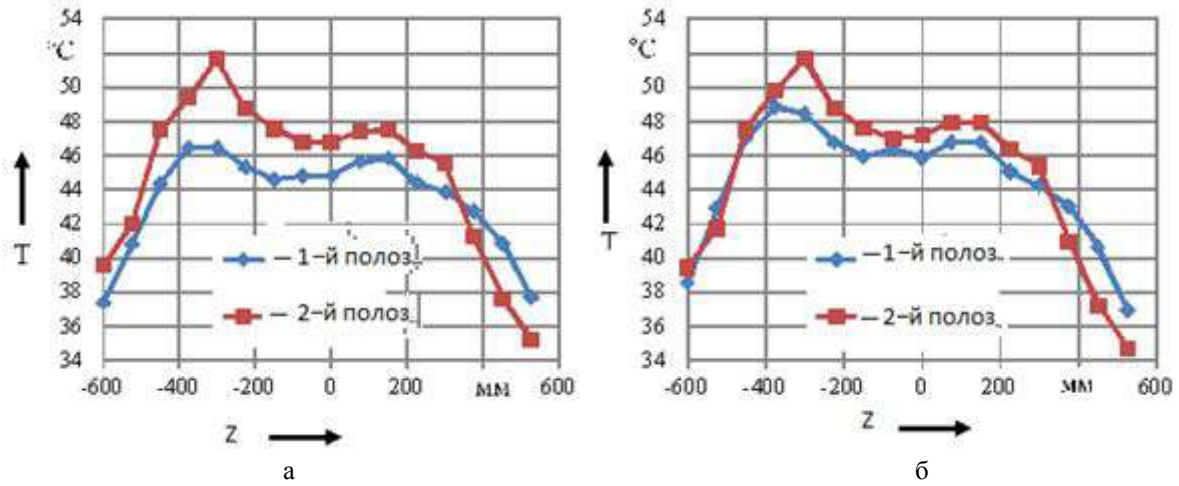


Рисунок 8 – Распределение нагрева вдоль полоза в установившемся режиме:
а – с охлаждением первого полоза; б – без охлаждения

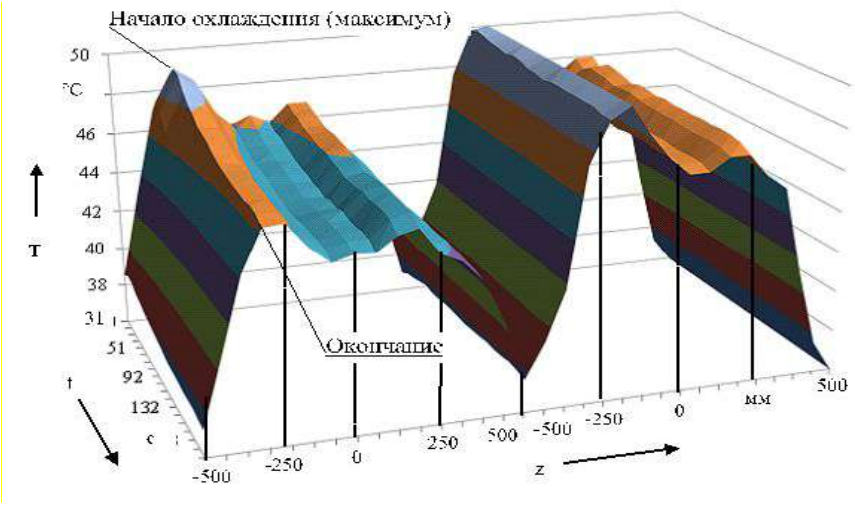


Рисунок 9 – Поверхности нагрева полозов токоприемника при съеме тока 2200 А:
слева – первый по ходу движения полоз с охлаждением одной полости; справа – второй полоз без охлаждения

На основании изложенного можно сделать выводы.

Применение продольно расположенного имитатора контактного провода в трехмерной модели позволяет достаточно точно воспроизводить картину распределения температуры по поверхности полоза токоприемника в режиме движения и наличия зигзага.

Трехмерное моделирование в программном комплексе Solid Works позволяет исследовать продольные, поперечные и горизонтальные сечения полоза для комплексной оценки неравномерности нагрева внутренних элементов и эффективности предлагаемых решений охлаждения.

По результатам расчета установлено, что предлагаемые технические решения охлаждения полозов имеют положительный эффект охлаждения, возрастающий при увеличении скорости движения токоприемника и величины снимаемого тока.

Предложена методика оценки эффективности охлаждения полозов, заключающаяся в определении разницы температуры сверху и снизу контактной вставки.

Численные значения эффективности системы охлаждения указывают на преимущество полоза с насадками по краям и продольным охлаждением. Конструкция с конфузором по центру по результатам расчета менее эффективна. Увеличение площади входной части конфузора не дает значительного эффекта.

Предварительные экспериментальные исследования полоза с продольным охлаждением одной полости указывают на перспективность предлагаемых технических решений и адекватность математического моделирования.

Список литературы

1. Сидоров, О. А. Исследование температуры нагрева полоза токоприемника и способы ее снижения [Текст] / О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, В. В. Томилов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 4 (32). – С. 25 – 34.

2. Сидоров, О. А. Исследование конструкции европолозов токоприемников электроподвижного состава для улучшения качества токосъема [Текст] / О. А. Сидоров, В. В. Томилов, С. М. Утепбергенова // Материалы IV всеросс. науч.-практ. конф. «Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов» / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2018. – С. 153 – 159.

3. Исследования токовой нагрузочной способности токоприемника магистрального электроподвижного состава [Текст] / В. М. Павлов, О. А. Сидоров и др. // Вестник ВНИИЖТа/ М. – 2015. – № 4. – С. 19 – 24.

4. Проверка токовой нагрузочной способности токоприемников ТАс 24 и ЛАс 25 [Текст] / В. М. Павлов, П. В. Попов и др. // Вестник ВЭлНИИ / ВЭлНИИ. – Новочеркасск. – 2015. – № 2 (70). – С. 33 – 43.

5. Экспериментальные исследования нагрузочной способности токоприемника магистрального электроподвижного состава [Текст] / В. М. Павлов, А. Н. Смердин и др. // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте: материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2013. – С. 62 – 69.

6. Сидоров, О. А. Совершенствование методов испытаний контактных подвесок и токоприемников [Текст] / О. А. Сидоров, А. Н. Смердин // Железнодорожный транспорт. – 2010.– № 11. – С. 72 – 74.

7. Паранин, А. В. Расчет распределения тока в контактном проводе и полозе токоприемника при токосъеме [Текст] / А. В. Паранин, Д. А. Ефимов // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2009. – № 4 (23). – С. 81 – 84.

8. Паранин, А. В. Математическое моделирование тепловых процессов при взаимодействии токоприемника и контактного провода [Текст] / А. В. Паранин // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2009. – № 4 (23). – С. 85 – 88.

9. Сидоров, О. А. Расчет эффективности систем охлаждения токоприемников электроподвижного состава с применением трехмерного численного моделирования [Текст] / О. А. Сидоров, В. В. Томилов, С. М. Утепбергенова // Материалы науч. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – С. 281 – 288.

10. ГОСТ 32204-2013. Токоприемники железнодорожного электроподвижного состава. Общие технические условия [Текст]. – М.: Стандартинформ, 2014. – 24 с.

References

1. Sidorov O. A., Smerdin A. N., Tomilov V. V. Research of temperature distribution unequality of a panhead and its reduction methods [Issledovaniye temperatury nagrevy poloza tokopriyemnika i sposoby yeye snizheniya]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2017, vol. 32, no. 3, pp 25 – 34

2. Sidorov O. A. Research of the design european pantograph slide electric stock for improve the quality of the current collection [Issledovaniye konstruktsii yevropolozov tokopriyemnikov elektropodvizhnogo sostava dlya uluchsheniya kachestva tokos"yema]. *Materialy IV vserossiyskoy nauch-prak. konf., «Ekspluatatsionnaya nadezhnost' lokomotivnogo parka i povysheniye effektivnosti tyagi poyezdov»* (Materials of the IV All-Russian Scientific Practical Conf. «Operational reliability of the locomotive fleet and increasing the efficiency of train traction»). Omsk, 2018, pp.153 – 159.

3. Pavlov V. M., Sidorov O. A., Smerdin A. N., Golubkov A. S., Tartynskiy D. V, Tomilov V. V. Current-Loading Capacity Investigations of Current Collector Operated with Mainline Electric Motive Power [Issledovaniia tokovoi nagruzochnoi sposobnosti tokopriemnika magistral'nogo elektropodvizhnogo sostava]. *Vestnik VNIIZHTa – Vestnik of the Railway Research Institute*, 2015, no. 4, pp. 19 – 24.

4. Pavlov V. M., Popov P. V., Sidorov O. A., Smerdin A. N., Tomilov V. V. Continuous current-carrying capacity test of TAs 24 and LAs 25 current-collectors [Proverka tokovoi nagruzochnoi sposobnosti tokopriemnikov TAs 24 i LAs 25]. *Vestnik VELNII Science Journal*, 2015, no. 2 (70), pp. 33 – 43.

5. Pavlov V. M., Smerdin A. N., Tomilov V. V., Golubkov A. S., Emelyanov M. V. Experimental investigations of loading capacity of the main electric previous pantographs [Eksperimental'nye issledovaniia nagruzochnoi sposobnosti tokopriemnika magistral'nogo elektropodvizhnogo sostava] Materialy Vserossiiskoi nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar. uchastiem.:

Pribory i metody izmerenii, kontrolia kachestva i diagnostiki v promyshlennosti i na transporte. – Omsk, 2013, pp. 62 – 69.

6. Sidorov O. A., Smerdin A. N. Improvement of methods of tests of catenarys and pantographs [Sovershenstvovanie metodov ispytanii kontaktnykh podvesok i tokopriemnikov]. *Zheleznodorozhny`j transport – Railway Transport Journal,* 2010, no. 11, pp. 72 – 74.

7. Paranin A. V., Yefimov D. A. Calculation of current distribution in contact wire and current collector runner at current pickup [Raschet raspredeleniia toka v kontaktnom provode i poloze tokopriemnika pri tokos"eme]. *Transport Urala – Transport Od The Urals*, 2009, no. 4 (23), pp. 81 – 84.

8. Paranin A. V. Mathematical modeling of thermal processes at interaction of a current collector and a contact wire [Matematicheskoe modelirovanie teplovykh protsessov pri vzaimodeistvii tokopriemnika i kontaktnogo provoda]. *Transport Urala – Transport Od The Urals*, 2009, no. 4 (23), pp. 85 – 88.

9. Sidorov O. A. Calculation of the efficiency of the cooling systems of current collector electric stock with the use of three-dimensional modeling [Raschet effektivnosti sistem okhlazhdeniya tokopriyomnikov elektropodvizhnogo sostava s primeneniyem trokhmernogo chislennogo modelirovaniya]. *Materialy nauch. konferentsii., posvyashchennoy* Dnyu Rossiyskoy nauki *«Innovatsionnyye proyekty i novyye tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte»* (Abstracts of the Int. conference «Innovative projects and new technologies in education, industry and transport»).Omsk, 2019, pp.281 – 288.

10. *Current collectors of railway electric rolling stock. General specification, GOST 32204-2013* (Tokopriemniki zheleznodorozhnogo elektropodvizhnogo sostava. Obshchie tekhnicheskie usloviia, State Standart 32204-2013). Moscow, Standarty, 2013, 24 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Утепбергенова Сандугаш Мырзабековна
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.
Аспирантка кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.
Тел.: +7 (904) 070-09-86.
E-mail: sandee86@mail.ru

Томилов Валерий Викторович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.
Тел.: +7 (913) 610-62-67.
E-mail: tomilov_omsk@mail.ru

Сидоров Олег Алексеевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.
Доктор технических наук, заведующий кафедрой «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.
Тел.: +7 (3812) 31-34-46.
E-mail: egt@omgups.ru

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Utepbergenova Sandugash Myrzabekovna
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.
Postgraduate student of the Department « Power supply of railway transport », OSTU.
Phone: +7 (904) 070-09-86
E-mail: sandee86@mail.ru

Tomilov Valery Viktorovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.
Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department «Power supply of railway transport», OSTU.
Phone: +7 (913) 610-62-67
E-mail: tomilov_omsk@mail.ru

Sidorov Oleg Alekseevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.
Advanced Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department «Power supply of railway transport», OSTU.
Phone: +7 (3812) 31-34-46
E-mail: egt@omgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Утепбергенова, С. М. Исследование систем охлаждения полоза токоприемника магистрального электроподвижного состава [Текст] / С. М. Утепбергенова, В. В. Томилов, О. А. Сидоров // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 2 (38). – С. 66 – 75.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Utepbergenova S. M., Tomilov V. V., Sidorov O. A. Research of cooling system for pantograph head of electric train. Journal of Transsib Railway Studies, 2019, vol. 2, no. 38 , pp. 66 – 75 (In Russian).

УДК 656.2:620.9

Е. А. Сидорова, С. О. Подгорная
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),
г. Омск, Российская Федерация

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОЛОГИИ КОНТРОЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛОКОМОТИВОВ НА ТЯГУ ПОЕЗДОВ

Аннотация. *С появлением новых серий локомотивов, развитием тяжеловесного движения грузовых поездов, повышением скоростей движения пассажирских составов, внедрением инновационных технических средств и технологий происходит перераспределение степени влияния различных показателей на расход энергоресурсов. Целью статьи является представление разработки методологии контроля эффективности использования локомотивов при изменении комплекса эксплуатационных факторов. Предложенная методология контроля позволит более точно определять расчетное изменение удельного расхода энергии, что в свою очередь обеспечит повышение объективности оценки причин изменения энергоемкости перевозок и будет способствовать снижению потерь энергии.*

***Ключевые слова*:** *топливно-энергетические ресурсы, тяга поездов, энергоэффективность, удельный расход энергии, контроль, использование локомотивов.*

Elena A. Sidorova, Svetlana O. Podgornaya
Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, The Russian Federation

IMPROVING THE METHODOLOGY OF CONTROL THE LOCOMOTIVES USE EFFICIENCY TO THE TRAIN TRACTION

Abstract. *With the advent of new series of locomotives, the development of heavy freight trains, the increasing speeds of passenger trains, the introduction of innovative technical means and technologies, the degree of influence of various indicators on energy consumption is redistributed. The aim of the article is to develop a methodology for monitoring the efficiency of locomotives when changing the set of operational factors. This will make it possible to more accurately determine the estimated change in specific energy consumption, which in turn will increase the objectivity of the assessment of the causes of changes in the energy intensity of transport and will help to reduce energy losses.*

Keywords: *fuel and energy resources, train traction, energy efficiency, specific energy consumption, monitoring, use of locomotives.*

С каждым годом в большинстве сфер производственной деятельности растет спрос на энергию, поэтому вопросы развития энергосберегающих технологий, которые позволяют решить глобальные проблемы экономического роста и энергетической безопасности, становятся все более актуальными. Эффективное и рациональное использование топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в настоящее время остается одной из важных задач энергетической стратегии нашей страны [1]. К числу наиболее энергоемких отраслей экономики России, обладающих значительным потенциалом энергосбережения, относится железнодорожный транспорт [2]. Более чем три четверти от общего объема энергопотребления на сети железных дорог затрачивается на тягу поездов. Эффективная производственная деятельность в этой сфере невозможна без правильного определения потребности в энергоресурсах, рацио-

нальной организации топливо- и энергоиспользования, соответствующих современному уровню технического развития, устройству технологического процесса перевозок и объему выполняемой работы.

Достижение высокой результативности деятельности ОАО «РЖД» за счет технологической модернизации и инновационного развития компании реализуется путем повышения энергоэффективности и внедрения ресурсосберегающих технологий. Основным показателем энергетической эффективности перевозочного процесса на железнодорожном транспорте является удельный расход ТЭР [3]. На каждом уровне управления ОАО «РЖД» (сеть железных дорог, региональная дирекция, эксплуатационное локомотивное депо) устанавливают технически обоснованные плановые нормы удельного расхода энергии (УРЭ) локомотивами на единицу выполняемой работы с учетом сложившихся среднестатистических значений эксплуатационных факторов, отражающие технико-экономические показатели подвижного состава и его использования.

Важная роль в повышении точности нормирования, планирования и прогнозирования расхода ТЭР на тягу поездов отводится объективному контролю изменения энергоэффективности тягового подвижного состава (ТПС) относительно достигнутых ранее значений за счет изменения эксплуатационных факторов. С появлением новых серий локомотивов, развитием тяжеловесного движения грузовых поездов, повышением скоростей движения пассажирских составов, внедрением инновационных технических средств и технологий происходит перераспределение степени влияния различных показателей на тяговое энергопотребление. Целью статьи является представление разработки методологии оценки и контроля эффективности использования ТПС на тягу поездов при изменении комплекса эксплуатационных факторов.

УРЭ на тягу поездов в целом на любом уровне управления расходом ТЭР $b_{\text{общ}}$ определяется по формуле:

$$b_{\text{общ}} = \frac{\sum\limits_{j} W_j + W_{\text{МР}}}{\sum\limits_{j} A_j}, \qquad (1)$$

где W_j, A_j – расход ТЭР, кВт·ч (кг), и перевозочная работа, 10 тыс. ткм брутто, в j-м виде движения (кроме маневровой работы) соответственно;

$W_{\text{мр}}$ – расход ТЭР на маневровой работе, кВт·ч (кг).

На величину $b_{\text{общ}}$ оказывает влияние множество эксплуатационных факторов. Анализ данных и структуры оперативной и статистической отчетности ОАО «РЖД» по всем железным дорогам и эксплуатационным локомотивным депо за 2012 – 2017 гг. позволил сформировать перечень показателей, которые следует учитывать при контроле энергоэффективности локомотивов и выяснении причин ее изменения. Эти факторы систематизированы по группам в зависимости от их физической сути, специфики учета и особенностей влияния на энергопотребление (рисунок).

Основным направлением контроля энергоэффективности ТПС на каждом уровне управления расходом ТЭР является оценка отклонения фактического изменения УРЭ в отчетном периоде относительно базового $\Delta b_{\text{общ}}^{\text{факт}}$ с соответствующей расчетной величиной общего изменения УРЭ за счет влияния изменения эксплуатационных факторов $\Delta b_{\text{общ}}^{\text{расч}}$. В качестве базового периода выбирается аналогичный отчетному прошлый календарный период.

Фактическое изменение УРЭ в отчетном периоде относительно базового вычисляется по выражению:

$$\Delta b_{\text{общ}}^{\text{факт}} = b_{\text{общ}}^{\text{отч}} - b_{\text{общ}}^{\text{баз}}, \qquad (2)$$

где $b_{\text{общ}}^{\text{отч}}, b_{\text{общ}}^{\text{баз}}$ – УРЭ на тягу поездов в целом на каждом уровне управления расходом ТЭР, кВт·ч (кг)/ 10 тыс. ткм брутто, в отчетном и базовом периодах соответственно, определяемый по статистическим данным по формуле (1).

Расчетная величина общего изменения УРЭ за счет влияния изменения эксплуатационных факторов вычисляется по выражению:

$$\Delta b_{\text{общ}}^{\text{расч}} = \sum_{n} \Delta b_{n}^{\text{расч}}, \quad (3)$$

где $\Delta b_{n}^{\text{расч}}$ – изменение УРЭ за счет влияния изменения n-го эксплуатационного фактора в отчетном периоде относительно базового, кВт·ч (кг)/10 тыс. ткм брутто.

Определение значений $\Delta b_{n}^{\text{расч}}$ для каждого фактора групп № 1 – 3 (см. рисунок) и отмеченных символом «*» факторов группы № 5 осуществляется по статистическим данным и подробно рассмотрено в статье [4]. Предложенный в данной статье подход к способу контроля расхода ТЭР на тягу поездов реализован в Методике анализа и прогнозирования расхода ТЭР на тягу поездов [5], внедренной на сети железных дорог России, однако в этом документе отсутствуют рекомендации по определению факторов групп № 4 и № 5, обозначенных символом «**» (см. рисунок).

Для определения расчетных значений влияния УРЭ в непоездных видах работы на изменение УРЭ на каждом уровне управления расходом ТЭР предлагается использовать следующие выражения:

в хозяйственном движении –

$$\Delta b_{b_{\text{хоз}}}^{\text{расч}} = \left(b_{\text{хоз}}^{\text{отч}} - b_{\text{хоз}}^{\text{баз}}\right) \cdot \frac{\gamma A_{\text{хоз}}^{\text{отч}}}{100}, \quad (4)$$

где $b_{\text{хоз}}^{\text{отч}}$, $b_{\text{хоз}}^{\text{баз}}$ – УРЭ в хозяйственном движении, кВт·ч (кг)/10 тыс. ткм брутто, в отчетном и базовом периодах соответственно;

$\gamma A_{\text{хоз}}^{\text{отч}}$ – доля работы в хозяйственном движении относительно общей работы на соответствующем уровне управления расходом ТЭР, %, в отчетном периоде;

на маневровой работе –

$$\Delta b_{b_{\text{ман}}}^{\text{расч}} = \left(b_{\text{ман}}^{\text{отч}} - b_{\text{ман}}^{\text{баз}}\right) \cdot \frac{L_{\text{общ}}^{\text{баз}}}{100 \cdot A^{\text{баз}}}, \quad (5)$$

где $b_{\text{ман}}^{\text{отч}}$, $b_{\text{ман}}^{\text{баз}}$ – УРЭ на маневровой работе, кВт·ч (кг)/100 лок.·км, в отчетном и базовом периодах соответственно;

$L_{\text{общ}}^{\text{баз}}$ – общий пробег на маневровой работе, лок.·км, в базовом периоде;

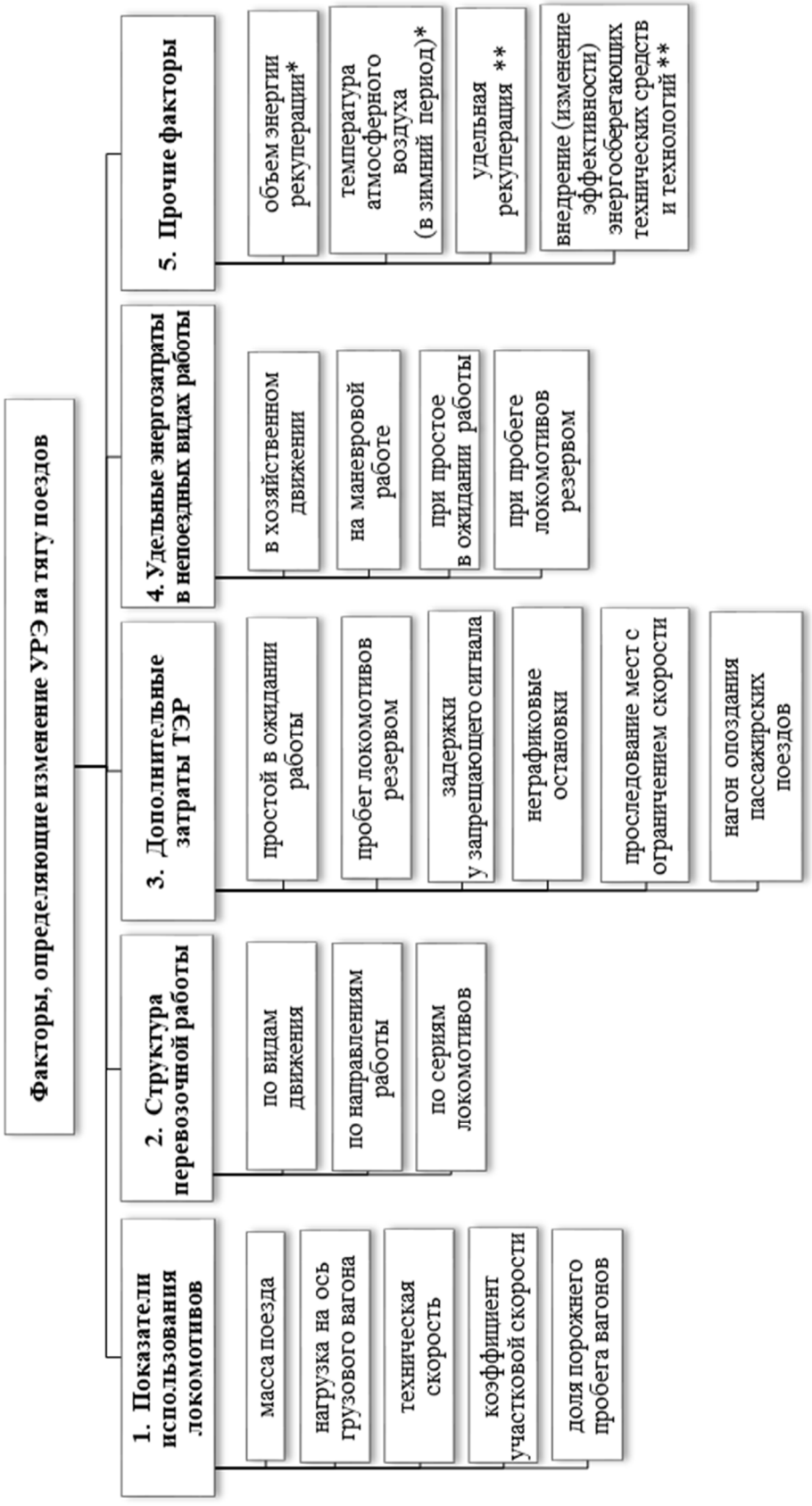
$A^{\text{баз}}$ – общая работа на соответствующем уровне управления расходом ТЭР в базовом периоде, 10 тыс. ткм брутто.

На изменение УРЭ оказывают влияние не только изменения абсолютных значений таких влияющих факторов, как время простоя локомотива в ожидании работы без локомотивной бригады и пробег локомотивов резервом, но и УРЭ при этих процессах.

Расчетное изменение УРЭ на каждом уровне управления расходом ТЭР при изменении УРЭ на один час простоя локомотивов в ожидании работы без локомотивной бригады в j-м виде движения предлагается определять по формуле:

$$\Delta b_{b_{\text{ож}\,j}}^{\text{расч}} = \left(b_{\text{ож}\,j}^{\text{отч}} - b_{\text{ож}\,j}^{\text{баз}}\right) \cdot \frac{T_{\text{ож}\,j}^{\text{баз}}}{A^{\text{баз}}}, \quad (6)$$

где $b_{\text{ож}\,j}^{\text{отч}}$, $b_{\text{ож}\,j}^{\text{баз}}$ – УРЭ на один час простоя локомотива в ожидании работы без локомотивной бригады в j-м виде движения, кВт·ч (кг)/ч, в отчетном и базовом периодах соответственно; $T_{\text{ож}\,j}^{\text{баз}}$ – время простоя локомотива в ожидании работы без локомотивной бригады в j-м виде движения в базовом периоде, ч.



Классификация факторов, определяющих изменение УРЭ на тягу поездов

Расчетное изменение УРЭ на каждом уровне управления расходом ТЭР при изменении УРЭ при пробеге локомотивов резервом в *j*-м виде движения определяется по выражению:

$$\Delta b^{\text{расч}}_{b_{\text{рез } j}} = \left(b^{\text{отч}}_{\text{рез } j} - b^{\text{баз}}_{\text{рез } j}\right) \cdot \frac{L^{\text{баз}}_{\text{рез } j}}{100 \cdot A^{\text{баз}}}, \quad (7)$$

где $b^{\text{отч}}_{\text{рез.}j}$, $b^{\text{баз}}_{\text{рез.}j}$ – УРЭ на один час простоя локомотива в ожидании работы без локомотивной бригады в *j*-м виде движения, кВт·ч (кг)/100 лок.·км, в отчетном и базовом периодах соответственно;

$L^{\text{баз}}_{\text{рез } j}$ – пробег локомотивов резервом в *j*-м виде движения в базовом периоде, лок.·км.

Расчетное изменение УРЭ на каждом уровне управления расходом ТЭР при изменении удельной рекуперации в каждом *j*-м виде движения (кроме маневровой работы) рассчитывается следующим образом:

$$\Delta b^{\text{расч}}_{b_{\text{рек } j}} = \left(b^{\text{баз}}_{\text{рек } j} - b^{\text{отч}}_{\text{рек } j}\right) \cdot \frac{\gamma A^{\text{отч}}_{j}}{100}, \quad (8)$$

где $b^{\text{баз}}_{\text{рек}\,j}$, $b^{\text{отч}}_{\text{рек } j}$ – удельная рекуперация в *j*-м виде движения, кВт·ч/10 тыс. ткм брутто, в базовом и отчетном периодах соответственно;

$\gamma A^{\text{отч}}_{j}$ – доля работы в *j*-м виде движения относительно общей работы на соответствующем уровне управления расходом ТЭР в отчетном периоде, %.

На сети железных дорог для повышения эффективности использования энергоресурсов активно внедряют инновационные технические средства и технологии. Данные отчетов Международного энергетического агентства (IEA) об энергоемкости железнодорожного транспорта за последние годы позволяют сделать вывод о том, что в отдельных странах улучшение физической результативности энергосберегающей деятельности происходит намного быстрее, чем в России [6]. Это можно объяснить прежде всего тем, что потенциал повышения энергоэффективности российских железных дорог во многом исчерпан (достигнут естественный предел эффективности использования существующих технологий), и ее дальнейшее снижение возможно за счет внедрения инновационных, наукоемких и затратных энергоэффективных технических средств и технологий по всем видам деятельности ОАО «РЖД» [1].

В 2017 г. в результате реализации подразделениями ОАО «РЖД» комплекса мероприятий по энергосбережению УРЭ на тягу поездов был снижен относительно 2016 г. на электрической тяге на 1,3 %, на дизельной – на 1,0 % [7]. Такие показатели были достигнуты в том числе и путем ужесточения плановых норм энергозатрат на тягу за счет повышения эффективности применения рекуперативного торможения [8], обновления парка локомотивов, внедрения энергооптимального графика движения поездов [9], внедрения ресурсосберегающих технологий [10] и др. В связи с этим предложено дополнить методологию контроля изменения энергозатрат на тягу следующей формулой для расчета изменения УРЭ от внедрения (изменения эффективности) энергосберегающих технических средств на локомотивах, новых технологий вождения поездов, изменения результативности лубрикации зоны контакта «колесо – рельс» и других мероприятий:

$$\Delta b^{\text{расч}}_{\text{сбер } i} = \frac{\Delta B^{\text{баз}}_{\text{сбер } i} - \Delta B^{\text{отч}}_{\text{сбер } i}}{A^{\text{отч}}}, \quad (9)$$

где $\Delta B^{\text{баз}}_{\text{сбер } i}$, $\Delta B^{\text{отч}}_{\text{сбер } i}$ – изменение расхода ТЭР, кВт·ч (кг), за счет внедрения (изменения эффективности) *i*-го энергосберегающего средства или технологии в базовом и отчетном периодах соответственно, определяется по формуле:

$$\Delta B_{\text{сбер } i} = \frac{B_{\text{сбер } i} \cdot \delta_{\text{сбер } i}}{100 - \delta_{\text{сбер } i}}, \quad (10)$$

где $B_{\text{сбер } i}$ – суммарный расход ТЭР на локомотивах с применением *i*-го энергосберегающего средства или технологии в рассматриваемом периоде, кВт·ч (кг);

$\delta_{\text{сбер } i}$ – величина экономии ТЭР за счет применения *i*-го энергосберегающего средства или технологии, определяемая по соответствующим методикам, регламентирующим их применение [11, 12], %;

$A^{\text{отч}}$ – общая работа на соответствующем уровне управления расходом ТЭР в отчетном периоде, 10 тыс. ткм брутто.

Учет указанных факторов по формулам (4) – (9) даст возможность более точного определения расчетного изменения УРЭ, что, в свою очередь, обеспечит повышение объективности оценки причин изменения энергоемкости перевозок и будет способствовать снижению потерь энергии. Всесторонний анализ результатов потребления ТЭР позволит выработать стратегию и тактику дальнейшего развития железнодорожного транспорта в сфере энергосбережения, обосновать плановые нормы УРЭ, осуществить контроль за их выполнением, выявить резервы повышения эффективности перевозочного процесса, оценить результаты деятельности ОАО «РЖД», его подразделений и работников.

Список литературы

1. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2016. – 76 с.

2. Транспорт Российской Федерации. Энергосбережение и энергоэффективность на железнодорожном транспорте [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.rostransport.com/article/201174/ (Дата обращения: 15.05.2019).

3. Распоряжение ОАО «РЖД» от 17.09.2007 № 1808р «О планировании и нормировании расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов в ОАО «РЖД» [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2007.

4. Sidorova E. Improvement of traction rolling stock energy efficiency analysis system / E. Sidorova, S. Podgornaya // Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport (EMMFT 2017): International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT. – 2017. – Pp. 48 – 58.

5. Методика анализа и прогнозирования расхода ТЭР на тягу поездов [Текст] // Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 26.12.2014 № 512 / ОАО «РЖД». – М., 2014.

6. Международное энергетическое агентство (IEA) [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.iea.org/ (Дата обращения: 15.05.2019).

7. Годовой отчет ОАО «РЖД» за 2017 год [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ar2017.rzd.ru/ru/strategic-report (Дата обращения: 15.05.2019).

8. Черемисин, В. Т. Эффективность использования энергии рекуперации на железных дорогах постоянного и переменного тока [Текст]: Науч. монография / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2018. – 216 с.

9. Черемисин, В. Т. Повышение энергетической эффективности перевозочного процесса на основе изменения параметров графика движения поездов [Текст]: Науч. монография / В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак, А. П. Шатохин / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2019. – 250 с.

10. Ресурсосбережение. Инвестиционный проект «Внедрение ресурсосберегающих технологий на железнодорожном транспорте» [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://expo.rzd.ru/static-collage/public/ru?STRUCTURE_ID=17 (Дата обращения: 15.05.2019).

11. Распоряжение ОАО «РЖД» от 28.10.2008 № 2538р «О методических рекомендациях по расчету экономической эффективности новой техники, технологии, объектов интеллектуальной собственности и рационализаторских предложений» (в ред. распоряжения ОАО «РЖД» от 10.11.2009 № 2288р) [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2008.

12. Распоряжение ОАО «РЖД» от 09.10.2012 № 1998р «Об утверждении Методики оценки энергоэффективности применения лубрикации контакта «колесо – рельс» [Текст]/ ОАО «РЖД». – М., 2012.

References

1. *Energeticheskaya strategiya kholdinga «Rossiyskiye zheleznyye dorogi» na period do 2020 goda i na perspektivu do 2030 goda* (The energy strategy of the Russian Railways holding company for the period up to 2020 and for the future until 2030), Moscow, OAO «RZD», 14.12.2016, no. 2537r.

2. *Transport Rossijskoj Federacii. E`nergosberezhenie i e`nergoe`ffektivnost` na zheleznodorozhnom transporte*. (Transport Of The Russian Federation. Energy saving and energy efficiency in railway transport). Access Point: http://www.rostransport.com/article/201174/ (Revised: 15.05.2019).

3. *Rasporyazhenie OAO «RZD» ot 17.09.2007 № 1808r «O planirovanii i normirovanii raskhoda toplivno-energeticheskih resursov na tyagu poezdov v OAO «RZD»* (Order of the OJSC Russian Railways «On the Planning and Regulation of Fuel and Energy Resources Consumption for Traction of Trains in OJSC Russian Railways»), Moscow, OJSC «RZD», 2007.

4. Sidorova E. Improvement of traction rolling stock energy efficiency analysis system / E. Sidorova, S. Podgornaya // Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport (EMMFT 2017): International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT. – 2017. – pp. 48 – 58.

5. *Metodika analiza i prognozirovaniya raskhoda TER na tyagu poyezdov* (Methods for analyzing and forecasting the consumption of fuel and energy resources for traction of trains), Moscow, OJSC «RZhD», 26.12.2014, no. 512.

6. *Mezhdunarodnoe energeticheskoe agentstvo* (The International Energy Agency (IEA)). Access Point: https://www.iea.org/ (Revised: 15.05.2019).

7. *Godovoj otchet OAO «RZHD» za 2017 god* (Annual Report of OJSC «RZD» 2017). Access Point: https://ar2017.rzd.ru/ru/strategic-report (Revised: 15.05.2019).

8. Cheremisin V. T., Nikiforov M. M., Wilhelm A. S. Efficiency of energy recovery in railway DC and AC [Effektivnost' ispol'zovaniya energii rekuperacii na zheleznyh dorogah postoyannogo i peremennogo toka]. Omsk, 2018. – 216 p.

9. Cheremisin V. T., Nezevak V. L., Shatokhin A. P. Improving the energy efficiency of the transportation process by changing the parameters of the train schedule [Povyshenie energeticheskoj effektivnosti perevozochnogo processa na osnove izmeneniya parametrov grafika dvizheniya poezdov]. Omsk., 2019. – 250 p.

10. *Resursosberezhenie. Investicionnyj proekt «Vnedrenie resursosberegayushchih tekhnologij na zheleznodorozhnom transporte»* (Resource saving. Investment project «Introduction of resource-saving technologies in railway transport»). Access Point: http://expo.rzd.ru/static-collage/public/ru?STRUCTURE_ID=17 (Revised: 15.05.2019).

11. *Rasporyazhenie OAO «RZHD» ot 28.10.2008 g. № 2538r «O metodicheskih rekomendaciyah po raschetu ekonomicheskoj effektivnosti novoj tekhniki, tekhnologii, ob"ektov intellektual'noj sobstvennosti i racionalizatorskih predlozhenij»* (Order of the OJSC Russian Railways «On Methodological Recommendations for Calculating the Economic Efficiency of New Equipment, Technology, Intellectual Property Objects and Rationalization Proposals»), Moscow, OJSC «RZD», 2008.

12. *Rasporyazhenie OAO «RZHD» ot 09.10.2012 g. № 1998r «Ob utverzhdenii Metodiki ocenki energoeffektivnosti primeneniya lubrikacii kontakta «koleso – rel's»* (Order of the OJSC

Russian Railways «On the Approval of the Method for Assessing the Energy Efficiency of Using Wheel-Rail Contact Lubrication»), Moscow, OJSC «RZD», 2012.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сидорова Елена Анатольевна
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.
Доктор технических наук, и. о. заведующего кафедрой «Информатика и компьютерная графика», ОмГУПС.
Тел.: +7 (3812) 31-18-66.
E-mail: armsid@mail.ru

Подгорная Светлана Олеговна
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.
Старший преподаватель кафедры «Информатика и компьютерная графика», ОмГУПС.
Тел.: +7 (3812) 31-18-66.
E-mail: ps.light@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sidorova Elena Anatolievna
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.
Doctor of Technical Sciences, Acting head of the department «Computer science and computer graphics», OSTU.
Phone: +7 (3812) 31-18-66.
E-mail: armsid@mail.ru

Podgornaya Svetlana Olegovna
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.
Senior Teacher of the department «Computer science and computer graphics», OSTU.
Phone: +7 (3812) 31-18-66.
E-mail: ps.light@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Сидорова, Е. А. Совершенствование методологии контроля эффективности использования локомотивов на тягу поездов [Текст] / Е. А. Сидорова, С. О. Подгорная // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 2 (38). – С. 75 – 82.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Sidorova E. A., Podgornaya S. O. Improving the methodology for monitoring the efficiency of the use of locomotives for train traction. Journal of Transsib Railway Studies, 2019, vol. 2, no. 38, pp. 75 – 82 (In Russian).

УДК 629.039.58

А. В. Окунев, А. Г. Галкин, А. А. Ковалев
Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС), г. Екатеринбург, Российская Федерация

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ОПОР КОНТАКТНОЙ СЕТИ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ИХ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

Аннотация. *Необходимость применения различных способов прогнозирования технического состояния железобетонных опор контактной сети в настоящее время является необходимым условием обеспечения безопасности движения поездов. Такая необходимость возникла из-за наличия в эксплуатации опор с повышенными сроками эксплуатации, при отсутствии снижения нагрузок, без наличия различного рода резервирования.*

В статье рассмотрена возможность моделирования процесса изменения несущей способности опоры контактной сети. Применен вероятностно-статистический подход для прогнозирования технического состояния опор контактной сети с учетом постепенных и внезапных переходов в состояние отказа. Определена функция надежности на основе данных, полученных в результате наблюдений за изменением значений несущей способности.

Ключевые слова*: опора, контактная сеть, жизненный цикл, срок службы, железнодорожный транспорт.*

Aleksandr V. Okunev, Aleksandr G. Galkin, Aleksej A. Kovalev
Ural State University of Communications (USURT), Yekaterinburg, The Russian Federation

DETERMINATION OF THE LIMIT STATES OF THE SUPPORT OF A CONTACT NETWORK ON THE BASIS OF MATHEMATICAL MODELING OF CHANGES IN THEIR CARRYING CAPABILITY

Abstract. *The need to apply various methods for predicting the technical condition of reinforced concrete supports of the contact network is currently a necessary condition for ensuring the safety of train traffic. Such a need arose due to the presence in operation of supports with extended service life, in the absence of a reduction in loads, without the presence of various kinds of redundancy.*

The article describes a method for predicting the technical state of the supports of the contact network. Solving the problem of exploitation, which consists in the fact that it is rather difficult to reveal the system of failures of the considered object of exploitation, under the influence of many factors. The probability of finding the contact network supports in a certain state is expressed through the statistical properties of the contact network supports, based on the change in the carrying capacity

Key words: *support, contact network, life cycle, service life, railway transport.*

Проблемой эксплуатации опор контактной сети с повышенными сроками эксплуатации являются последствия массовой электрификации. К тому же, сложность проведения диагностических испытаний центрифугированных железобетонных опор приводит к ошибкам первого и второго рода в постановке диагноза при описании их технического состояния. Таким образом, в результате диагностики возможна постановка исправного состояния, тогда как в реальности техническое состояние опоры имеет предельные значения предотказного состояния. Достаточно сложным является процесс выявления системы отказов опор контактной сети.

Отсутствие резервирования опор контактной сети усложняет обеспечение безопасности движения подвижного состава. Более того, факторы, влияющие на снижение технического состояния опор, такие как изменение атмосферных условий, техногенные воздействия и температурное влияние, носят случайный характер. Это приводит к увеличению погрешности измерений параметров, позволяющих определить техническое состояние опор. Поэтому необходимо более подробно рассматривать деструктивные процессы, ведущие к разрушению бетона.

При прогнозировании технического состояния железобетонной опоры контактной сети сложно выбрать параметры, которые будут в полной мере описывать процессы разрушения опор, например, такой параметр, как сопротивление опоры контактной сети, который, позволяя определить величину токов утечки и скорость протекания электрической коррозии металлической арматуры, не дает возможности спрогнозировать техническое состояние железобетонной опоры через несколько лет. Причина заключается в том, что в реальности схема протекания токов утечки усложняется из-за насыщения бетона влагой [1].

Широкий выбор приборов диагностики железобетонных опор контактной сети показывает наличие множества параметров, контролируя которые, можно отслеживать техническое состояние опор. Важной задачей является выбор такого параметра, который в меньшей мере зависит от внешних факторов, воздействующих на опору и в большей степени описывает ее техническое состояние. Рассматривая несущую способность опоры контактной сети, которая определяется как способность воспринимать приложенные к ней нагрузки, можно установить, что в процессе эксплуатации этот параметр не увеличивается. Таким образом, можно принять допущение о том, что в процессе изменения несущей способности у опор контактной сети в течение срока эксплуатации происходит постепенный отказ, как у невосстанавливаемого объекта.

На основании прил. 3 из Указаний… [5] воспользуемся таблицей определения несущей способности по показаниям прибора УК-1401 (таблица 1).

Таблица 1 – Несущая способность стоек в зависимости от показателя П2

Характеризуемая величина	Показатель П2							
	1,1	1,15	1,2	1,25	1,3	1,35	1,4	1,45
Кратность по отношению к нормативному моменту стоек	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1	0,9
Соотношение несущей способности по состояниям	0	1	2	3	4	5	6	7

Принимаем установленные границы интервалов показателя П2 как границы измеренной несущей способности (см. таблицу 1), по которым можно количественно представить распределение опор контактной сети на выбранном участке в первом и втором полугодиях.

Проведены испытания железобетонных опор контактной сети на участке Свердловской железной дороги на интервале времени три года с интенсивностью один раз в полгода. На основании полученных результатов построены гистограммы распределения несущей способности железобетонных опор контактной сети (рисунок 1) [2 – 4].

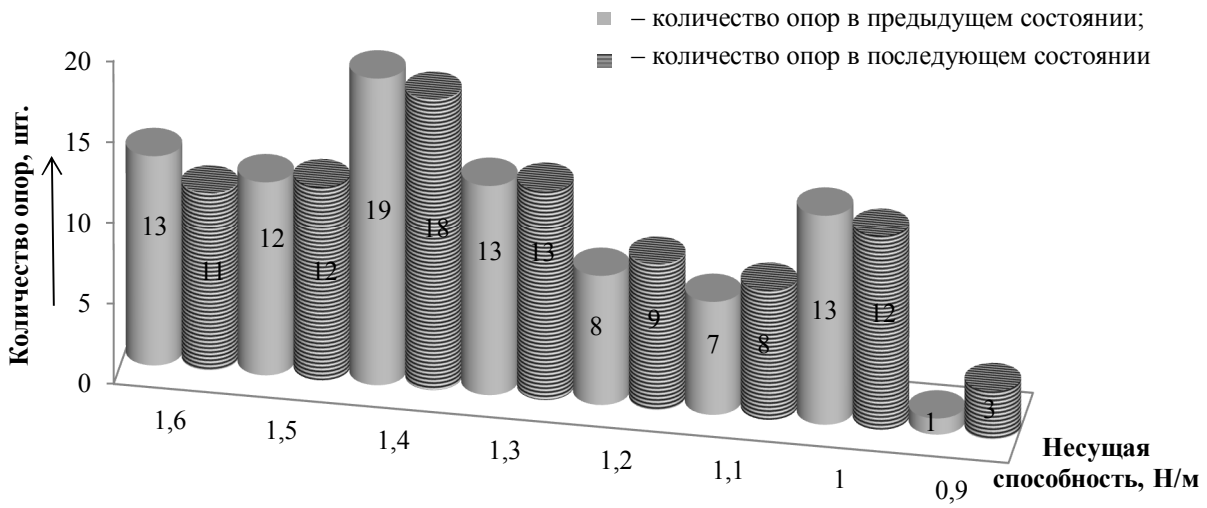


Рисунок 1 – Гистограмма распределения полученных измерений по границам несущей способности за первое и второе полугодия

Из полученной гистограммы видно, что несущая способность исследуемых опор на рассматриваемом участке в целом во втором полугодии уменьшилась в сравнении с первым полугодием, соответственно число попаданий в интервалы перераспределилось (см. рисунок 1).

На основании допущения о том, что отношение несущей способности к нормативному моменту равно «1» и является предельным исправным состоянием железобетонной опоры контактной сети (см. таблицу 1), значения менее приведенной величины являются характеристикой поглощающего состояния опоры контактной сети, условно будем считать это состоянием отказа. Соответственно значения, равные 1,6 или более, характеризуют исправное состояние, все остальные значения, находящиеся на интервале между 1,6 и 1,0, принимаются как предотказные состояния [6 – 9].

Тогда граф состояний и переходов для железобетонной опоры контактной сети будет иметь вид, представленный на рисунке 2.

Испытания, проводимые на интервале наблюдений, позволили определить значения $\varepsilon_0 – \varepsilon_6$ – постепенный отказ – и отражают поэтапное снижение несущей способности перехо-

дом из исправного состояния в каждое последующее состояние предотказа до состояния отказа, а также значения $\lambda_0 - \lambda_6$, – резкий переход из исправного и предотказных состояний в состояние отказа.

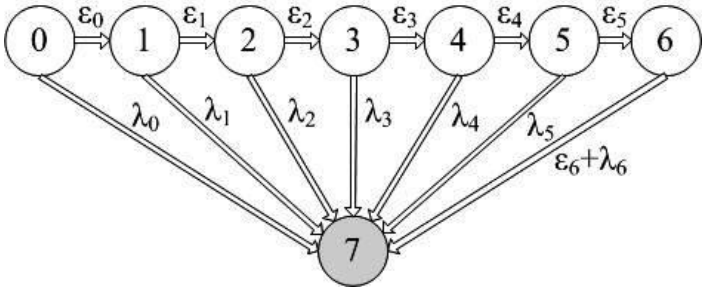


Рисунок 2 – Граф состояний и переходов для железобетонной опоры контактной сети

Составим систему уравнений Колмогорова для определения вероятности нахождения опоры в каждом из состояний:

$$\begin{cases} \frac{dP_0(t)}{dt} = -(\varepsilon_0 + \lambda_0) P_0(t); \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = \varepsilon_0 P_0(t) - (\varepsilon_1 + \lambda_1) P_1(t); \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \varepsilon_1 P_1(t) - (\varepsilon_2 + \lambda_2) P_2(t); \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \varepsilon_2 P_2(t) - (\varepsilon_3 + \lambda_3) P_3(t); \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = \varepsilon_3 P_3(t) - (\varepsilon_4 + \lambda_4) P_4(t); \\ \frac{dP_5(t)}{dt} = \varepsilon_4 P_4(t) - (\varepsilon_5 + \lambda_5) P_5(t); \\ \frac{dP_6(t)}{dt} = \varepsilon_5 P_5(t) - (\varepsilon_6 + \lambda_6) P_6(t); \\ \frac{dP_7(t)}{dt} = \lambda_0 P_0(t) + \lambda_1 P_1(t) + \lambda_2 P_2(t) + \lambda_3 P_3(t) + \lambda_4 P_4(t) + \lambda_5 P_5(t) + (\varepsilon_6 + \lambda_6) P_6(t). \end{cases} \quad (1)$$

Сумма значений вероятностей нахождения опор в каждом состоянии, с учетом состояния отказа всегда равна единице:

$$\sum P_n(t) = 1. \quad (2)$$

Решением системы уравнений будут полученные вероятности $P_n(t)$ нахождения опор контактной сети в каждом из рассматриваемых состояний.

Тогда, в общем виде вероятность нахождения опоры контактной сети в каждом из состояний имеет вид:

$$P_n(t) = \frac{\varepsilon_0 \cdot \ldots \cdot \varepsilon_{n-1}}{(K_1 - K_0) \cdot \ldots \cdot (K_{n-1} - K_0)} \cdot e^{(-K_0 t)} + \frac{\varepsilon_0 \cdot \ldots \cdot \varepsilon_{n-1}}{(K_0 - K_n) \cdot \ldots \cdot (K_{n-1} - K_n)} \cdot e^{(-K_n t)}, \quad (3)$$

где коэффициенты K_i определяются по формуле:

$$K_i = \varepsilon_i + \lambda_i, \quad (4)$$

здесь $i = 1, 2, 3 \ldots n$ – состояния железобетонной опоры.

На основе значений постепенных и внезапных интенсивностей отказов для каждого состояния (полученных за три года) можно рассчитать вероятности нахождения опор контактной сети во всех состояниях.

Исходя из того, что функция надежности определяет вероятность застать объект в заданный момент времени t в любом из работоспособных состояний, для железобетонных опор контактной сети на основе построенной модели состояний и переходов, исключая значения вероятности нахождения опоры в состоянии отказа $P_7(t)$, расчет функции надежности принимает следующий вид:

$$F(t)=P_0(t)+P_1(t)+P_2(t)+P_3(t)+P_4(t)+P_5(t)+P_6(t). \quad (5)$$

Значения функции надежности (5), исключая момент времени $t = 0$, будут отражать вероятность перехода в последующее состояние с течением времени. Состояние $P_7(t)$ отражает снижение определяемой функции надежности, а значит, характеризует вероятность отказа:

$$Q(t)=P_7(t). \quad (6)$$

Задаваясь разными значениями моментов времени, получим изменение функции надежности железобетонной опоры контактной сети, которая зависит от нахождения опоры в любом из предотказных состояний (рисунок 3):

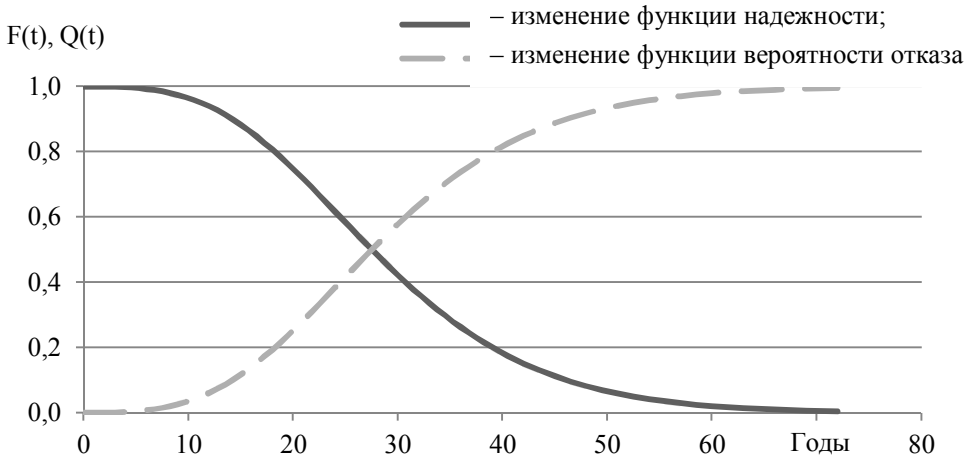


Рисунок 3 – Изменение функции надежности железобетонной опоры контактной сети с течением времени

Из рисунка 3 видно, что несущая способность новых опор на рассматриваемом участке (пи сохранении условий эксплуатации) достигнет предельных значений в течение 72 лет, при этом вероятность отказа опор значительно увеличивается.

Для проверки достоверности математической модели (3) применен механизм построения матриц переходных вероятностей, где значения несущих способностей, полученные в первом полугодии, характеризуют предыдущее состояние и во втором полугодии – последующее состояние.

Переходная вероятность – условная вероятность такого события, при котором система перейдет из предшествующего состояния (b) в последующее состояние (c). Вероятность перехода из состояния (b) в состояние (c) определяется по формуле (7) [10]:

$$p_{bc}(\tau)=\frac{n_{bc}(\tau)}{n_b(\tau-1)}, \quad (7)$$

где $n_{bc}(\tau)$ – число опор контактной сети, которое находится в состоянии (b) в момент ($\tau - 1$) и в состоянии (c) в моменты τ; $n_b(\tau - 1)$ – число опор контактной сети, наблюдаемых в состоянии (b) в момент ($\tau - 1$).

Составим матрицы переходных вероятностей для наглядного перехода несущей способности опор контактной сети в первом и втором полугодиях в виде количественного распределения (таблица 2), после чего составим матрицу переходной вероятности изменения несущей способности в виде десятичных дробей (таблица 3).

Таблица 2 – Матрица количественного перераспределения опор контактной сети в первом и втором полугодиях

Предыдущее состояние	Последующее состояние по номерам интервала							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1	0,9
1,6	11	2	0	0	0	0	0	0
1,5	0	10	2	0	0	0	0	0
1,4	0	0	16	3	0	0	0	0
1,3	0	0	0	10	3	0	0	0
1,2	0	0	0	0	6	2	0	0
1,1	0	0	0	0	0	6	1	0
1	0	0	0	0	0	0	11	2
0,9	0	0	0	0	0	0	0	1

Таблица 3 – Матрица переходных вероятностей несущей способности опор контактной сети из первого полугодия во второе

Предыдущее состояние	Последующее состояние							
	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1	0,9
1,6	0,85	0,15	0	0	0	0	0	0
1,5	0	0,83	0,17	0	0	0	0	0
1,4	0	0	0,84	0,16	0	0	0	0
1,3	0	0	0	0,77	0,23	0	0	0
1,2	0	0	0	0	0,75	0,25	0	0
1,1	0	0	0	0	0	0,86	0,14	0
1	0	0	0	0	0	0	0,85	0,15
0,9	0	0	0	0	0	0	0	1,00

В таблице 3 значения переходных вероятностей округлены до сотых таким образом, чтобы их сумма в строке равнялась единице.

Анализируя полученную матрицу переходных вероятностей, можно сделать вывод о том, что несущая способность опоры не переходит в предыдущее состояние.

На основании сказанного выше можно представить изменение несущей способности железобетонной опоры контактной сети (рисунок 4).

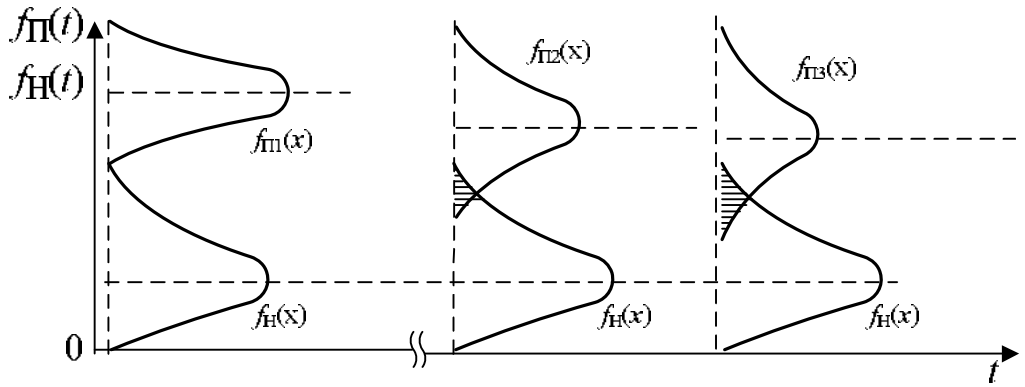


Рисунок 4 – Модель отказа опоры контактной сети при постоянной нагрузке

На рисунке 4 визуально изображен процесс снижения прочности при постоянной нагрузке в момент времени, когда величина прочности больше нагрузки – графики не пересекаются. С течением времени прочностные характеристики снижаются и функции прочности начинают пересекать функцию нагрузки, этот момент характеризует отказ опоры контактной сети. Таким образом, происходит снижение реакции опоры действию основных нагрузок в течение жизненного цикла. Накопление различной степени повреждений, увеличение микротрещин в бетоне приводят к тому, что область под пересеченными кривыми увеличивается.

Применяя разработанную математическую модель, на основе изменения значений интенсивности постепенного и внезапного отказов можно определить предельные значения несущей способности опор контактной сети. Применяя рассмотренный механизм моделирования предельного состояния несущей способности железобетонных опор контактной сети, можно сформировать мероприятия по предупреждению отказов.

Список литературы

1. Окунев, А. В. Комплексный подход к диагностике опор контактной сети [Текст] / А. В. Окунев // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2018. – № 4 (59). – С. 91– 96.

2. Скоробогатов, С. М. Катастрофы и живучесть железобетонных сооружений: Монография [Текст] / С. М. Скоробогатов / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2009. – 511 с.

3. Классификация катастроф железобетонных конструкций [Текст] / С. М. Скоробогатов, В. А. Хомяков и др. // Вестник УрГУПСа / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2010. – № 4 (8). – С. 63 – 71.

4. Скоробогатов, С. М. Существует несколько видов материалов для строительных и каменных швов [Текст]/ С. М. Скоробогатов // Международный журнал разрушения. – 2014. – № 1. – С. 335 – 343.

5. Указания по техническому обслуживанию и ремонту опорных конструкций контактной сети «К-146» [Текст]: Утверждены департаментом электрификации и электроснабжения 19.12.2008. М., 2008.

6. Галкин, А. Г. Влияние угла наклона опоры на высоту подвеса контактного провода относительно уровня головки рельса для скоростных и высокоскоростных контактных подвесок [Текст] / А. Г. Галкин, А. А. Ковалев, А. В. Микава // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 4 (36). – С. 69 – 75.

7. Version control system of CAD documents and PLC projects [Electronic resource] / A. A. Kovalev, P. Yu. Kudryashov and others // Access mode: https://www.researchgate.net/publication/325288940_Version_control_system_of_CAD_documents_and_PLC_projects (Accessed date: 09.07.2019).

8. Integrated approach to the planning of energy consumption by non-traction railway consumers [Electronic resource] / A. G. Galkin, A. A. Kovalev and others // Access mode: https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/pdf/2018/98/matecconf_ts2018_01056.pdf (Accessed date: 09.07.2019).

9. Галкин, А. Г. Теория и методы расчета стоимостных показателей системы токосъема на протяжении жизненного цикла: Монография [Текст] / А. Г. Галкин, А. А. Ковалев / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург, 2015. – 115 с.

10. Ковалев, А. А. Формирование управляющих воздействий на контактной сети с учетом процесса разрегулировок опор: дис… канд. техн. наук: 05.22.07 / Ковалев Алексей Анатольевич. – Екатеринбург, 2008. – 234 с.

References

1. Okunev A. V. An integrated approach to the diagnosis of contact network supports [Kompleksnyi podhod k diagnostike opor kontaktnoy seti]. *Transport Urala – Transport Of The Urals*, 2018, no. 4 (59), pp. 91 – 96.

2. Skorobogatov S. M. Katastrofi i zhivuchest’ zhelezobetonnyh sooruzheniy (Catastrophes and survivability of reinforced concrete structures). *Ekaterinburg:USURT*, 2009, 511 p.

3. Skorobogatov S. M., Khomyakov V. A., Mordanov O. N., Mordanov E. S. Classification of catastrophes of reinforced concrete structures [Klasifikaciya katastrof zhelezobetonnyh konstrukciy]. *Vestnik UrGUPS – Vestnik USURT*, 2010, no. 4 (8), pp. 63 – 71.

4. Skorobogatov S. M. There are several types of materials for construction and stone seams [Syshesvuet neskolko vidov materialov dlya stroitelnyh I kamennh shvov]. *Mezhdunarodniy zhurnal razrusheniya – International Journal of Destruction*, 2014, no. 1, pp. 335 – 343.

5. *Ukazaniya po tehnicheskomu obsluzhivaniy i remontu opornih konstrukciy kontaktnoy seti "K-146"* (Instructions for the maintenance and repair of the supporting structures of the contact network "K-146"): approved. Department of Electrification and Power Supply 19.12.2008, Moscow, 2008.

6. Galkin A. G., Kovalev A. A., Mikawa A. V. The influence of the angle of inclination of the support to the height of the suspension of the contact wire relative to the level of the head for high-speed and high-speed contact hangers [Vliyanie ugla naklona opori na visotu podvesa kontaktnogo provoda otnositelno urovnia golovki relsa dlya skorostnyh I vysokoskorostnyh kontaktnyh podvesok] // *Izvestia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2018, no. 4 (36), pp. 69 – 75.

7. Version control system of CAD documents and PLC projects [Electronic resource] / A. A. Kovalev, P. Yu. Kudryashov and others // Access mode: https://www.researchgate.net/publication/325288940_Version_control_system_of_CAD_documents_and_PLC_projects (Accessed date: 09.07.2019).

8. Integrated approach to the planning of energy consumption by non-traction railway consumers [Electronic resource] / A. G. Galkin, A. A. Kovalev and others // Access mode: https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/pdf/2018/98/matecconf_ts2018_01056.pdf (Accessed date: 09.07.2019).

9. Galkin A. G., Kovalev A. A. Teoriya i metody rascheta stoimostnyh pokazatelei sistemy tokos'ema na protyazhenii zhisnennogo cikla (Theory and Methods for Calculating the Cost Indicators of a Current-Survey System Throughout the Life Cycle). *Ekaterinburg:USURT*, 2015, 115 p.

10. Kovalev A. A. *Formirovanie upravlyaushyh vozdeistviy na kontaktnoy seti s uchetom processa razregulirovok opor* (Formation of control actions on the contact network taking into account the process of deregulation of supports). dis. ... cand. tech. science, Yekaterinburg, USURT, 2008, 234 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Окунев Александр Владимирович
Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).
Колмогорова ул., д. 66., г. Екатеринбург, 620034, Российская Федерация.
Доцент кафедры «Электроснабжение транспорта», УрГУПС.
Тел.: +7 (343) 221-24-78.
E-mail: AVOkunev@usurt.ru

Галкин Александр Геннадьевич
Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).
Колмогорова ул., д. 66., г. Екатеринбург, 620034, Российская Федерация.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение транспорта», УрГУПС.

Ковалев Алексей Анатольевич
Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Okunev Alexandr Vladimirovich
Ural State University of Railway Transport (USURT).
Kolmogorov st., 66, Yekaterinburg, 620034, the Russian Federation.
Associate Professor of the Department of Electricity Transport, USURT.
Phone: +7 (343) 221-24-78.
E-mail: AVOkunev@usurt.ru

Galkin Aleksandr Gennad'yevich
Ural State University of Railway Transport (USURT).
Kolmogorov st., 66, Yekaterinburg, 620034, the Russian Federation.
Advanced Doctor of Engineering Sciences, Professor of the department of Electricity Transport, USURT.

Kovalev Alexey Anatolyevich
Ural State University of Railway Transport (USURT).
Kolmogorov st., 66, Yekaterinburg, 620034,

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта», УрГУПС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Окунев, А. В. Определение предельных состояний опор контактной сети на основе математического моделирования изменения их несущей способности [Текст] / А. В. Окунев, А. Г. Галкин, А. А. Ковалев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 2 (38). – С. 82 – 90.

the Russian Federation.

Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Electricity Transport, USURT.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Okunev A. V., Galkin A. G., Kovalev A. A., Determination of the limit states of the support of a contact network on the basis of mathematical modeling of changes in their carrying capability. Journal of Transsib Railway Studies, 2019, vol. 2, no. 38, pp. 82 – 90 (In Russian).

УДК 629.4.027.4: 656.2

А. С. Космодамианский[1], В. И. Воробьев[2], О. В. Измеров[2], М. Ю. Капустин[1], Д. Н. Шевченко[1]

[1] Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), г. Москва, Российская Федерация;
[2] Брянский государственный технический университет (БГТУ), г. Брянск, Российская Федерация

МЕТОДЫ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ПРИВОДА В ПРОЦЕССЕ ВЫБОРА ВАРИАНТОВ КОНСТРУКЦИИ

Аннотация. *Установлена необходимость поиска новых методов по улучшению динамических рационализированных свойств тягового привода, не создающих противоречий между выводами, основанными на результатах численного параметрического анализа и на результатах анализа непараметрических факторов. Предложен модифицированный метод базовой точки, учитывающий возможное наличие областей консервативности рационального параметра и предусматривающий процедуру проверки на консервативность. Результаты поиска с помощью данного метода рационального варианта тягового привода с опорно-рамным подвешиванием электродвигателя и зубчатым редуктором совпадают с эмпирическим выбором разных производителей локомотивов.*

Ключевые слова: *тяговый привод локомотива, анализ непараметрических факторов, динамика, математическое моделирование.*

Andrew S. Kosmodamianskii[1], Vladimir I. Vorobyov[2], Oleg V. Izmerov[2], Michael Y. Kapustin[1], Dmitry N. Shevchenko[1]

[1]Russian University of transport (RUT (MIIT)), Moscow, the Russian Federation,
[2]Bryansk state technical University(BSTU), Bryansk, the Russian Federation,

OPTIMIZATION METHOD FOR DYNAMIC SYSTEM OF LOCOMOTIVE TRACTION DRIVE, BASED ON THE BASE POINT METHOD

Abstract. *The necessity of searching for new methods to improve the dynamic rationalized properties of the traction drive, which does not create contradictions between the conclusions based on the results of numerical parametric analysis and the results of the analysis of nonparametric factors, is established. A modified base point method is proposed that takes into account the possible presence of areas of conservatism of a rational parameter and provides for a procedure for checking for conservatism. The search results using this method for a rational version of a traction drive with a support-frame suspension of an electric motor and a gear reducer coincide with the empirical choice of different manufacturers of locomotives.*

Keywords: *locomotive traction drive, analysis nonparametric factors, dynamics, computer modeling.*

В современном проектировании сложных машин значительное место уделено моделированию будущей конструкции и рационализации их характеристик. Если задача полностью

формализована, а условия задачи не содержат элементов нечеткого выбора (например, определение формы детали, рациональной с точки зрения прочности при известных нагрузках), полученная конструкция обычно отражает результаты моделирования. Однако, когда речь идет о выборе конструктивного решения, результаты выбора могут значительно расходиться с выводами, производимыми при анализе математической модели. Так, для грузовых локомотивов еще в 70-х гг. была обоснована необходимость снижения динамических нагрузок в тяговом приводе и воздействия колесно-моторного блока на путь для достижения рациональных динамических свойств либо введением упругого звена, либо креплением тягового электродвигателя (ТЭД) на раме и соединением его с колесной парой компенсирующим механизмом [1, 2]. Тем не менее на современных грузовых электровозах «Сименс» применяются интегрированные тяговые приводы с опорно-осевым подвешиванием ТЭД и жесткой зубчатой передачей. Таким образом, возникает необходимость поиска новых методов поиска рациональных решений, не создающих противоречий между выводами, основанными на результатах численного параметрического анализа и на результатах анализа непараметрических факторов.

В работах [1 – 4] и других, посвященных совершенствованию динамических свойств тягового привода, методологическая основа строится в рамках учения об универсальных формах количественного исследования, т. е. как попытка рассматривать проблемы в самых общих предположениях при фактическом отказе от априорных ограничений в общей постановке задачи. В фундаментальной науке такой подход оправдан, однако для прикладной задачи анализа динамики тягового привода как информационного обеспечения выбора рациональной конструктивной схемы необходимо учесть специфику поставленной задачи.

Во-первых, при решении задачи совершенствования тягового привода используются две качественно разные группы параметров. Одна группа – это физико-технические параметры, определяемые неизменными строго определенными законами (модуль упругости, удельная масса, ускорение свободного падения и т.п.), вторая группа – эмпирические, приближенные параметры (динамическое возмущение от пути, коэффициент трения в системе «колесо – рельс», свойства некоторых материалов, имеющие значительный технологический разброс и (или) существенно меняющиеся в течение периода эксплуатации, и т. п.), которые описываются через аппроксимацию зависимостей, полученных опытным путем.

Во-вторых, можно привести ряд примеров, когда рационализируемые свойства часто проявляют консервативность, т. е., мало изменяются при значительном изменении параметров динамической системы тягового привода:

значительное снижение жесткости пружин траверсного подвешивания ТЭД тепловозов ТЭ3 и ТЭ7 и установка резинометаллических блоков не привели к снижению динамического момента на валу ТЭД [5];

снижение крутильной жесткости карданных валов тепловоза ТГМ3 более чем вчетверо не изменило при автоколебаниях во время боксования отношения величины динамического крутящего момента к его среднему значению [6];

изменение крутильной жесткости муфт тягового привода электровоза ВЛ84 (частоты собственных крутильных колебаний привода по основной форме изменилась в 1,48 раза), изменило динамический момент в приводе на несколько процентов (в пределах погрешности опыта) [7];

изменение крутильной жесткости валопроводов электровоза ЧС200, которое привело к изменению собственной частоты привода в 1,32 раза, не вызвало существенных изменений предельных динамических моментов [8], так же и в тяговом приводе тепловоза 2ТЭ121 [3];

при испытаниях привода без передаточного механизма [15] изменение крутильной жесткости привода при тяге и на выбеге из-за нелинейности характеристики упругих элементов не вызвало значимого изменения предельных динамических моментов.

Из этого следует, что консервативность динамических свойств тягового привода можно считать распространенным явлением, а смысл в поиске оптимума в области мало меняющихся свойств утрачивается.

В-третьих, анализ и рационализация динамической системы технического объекта фактически проводятся для интервала, определенного технико-технологическими ограничениями и практическими задачами проектирования, результаты поиска вне этого интервала не имеют практического применения. Так, в тяговом приводе электропоезда ЭР1 упругое зубчатое колесо позволило снизить максимальный динамический момент по сравнению с вариантом с упругими элементами в подвеске редуктора в 1,5 – 2 раза, но из-за простоты внедрения был выбран вариант с упругой подвеской [11].

Таким образом, в качестве цели решения задачи улучшения динамических свойств тягового привода имеет смысл принимать не достижение минимального или максимального значения величины, принятой в качестве комплексной оценки динамических свойств, а получение оценок динамических свойств (которые не всегда могут быть представлены в виде одного комплекса), указывающих на возможность практической реализации тягового привода при заданной совокупности технических требований. Отсюда следует, что при анализе некоего исходного варианта тягового привода возможны три ситуации.

Первая. Параметры динамической системы тягового привода находятся в области стабильно наилучших значений, обеспечивающих возможность реализации привода, и существенные их изменения не ведут к ощутимому улучшению параметра [3, 8].

Вторая. Параметры динамической системы тягового привода находятся в области стабильно не наилучших значений, т. е. не позволяющих практически реализовать привод или делающих создание новой конструкции бессмысленной. Например, для опорно-центрового привода с упругими элементами жесткостью 24 кН/мм величина динамического момента при испытаниях достигала 7,2 кНм, как у привода без упругих элементов [4, 12].

Третья. Параметры динамической системы тягового привода находятся в переходной области, где изменения параметров быстро приводят к переходу либо в область стабильно наилучших, либо стабильно не наилучших значений.

Таким образом, поиски методологической основы рациональной динамической системы тягового привода следует вести среди теоретических направлений, исходящих из консервативности рациональных параметров, наличия погрешностей определения части параметров и допускающих отсутствие непрерывности процесса поиска. К методам, удовлетворяющим названным требованиям, относится метод базовой точки, описанный Ю. Д. Арсеньевым [14], теоретически опирающимся на обоснование консервативности изменения оптимальных параметров объекта на основе принципа Ле Шателье [14, с. 21 – 26]. Спецификой данного метода является положение, что «произвольный расчет всего объекта, выполненный с учетом его технических особенностей и названный базовым расчетом (базовой точкой), находится в близком диапазоне от искомой оптимальной точки» [14, с. 15], а известной сферой применения метода являются технико-экономические расчеты крупных энергетических объектов. Нетрудно видеть, что «произвольный расчет всего объекта, выполненный с учетом его технических особенностей» при проектировании тягового привода изначально имеется в виде первоначального проекта тягового привода. Однако метод Арсеньева в изложенном автором виде не может быть применен к задаче совершенствования динамической системы тягового привода по следующим причинам.

Во-первых, для динамических свойств тягового привода в настоящее время нет строгого доказательства консервативности изменения рациональных свойств для общего случая. Нельзя априори утверждать, что рациональные свойства будут консервативны.

Во-вторых, этому препятствует сложность физических связей между параметрами конструкции и рациональным свойством, например, упруго диссипативными свойствами динамической системы привода и максимальной величиной динамической составляющей кру-

тящего момента. Как отмечено автором метода, «при разработке оптимизационной модели все математические трудности находятся в сфере… физико-технических связей».

В-третьих, в технико-экономических расчетах больших систем величины выражаются в виде параметрических зависимостей, что позволяет решать задачи аналитическими и графо-аналитическими способами. При совершенствовании тягового привода ряд величин связан с различными вариантами конструктивных решений, описываемых непараметрически.

Для устранения указанных недостатков авторами предложен метод, который представляет собой алгоритм действий (рисунок 1) из четырех основных процедур, одна из которых – процедура проверки консервативности изменения свойств.

Первая процедура – теоретические исследования, целью которых является прогноз области, в пределах которой могут меняться параметры тягового привода. На основе анализа физических связей и сведений о значимых динамических процессах производится поиск доказательства консервативности рационализируемого параметра в области рациональных значений и делается прогноз границы области консервативности (зоны автомодельности).

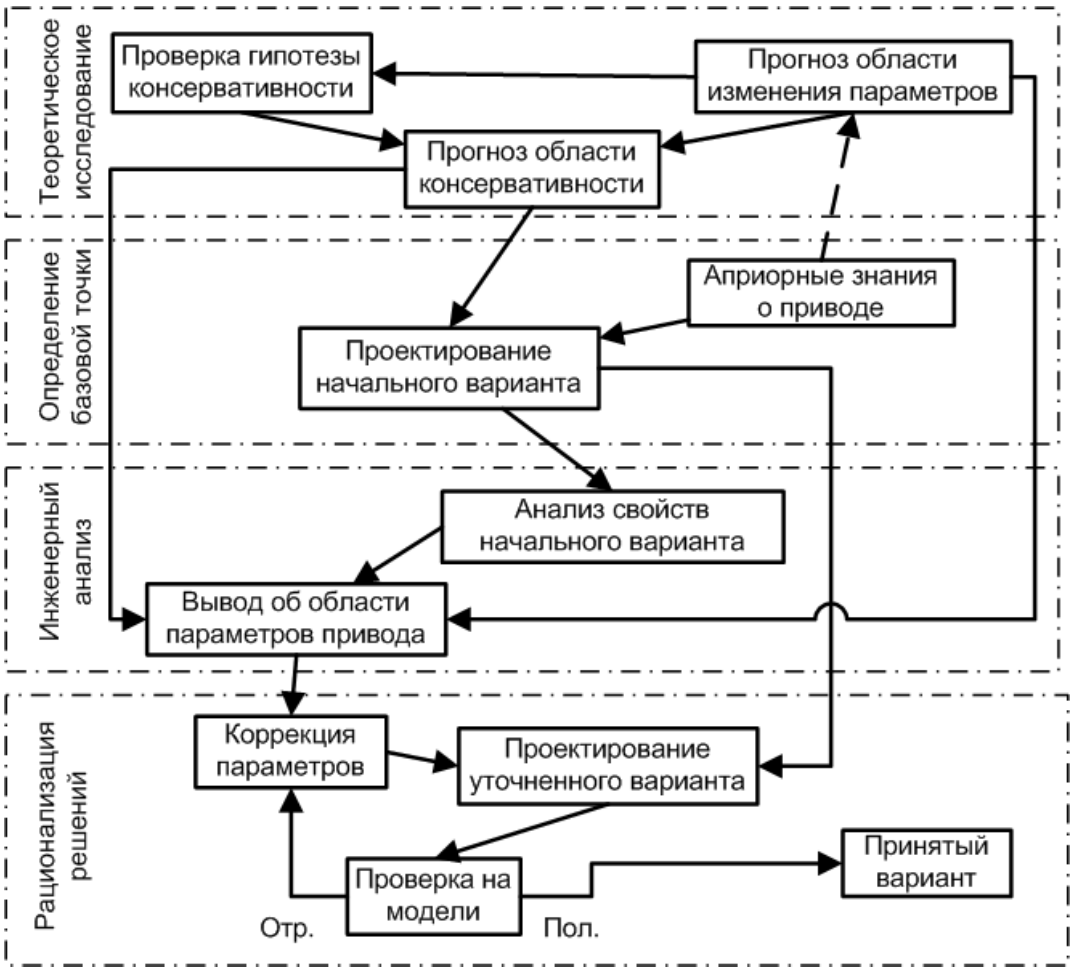


Рисунок 1 – Предлагаемый алгоритм модифицированного метода базовой точки

Вторая процедура – создание базовой точки. Это создание проекта начального варианта тягового привода исходя из технико-технологических требований к узлам и деталям.

Третья процедура представляет собой исследование свойств модели спроектированного варианта привода целочисленными методами на основе интегрирующей среды систем проектирования, моделирования и анализа. Результаты используются для вывода о том, к какой из областей относятся параметры тягового привода (стабильно рациональной, стабильно нерациональной или переходной).

Четвертая процедура – рационализация проектных решений. Проект уточняется для достижения области стабильно рациональных значений с последующей проверкой на модели.

Не заменяя собой универсального количественного исследования в общем случае, данный метод при разработке рельсовых экипажей имеет следующие преимущества:

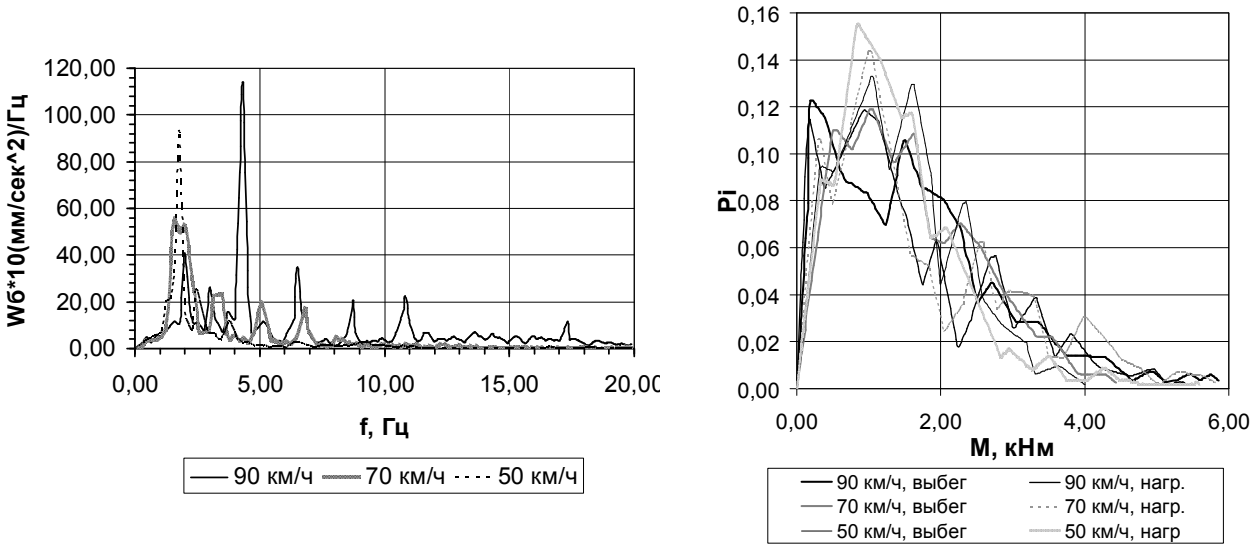
прямая связь между теоретическим анализом и вопросами практической реализации технического устройства позволяет не рассматривать не имеющие практического смысла результаты и кратчайшим путем применять результаты анализа при конструировании устройства;

отказ от процедур поиска внутри областей стабильно рациональных и стабильно нерациональных значений сокращает время анализа.

Главная проблема при использовании предложенного метода – поиск доказательства консервативности рационализируемого параметра и предварительный прогноз границ стабильно рациональной области, поскольку универсальных процедур такого поиска пока не разработано. В связи с этим рассмотрим частный случай решения данной задачи на примере тягового привода с опорно-рамным подвешиванием ТЭД и зубчатым редуктором.

Целью задачи является поиск рационального значения крутильной жесткости валопроводов опорно-рамного тягового привода для грузового электровоза с двухступенчатым рессорным подвешиванием, обеспечивающей наименьшую величину максимума крутящего момента в валопроводах при прохождении неровностей пути.

Решения задачи начнем с анализа вида неровностей, определяющих величину максимального крутящего момента, используя результаты исследований тягового привода тепловоза 2ТЭ121, не вошедшие в [3]. Согласно работам [1 – 4, 8 – 10] и иным источникам причиной возникновения динамического момента в тяговом приводе для рассматриваемого случая является поворот ведущей шестерни тягового редуктора при перемещении буксы относительно рамы тележки. На рисунке 2, а приведены оценки спектра вертикальной виброскорости буксы относительно рамы тележки в диапазоне 0 – 20 Гц.



а б

Рисунок 2 – Спектральные плотности вертикальной виброскорости буксы относительно рамы тележки (а) и гистограмма распределения амплитуд крутящего момента на входном валу осевого редуктора тягового привода при различных режимах движения (б) для тепловоза 2ТЭ121, участок Голутвин – Озеры Московской железной дороги

Из рисунка 2, а видно, что мощность вертикальных колебаний в значительной мере определяется периодической составляющей возмущения – частотой, кратной частоте про-

хождения рельсового звена (для данного участка – 12,5 м), а непериодической случайной составляющей можно пренебречь.

Рисунок 2, б показывает, что при движении локомотива по стыковому пути распределение амплитуд динамического момента на входном валу тягового редуктора не принимает более сглаженного вида с увеличением скорости движения (т. е. при увеличении числа зарегистрированных циклов).

На гистограмме (см. рисунок 2, б) отчетливо видны локальные подъемы, свидетельствующие о наличии квазипериодических составляющих.

На основании установленного факта преобладания периодических составляющих возмущения для математического моделирования момента в приводе в качестве входного возмущения принимаем модель, описывающую типичную стыковую неровность звеньевого пути. В качестве модели такой неровности примем предложенную Н. Н. Кудрявцевым [16] наиболее типичную неровность для рельсов 25 м, описываемую выражением:

$$Z_1 = \left| A_1 \sin(\frac{1}{2}\omega t) + A_2 \sin(\frac{3}{2}\omega t) \right|, \quad (1)$$

где $\omega = (2\pi / L)V$ – частота прохождения стыков пути;

V– скорость движения, м/с;

L – длина рельсового звена, м;

A_1 и A_2 – коэффициенты, зависящие от высоты неровности.

Для проверки гипотезы консервативности высота неровности не имеет значения, поскольку при моделировании будет производиться сравнение относительных величин реализуемого максимального динамического крутящего момента. Поскольку целью моделирования является не выяснение характера зависимости максимального динамического момента от крутильной жесткости валопроводов, а установление факта наличия для этой зависимости зоны консервативности рационализируемого параметра, используем простейшую линеаризованную модель, учитывающую основную форму крутильных колебаний валопроводов тягового привода и основную форма колебаний тележки, при этом тележка представлена в простейшем виде одномассовой системы, близкой по параметрам к реальной (рисунок 3).

Уравнения движения рассматриваемой системы при наличии возмущения со стороны пути описываются следующими дифференциальными уравнениями:

$$M_т \cdot \ddot{Z} + K_т \cdot \dot{Z} + C_т \cdot Z = C_т \cdot Z_1; \quad (2)$$

$$J \cdot \ddot{\phi} + K \cdot \dot{\phi} + C \cdot \phi = C \cdot \frac{A}{B} \cdot \frac{(Z_1 - Z)}{R_ш}. \quad (3)$$

Для решения уравнений (2), (3) были использованы программные средства системы Simulink из пакета Matlab при следующих параметрах привода, близких к параметрам реально существующих конструкций: момент инерции якоря ТЭД J= 63 кг·м^2, масса тележки $M_т$ = 6500 кг, жесткость буксовой ступени подвешивания $C_т$ = 4750 кН/м, отношение A/B = 0,61, радиус шестерни $R_ш$ = 0,11 м, величины К и $K_т$ определены из предполагаемых значений параметра затухания ξ, который для буксового подвешивания тележки принят равным 0,2, а для валопроводов тягового привода принят равным 0,11 [3]. Крутильная жесткость тягового привода менялась в пределах, ограничиваемых возможностями конструкциями: от 400 кНм/рад для варианта, где в качестве упругого элемента используется только торсионный вал, до 100 кНм/рад при использовании в качестве упругих элементов торсионного вала, упругой муфты, упругого венца зубчатого колеса и упругой подвески тягового редуктора. Результаты моделирования приведены на рисунках 4 и 5.

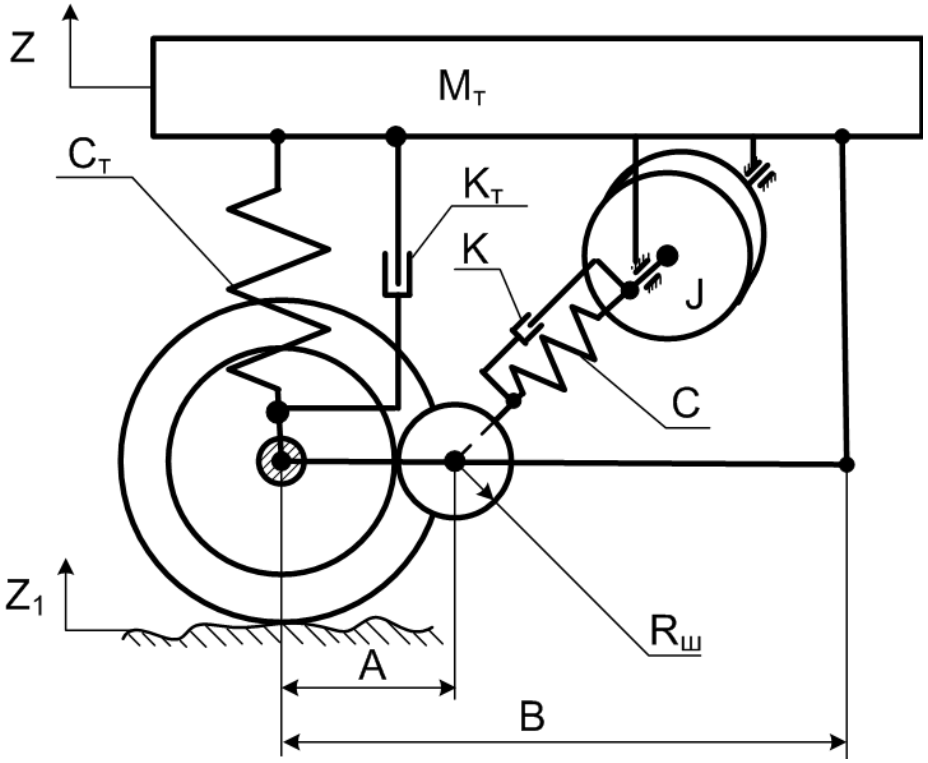


Рисунок 3 – Простейшая кинематическая схема тягового привода и экипажа
для проверки гипотезы консервативности оптимизируемого параметра

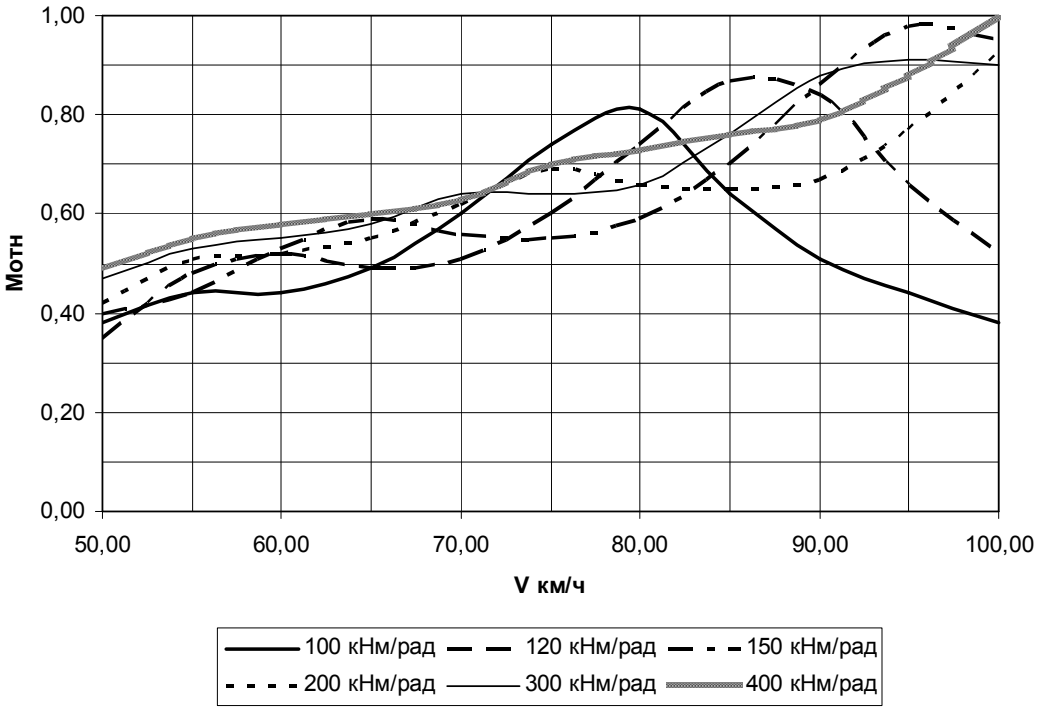


Рисунок 4 – Зависимость относительной величины максимумов динамической составляющей
крутящего момента в передаточном механизме тягового привода
от скорости движения для различных значений жесткости валопроводов

Как следует из рисунка 4, при жесткости валопроводов, близких к нижнему пределу, наблюдается существенное снижение динамической составляющей крутящего момента на скоростях выше резонансной. Это означает, что для данных параметров максимальные величины крутящего момента в приводе обусловлены совпадением одной из гармоник возмущения с частотой собственных колебаний. При жесткостях валопроводов, близких к верхнему пределу, зависимость максимумов динамического момента от скорости приближается к линейной и определяется единичными ударными процессами при прохождении угла перелома в стыке. Со снижением жесткости валопроводов привода доля динамических нагрузок при прохождении отдельного стыка в результирующей величине момента снижается, однако возрастает доля момента, обусловленная накоплением энергией колебаний в системе за счет повторного прохождения стыковых неровностей. При значительном изменении жесткости валопроводов тягового привода (в четыре раза) максимальные величины динамического момента меняются менее чем на 20 % (см. рисунок 5). Это позволяет считать гипотезу о консервативности рационализируемого параметра доказанной для интересующего диапазона величин крутильной жесткости.

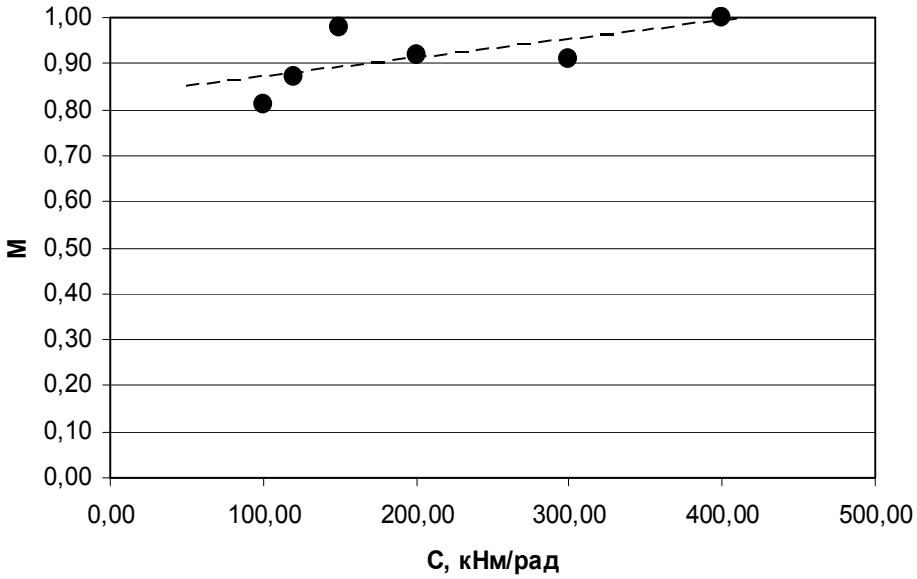


Рисунок 5 – Зависимость относительного экстремального динамического момента от крутильной жесткости валопроводов в рассматриваемом диапазоне жесткостей

Для окончательного вывода и корректировки параметров базового варианта необходимо более детальное математическое моделирование базового варианта привода в более узкой области возможной корректировки параметров либо проведение экспериментальных исследований. При этом можно не рассматривать варианты с упругими элементами в большом зубчатом колесе редуктора и вариант с упругой подвеской, поскольку они заведомо не дают снижения максимальных моментов в валопроводах, но в первом случае усложняется конструкция и растут касательные напряжения в оси колесной пары при боксовании [3], а во втором – податливость подвески ведет к увеличению расцентровки валов двигателя и осевого редуктора, что приводит к снижению долговечности муфт передаточного механизма.

Таким образом, теоретически для рассматриваемого случая область выбора рационального варианта сужается до выбора между вариантом, где податливость обеспечивает только торсионный вал, и вариантом, где дополнительную податливость обеспечивают упругокомпенсирующие муфты. Этот вывод подтверждает эмпирическая практика проектирования и доводки тяговых приводов электровоза с опорно-рамным подвешиванием ТЭД и зубчатым редуктором, где в серийное производство пошли варианты либо с податливостью только за счет торсионного вала (электровозы ЧС1-ЧС8, ДС3), либо с торсионным валом и упругой муфтой (ЭП1, Rc4, AEM7).

На основании изложенного можно сделать выводы.

1. Причинами недостаточной эффективности методов по улучшению динамических рационализированных свойств тягового привода, основанных на универсальных формах количественного исследования для проектирования тягового привода, является значительная доля эмпирических параметров и зависимостей, консервативности рациональных динамических свойств и нецелесообразность поиска решения вне области параметров вариантов, имеющих практический смысл.

2. Применение метода базовой точки, позволяющего сократить время на поиск наилучших вариантов, затруднено из-за отсутствия доказательства консервативности рациональных свойств тягового привода для общего случая и сложности физических связей между параметрами конструкции и рациональным свойством.

3. Предложен модифицированный метод базовой точки, использующий процедуры доказательства консервативности рациональных свойств и целочисленное математическое моделирование.

4. Результаты использования метода для поиска рационального с точки снижения максимального динамического момента варианта тягового привода электровоза с опорно-рамным подвешиванием ТЭД и зубчатым редуктором совпадают с результатами эмпирического выбора наилучшего варианта конструкции разных производителей, что подтверждает корректность метода и возможность практического его применения.

Список литературы

1. Павленко, А. П. Динамика тяговых приводов магистральных локомотивов [Текст] / А. П. Павленко. – М.: Машиностроение, 1991. – 192 с.

2. Бирюков, И. В. Тяговые передачи электроподвижного состава железных дорог [Текст] / И. В. Бирюков, А. И. Беляев, Е. К. Рыбников. – М.: Транспорт, 1986. – 256 с.

3. Динамические нагрузки в тяговом приводе тепловоза 2ТЭ121 [Текст] / А. Т. Литвинов, Е. П. Акишин и др. // Результаты испытаний тепловоза 2ТЭ121: Труды ВНИТИ. – Коломна. – 1985. – Вып. 62. – С. 119 – 130.

4. Повышение надежности экипажной части тепловозов [Текст] / А. И. Беляев, Б. Б. Бунин и др. – М.: Транспорт, 1984. – 248 с.

5. Результаты динамических испытаний тепловозов ТЭ7 и ТЭ3 [Текст] / Отчет ВНИТИ И-25-58. – Коломна, 1958. – 27 с.

6. Результаты испытаний упругих карданных валов привода движущих осей тепловоза ТГМ3 [Текст] / Отчет ВНИТИ И-27-61. – Коломна, 1961. – 21 с.

7. Сергиенко, П. Е. Экспериментальное исследование тягового привода электровоза ВЛ84 [Текст] / П. Е. Сергиенко, В. М. Остапенко // Электровозостроение. – Новочеркасск. – 1982. – Т. 22. – С. 115 – 125.

8. Кочергин, В. В. Высокочастотное нагружение и прочность тяговых приводов [Текст] / В. В. Кочергин, А. В. Кочергин // Динамико-прочностные свойства моторвагонного подвижного состава. – М.: Транспорт, 1984. – С. 43 – 67.

9. Кочергин, В. В. Экспериментальное исследование тяговых приводов локомотивов [Текст] / В. В. Кочергин // Вестник ВНИИЖТа / ВНИИЖТ. – М. – 1977. – № 8. – С. 7 – 10.

10. Добрынин, Л. К. Динамика тяговых приводов электровозов ЧС4 и моторных вагонов электропоездов серии ЭР [Текст] / Л. К. Добрынин, Ю. Н. Соколов, Ю. В. Колесин // Труды ВНИТИ. – Коломна. – 1974. – Вып. 39. – С. 173, 174.

11. Динамико-прочностные испытания электропоезда ЭР1 [Текст] // Труды МИИТа. – М., Трансжелдориздат, 1960. – Вып. 121. – 226 с.

12. Результаты сравнительных динамических испытаний приводов тепловозов при опорно-осевом, опорно-центровом и опорно-рамном подвешивании тяговых электродвигателей [Текст] / Отчет ВНИТИ И-20-75. – Коломна, 1975. – 83 с.

13. Исследование динамики тепловоза 2ТЭ10Л с опорно-осевым подвешиванием электродвигателя ЭД107 в эксплуатационных условиях [Текст] / Отчет ВНИТИ И-103-68. – Коломна, 1968. – 120 с.

14. Арсеньев, Ю. Д. Инженерно-экономические расчеты в обобщенных переменных [Текст] / Ю. Д. Арсеньев. – М.: Высшая школа, 1979. – 215 с.

15. Кондратов, В. А. Экспериментальные исследования динамики опытного опорно-рамного привода на стенде и локомотиве [Текст] / В. А. Кондратов, В. А. Лысак, А. А. Рыбалов // Исследования узлов и агрегатов тепловозов // Труды ВНИТИ. – Коломна, 1980.– Вып. 52. – С. 116 – 133.

16. Кудрявцев, Н. Н. Исследование динамики необрессоренных масс вагонов [Текст] / Н. Н. Кудрявцев // Труды ВНИИЖТа. – М.: Транспорт, 1965. – Вып. 287. – 168 с.

References

1. Pavlenko A. P. Dinamika tyagovyh privodov magistralnyh lokomotivov (Dynamics of main-line locomotives' traction drive). Moscow: Mashinostroenie, 1991. – 192 p.

2. Biryukov I. V. and others. Tyagovye peredachi ehlektropodvizhnogo sostava zheleznyh dorog (Traction drives for electric railway rolling stock). Moscow: Transport, 1986. - 256 p.

3. Litvinov A. P. and others. Dinamicheskie nagruzki v tyagovom privode teplovoza 2teh121 (Dynamic loads in traction drive of 2TE121 diesel locomotive): Rezultaty ispytanij teplovoza 2teh121 (Results of the tests of 2TE121 diesel locomotive). Kolomna: VNITI. 1985. vol. 62. pp. 119 – 130

4. Belyaev A. I. and others. Povyshenie nadezhnosti ehkipazhnoj chaste teplovozov (Increase in reliability of a vehicular part of locomotives). Moscow: Transport, 1984. – 248 p.

5. Rezultaty dinamicheskih ispytanij teplovozov teh7 i teh3 (Results of TE7 and TE3 diesel locomotives dynamic tests) / Otchet VNITI I-25-58. Kolomna, 1958. – 27 p.

6. Rezultaty ispytanij uprugih kardannyh valov privoda dvizhushchih osej teplovoza TGM3 (Results of the tests of flexible cardan shafts for diesel locomotive TGM3 driving axis drive) / Otchet VNITI I-27-61: Kolomna, 1961. – 21 p.

7. Sergienko P. E., Ostapenko V. M. Experimental research of the electric locomotive VL84 traction drive (Ehksperimentalnoe issledovanie tyagovogo privoda ehlektrovoza VL84) // Ehlektrovozostroenie. Novocherkassk, 1982. vol. 22. pp. 115 – 125.

8. Kochergin V. V., Kochergin A. V. High frequency loading and the strength of traction drives (Vysokochastotnoe nagruzhenie i prochnost tyagovyh privodov): Dynamic and strength properties of motor-car rolling stock (Dinamiko prochnostnye svojstva motorvagonnogo podvizhnogo sostava). Moscow, Transport, 1984, pp. 43 – 67.

9. Kochergin V. V. Experimental researches of the locomotive traction drives (Ehksperimentalnoe issledovanie tyagovyh privodov lokomotivov). Vestnik VNIIZhT, 1977. no. 8. pp. 7 – 10.

10. Dobrynin L. K., Sokolov Ju. N., Kolesin Ju. V. Dynamic of the traction drives for electric locomotives ChS4 and ER serie EMU trains motor cars (Dinamika tyagovyh privodov ehlektrovozov ChS4 i motornyh vagonov ehlektropoezdov serii EHR). VNITI. Kolomna, 1974. vol. 39. pp. 173 – 174.

11. Dynamic and strength tests of ER1 EMU train (Dinamiko-prochnostnye ispytaniya ehlektropoezda Ehr1). MIIT. – Moscow: Transzheldorizdat, 1960. vol. 121. – 226 p.

12. Results of comparative dynamic tests of diesel locomotive traction drives with nose suspended, flexible suspended and underframe mounted traction motors (Rezultaty sravnitelnyh dinamicheskih ispytanij privodov teplovozov pri oporno-osevom-oporno-centrovom i oporno-ramnom podveshivanii tyagovyh ehlektrodvigatelej) / VNITI otchet I-20-75. – Kolomna, 1975. – 83 pp.

13. Dynamic research of 2TE10L diesel locomotive with axle hung nose suspended ED107 traction motor in operational conditions (Issledovanie dinamiki teplovoza 2teh10l s oporno-osevym

podveshivaniem ehlek-trodvigatelya EHD107 v ehkspluatacionnyh usloviyah). VNITI otchet I-103-68. – Kolomna. – 1968. – 120 p.

14. Arseniev Ju. D. Technical and economic calculations in generalized variables (Inzhenerno ehkonomicheskie raschety v obobshchennyh peremennyh). Moscow, Vysshaya Shkola, 1979. – 215 p.

15. Kondratov V. A., Lysak V. A., Rybalov A. A. Experimental dynamic researches of traction drive prototype with underframe mounted traction motor, bench and road tests (Ehksperimentalnye issledovaniya dinamiki opytnogo oporno ramnogo privoda na stende i locomotive). The study of locomotive components and assemblies (Issledovaniya uzlov i agregatov teplovozov), VNITI. – Kolomna, 1980. – vol. 52. – pp. 116 – 133.

16. Kudryavcev N. N. Dynamic research of railroad cars unsprung masses (Issledovanie dinamiki neobressorennyh mass vagonov). Trudy VNIIZhT. – Moscow: Transport, 1965. – vol. 287. – 168 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Космодамианский Андрей Сергеевич
Российский университет транспорта, г. Москва.
Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Тяговый подвижной состав» РОАТ РУТ (МИИТ).
E-mail: askosm@mail.ru

Воробьев Владимир Иванович
Брянский государственный технический университет, г. Брянск.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог».
E-mail: vladimvorobiev@yandex.ru

Измеров Олег Васильевич
Брянский государственный технический университет, г. Брянск.
Кафедра «Подвижной состав железных дорог», соискатель,
E-mail: izmerov@yandex.ru

Капустин Михаил Юрьевич
Российский университет транспорта, г. Москва.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Тяговый подвижной состав» РОАТ РУТ (МИИТ)
E-mail: roatuour@bk.ru

Шевченко Дмитрий Николаевич
Российский университет транспорта, г. Москва.
Ассистент кафедры «Тяговый подвижной состав» РОАТ РУТ (МИИТ).
E-mail: shevchenkodn.roat@ya.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kosmodamianskii Andrew Sergeevich.
Russian University of transport, Moscow
Advanced Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head. of the Department "Traction rolling stock" ROAT RUTH (MIIT)
E-mail: askosm@mail.ru

Vorobyev Vladimir Ivanovich
Bryansk state technical University, Bryansk
Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the department "Rolling stock of Railways»
E-mail: vladimvorobiev@yandex.ru

Izmerov Oleg Vasilevich
Bryansk state technical University, Bryansk
Applicant at the department "Rolling stock of Railways",
E-mail: izmerov@yandex.ru

Kapustin Mikhail Urevich
Russian University of transport, Moscow
Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor of "Traction rolling stock" ROAT RUT (MIIT)
E-mail: roatuour@bk.ru

Shevchenko Dmitry Nikolaevich
Russian University of transport, Moscow
Assistant of the Department "Traction rolling stock" ROAT RUT (MIIT)
E-mail: shevchenkodn.roat@ya.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Методы поиска оптимальных параметров динамической системы тягового привода в процессе выбора вариантов конструкции [Текст] / А. С. Космодамианский, В. И. Воробьев и др. // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 2 (38). – С. 90 – 100.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kosmodamianskii A. S., Vorobyev V. I., Izmerov O. V., Kapustin M. U., Shevchenko D. N. Optimization method for dynamic system of locomotive traction drive, based on the base point method. Journal of Transsib Railway Studies, 2019. vol. 2. no. 38. pp. 90 – 100 (In Russian).

УДК 629.44-529.52

Е. А. Дроздов, Е. Н. Кузьмичев
Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС), г. Хабаровск, Российская Федерация

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ТОРМОЗА ВАГОНА

Аннотация. *В статье предложена конструкция автоматического пневматического тормоза вагона с ускорителем торможения. Применение разработанного ускорителя торможения автоматического пневматического тормоза на грузовых вагонах позволяет сократить тормозной путь поезда и уменьшить продольно-динамические силы в поезде при торможении.*

Ключевые слова: *пневматический тормоз, зарядка магистрали, ускоритель торможения, тормозной путь, время подготовки тормозов к действию*

Evgenii A. Drozdov, Evgenii N. Kuzmichev
Far Eastern State Transportation University (FESTU), Khabarovsk, Russian Federation

IMPROVEMENT OF AUTOMATIC PNEUMATIC CAR BRAKES

Abstract. *In article the design of an automatic pneumatic brake of the car with the braking accelerator is offered. Use of the developed accelerator of braking of an automatic pneumatic brake by freight cars allows to reduce a brake way of the train and to reduce longitudinally dynamic forces in the train when braking.*

Keywords: *pneumatic brake, highway charging, braking accelerator, brake way, time preparation of brakes for action*

Современные условия эксплуатации железнодорожного транспорта предъявляют все более высокие требования к эффективности работы тормозных систем, в частности, к сокращению тормозного пути поезда, что позволит увеличить скорость движения поездов и пропускную способность железных дорог [1].

Общеизвестно, что полный тормозной путь $S_т$ складывается из тормозного пути, пройденного поездом за время подготовки тормозов $S_п$, и действительного тормозного пути Sд: $S_т = S_п + S_д$ [2, 3]. Существенное сокращение полного тормозного пути достигается только за счет уменьшения тормозного пути, пройденного поездом за время подготовки тормозов Sп, которое определяется временем от момента начала разрядки тормозной магистрали краном машиниста на локомотиве до момента создания тормозной силы на последнем вагоне поезда $t_п$.

Время подготовки тормозов при торможении грузового поезда длиной 1000…1200 м (n = 70 четырехосных вагонов) составляет 10…12 с, тормозной путь, пройденный поездом за время подготовки тормозов $S_п$ при начальной скорости торможения 70…75 км/ч, равен 200… 250 м. При этом действительный тормозной путь составляет 240…260 м [4, 5].

Сокращение времени подготовки тормозов $t_п$ происходит в основном за счет увеличения скорости распространения тормозной волны по длине поезда.

Для увеличения скорости распространения тормозной волны, сокращения времени подготовки тормозов поезда и тормозного пути в современных тормозных системах автоматических пневматических тормозов вагонов используются ускорители торможения. Ускоритель торможения расположен в воздухораспределителе и обеспечивает при торможении дополнительную разрядку тормозной магистрали вагона [6].

Однако ускоритель производит разрядку тормозной магистрали на воздухораспределителе, удаленном от магистрального трубопровода посредством подводящей трубки. Площадь сечения подводящей трубки вдвое меньше площади сечения магистральной трубы. В результате работа ускорителя на воздухораспределителе увеличивает скорость распространения

тормозной волны незначительно. Лучшие современные системы автоматических пневматических тормозов вагонов обеспечивают скорость распространения тормозной волны не более 250…270 м/с [3].

При такой скорости распространения тормозной волны от вагона к вагону в поезде при торможении создаются значительные продольно-динамические силы. Следовательно, существующая тормозная система автоматического пневматического тормоза вагона ограничивает возможности вождения поездов большой длины и массы с большими скоростями [7].

Тормозная пневматическая волна распространяется от головы поезда по тормозной магистрали вагона, затем по соединительным рукавам тормозной магистрали между вагонами и далее по тормозной магистрали следующего вагона. Итак фактически тормозная пневматическая волна последовательно распространяется по тормозной магистрали всего поезда [8].

Существует ускоритель торможения автоматического пневматического тормоза, который предназначен для срабатывания только при экстренном торможении [9].

Ускоритель экстренного торможения автоматического пневматического тормоза представляет собой ускоритель разрядки тормозной магистрали, который содержит корпус 1, подвижную перегородку 2, подпружиненный срывной клапан 3 (рисунок 1).

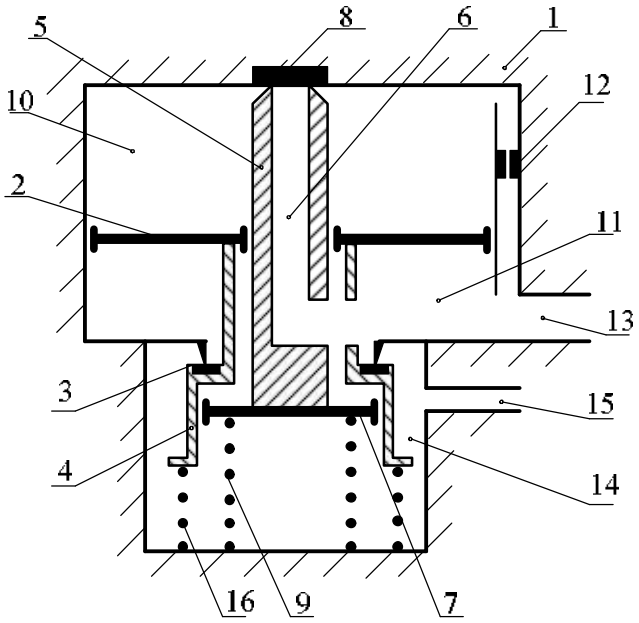


Рисунок 1 – Схема ускорителя экстренного торможения: 1 – корпус ускорителя; 2 – подвижная перегородка; 3 – срывной клапан; 4 – корпус срывного клапана; 5 – полый шток; 6 – осевой канал; 7 – поршень; 8 – клапан с уплотнительным элементом; 9 – регулируемая пружина; 10 – ускорительная камера; 11 – магистральная камера; 12 – дроссельное отверстие; 13 – тормозная магистраль; 14 – атмосферная полость; 15 – атмосферный канал; 16 – пружина срывного клапана

Корпус ускорителя 1 закреплен на тормозной магистрали автоматического пневматического тормоза вагона.

Подвижная перегородка 2, предназначенная для перемещения срывного клапана 3, расположена внутри корпуса ускорителя и образует с его стенками ускорительную камеру 10.

Седло срывного клапана с подвижной перегородкой образует в корпусе ускорителя магистральную камеру 11. Срывной клапан 3 разделяет магистральную камеру 11 и атмосферную полость 14, сообщенную с атмосферой каналом 15. Срывной клапан предназначен для выпуска воздуха из тормозной магистрали 13 в атмосферу, он подпружинен пружиной 16. В корпусе 4 срывного клапана 3 установлен поршень 7 блокирующего органа, жестко связанный с полым штоком 5, смонтированным с возможностью перемещения относительно подвижной перегородки 2. Регулируемая пружина 9 блокирующего органа также размещена в корпусе 4 срывного клапана 3 с опиранием в поршень 7. Уплотнительный

элемент 8 клапана блокирующего органа размещен в корпусе 1 ускорителя с возможностью перекрытия осевого канала 6 полого штока 5.

Магистральная камера 11 пневматически связана с тормозной магистралью 13. Ускорительная 10 и магистральная 11 камеры пневматически связаны между собой через дроссельное отверстие 12.

При служебном торможении давление воздуха в тормозной магистрали понижается темпом служебной разрядки. В ускорителе торможения автоматического пневматического тормоза давление воздуха в магистральной камере также понижается темпом служебной разрядки. При темпе служебной разрядки воздух из ускорительной камеры через калиброванное отверстие успевает перетекать в магистральную камеру, сохраняя в них равные давления воздуха. Подвижная перегородка ускорителя остается неподвижной, и срывной клапан находится в закрытом положении и прижат к своему седлу. Ускоритель торможения автоматического пневматического тормоза дополнительную разрядку тормозной воздушной магистрали не производит, сохраняя неизменными скорость распространения тормозной волны и время ее распространения по тормозной магистрали поезда.

При экстренном торможении давление воздуха в тормозной магистрали и магистральной камере ускорителя торможения понижается темпом экстренной разрядки, который примерно в три раза превышает темп служебной разрядки. При этом ускоритель начинает работать сразу, как только давление воздуха в тормозной магистрали начинает снижаться темпом экстренной разрядки без затрат времени на подготовку его к работе. При темпе экстренной разрядки магистральной камеры воздух из ускорительной камеры через калиброванное отверстие не успевает перетекать в нее (магистральную камеру), сохраняя в ускорительной камере давление воздуха выше, чем в магистральной.

За счет разности давлений в магистральной и ускорительной камерах поршень ускорителя смещается в сторону магистральной камеры и открывает срывной клапан. Срывной клапан сообщает с атмосферой магистральную камеру и тормозную магистраль, обеспечивая дополнительное быстрое снижение давления воздуха в них до атмосферного давления. Открытие срывного клапана приводит к увеличению темпа снижения давления воздуха в магистральной камере ускорителя торможения и тормозной магистрали и ускорению тормозной волны.

При этом снижение давления воздуха в тормозной магистрали приводит к срабатыванию тормоза на торможение на этом вагоне. Тормозная пневматическая волна распространяется к хвосту поезда по тормозной магистрали вагона, затем по ней между вагонами и далее по тормозной магистрали следующего вагона до его ускорителя торможения, который приводится в действие. Из этого следует, что тормозная пневматическая волна последовательно распространяется по тормозной магистрали всего поезда.

Авторами решалась задача, заключающаяся в разработке ускорителя торможения автоматического пневматического тормоза, обеспечивающего снижение времени на подготовку тормозов за счет разрядки тормозной магистрали каждого вагона одновременно с двух его концов. Для решения поставленной задачи на вагон предлагается устанавливать два взаимосвязанных ускорителя разрядки тормозной магистрали, расположенных на противоположных концах вагона, для образования единого ускорителя торможения автоматического пневматического тормоза.

При установке электрически связанных двух ускорителей разрядки тормозной магистрали на обоих противоположных концах n-го вагона одновременно с основной тормозной волной создается дополнительная тормозная волна, распространяющаяся по тормозной магистрали как n-го вагона, так и по тормозной магистрали следующего вагона.

Создание дополнительной тормозной волны на n-м вагоне приводит к включению тормозной системы следующего вагона через время распространения пневматической тормозной волны по соединительным междувагонным рукавам. Время распространения пневмати-

ческой тормозной волны по тормозной магистрали между этими вагонами является незначительным.

Практически одновременное включение тормозной системы на всех вагонах в процесс торможения приводит к уменьшению времени на подготовку тормозов и, как следствие, к сокращению тормозного пути.

На рисунке 2 представлена схема ускорителя торможения автоматического пневматического тормоза [10].

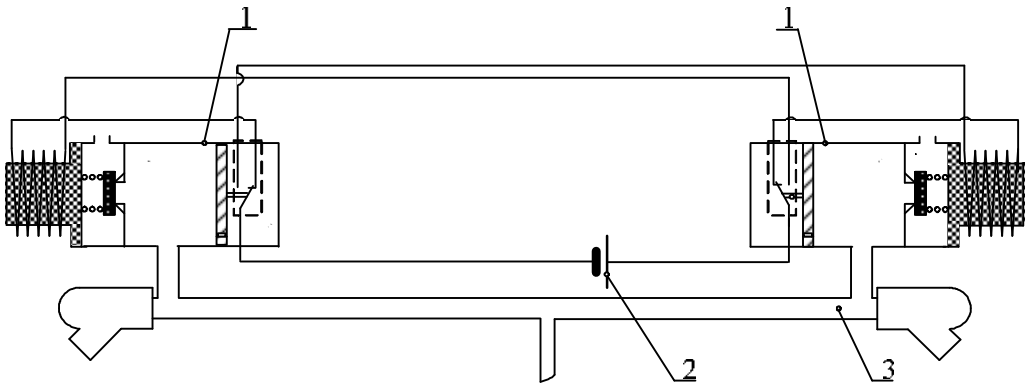


Рисунок 2 – Схема ускорителя торможения автоматического пневматического тормоза:
1 – прибор разрядки тормозной магистрали; 2 – источник постоянного тока;
3 – тормозная магистраль вагона

Ускоритель торможения автоматического пневматического тормоза содержит два однотипных прибора разрядки тормозной магистрали и источник постоянного электрического тока. Ускоритель торможения автоматического пневматического тормоза установлен на каждом вагоне транспортного средства.

Причем первый и второй приборы разрядки тормозной магистрали каждого ускорителя торможения расположены на противоположных концах вагона, а источник постоянного электрического тока может быть расположен в любом его месте.

Каждый прибор разрядки тормозной магистрали (рисунок 3) представляет собой корпус 1, внутри которого расположены поршень 2, срывной клапан 3, седло срывного клапана 4 и двухпозиционный электрический переключатель 6. Снаружи прибора разрядки тормозной магистрали расположена электромагнитная катушка 7.

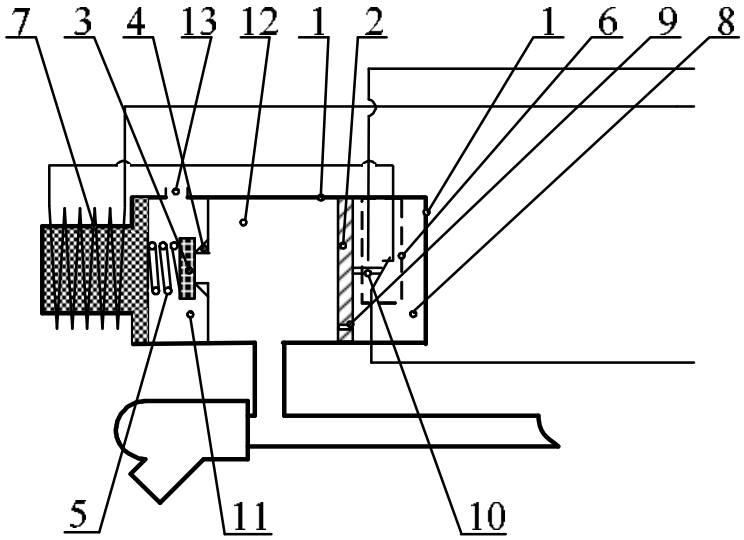


Рисунок 3 – Прибор разрядки тормозной магистрали: 1 – корпус; 2 – поршень; 3 – срывной клапан; 4 – седло срывного клапана; 5 – пружина срывного клапана; 6 – двухпозиционный электрический переключатель; 7 – электромагнитная катушка; 8 – ускорительная камера; 9 – калиброванное отверстие в поршне; 10 – шток поршня; 11 – атмосферная камера; 12 – магистральная камера;
13 – атмосферный канал

Поршень 2 с калиброванным отверстием предназначен для замыкания или размыкания контактов электрического двухпозиционного переключателя 6 и образует со стенками корпуса ускорительную камеру 8.

Двухпозиционный переключатель имеет один замыкающий и один размыкающий контакты и размещен в ускорительной камере корпуса с расположением замыкающего контакта вблизи поршня. Подвижная часть контакта связана со штоком 10 поршня.

Седло срывного клапана 4 жестко связано со стенками корпуса и образует с ними атмосферную камеру 11.

При этом поршень 2 и седло срывного клапана 4 со стенками корпуса образуют магистральную камеру 12.

Срывной клапан 3 предназначен для выпуска воздуха из тормозной магистрали в атмосферу. Он выполнен из ферромагнитного металла, расположен в атмосферной камере и подпружинен к седлу срывного клапана.

Электромагнитная катушка 7 предназначена для открытия / закрытия срывного клапана и жестко закреплена соосно с ним на корпусе.

Магистральная камера пневматически связана с тормозной магистралью поезда и через калиброванное отверстие 9 в поршне сообщается с ускорительной камерой.

Атмосферная камера связана с атмосферой каналом 13.

В каждом ускорителе торможения автоматического пневматического тормоза оба его прибора разрядки тормозной магистрали и источник постоянного электрического тока связаны между собой электрически.

При этом подвижная часть электрического переключателя каждого прибора разрядки тормозной воздушной магистрали электрически связана с источником постоянного тока ускорителя торможения.

Один конец обмотки электромагнитной катушки первого прибора разрядки тормозной воздушной магистрали соединен с неподвижной частью размыкающего контакта электрического переключателя этого прибора, а другой ее конец – с неподвижной частью замыкающего контакта электрического переключателя второго прибора ускорителя торможения. Обмотка электромагнитной катушки второго прибора разрядки тормозной магистрали подключена аналогично подключению обмотки электромагнитной катушки первого прибора разрядки.

Работа ускорителя торможения автоматического пневматического тормоза показана на примере работы ускорителя торможения (рисунок 1), установленного на первом от локомотива вагоне.

В исходном состоянии тормоза при отсутствии давления воздуха в тормозной магистрали в каждом ускорителе торможения поршни каждого прибора разрядки тормозной магистрали находятся в крайнем положении. Замыкающий контакт электрического переключателя каждого прибора разрядки тормозной магистрали при этом находится в разомкнутом состоянии, как и электрическая цепь электромагнитных катушек. Срывной клапан прижат к седлу пружиной, перекрывая пневматическую связь тормозной магистрали с атмосферой.

Управление тормозом всего поезда осуществляется машинистом локомотива путем изменения давления воздуха в тормозной магистрали.

При зарядке тормоза давление воздуха в тормозной магистрали повышается, что приводит к повышению давления воздуха не только в магистральной камере, но и через калиброванное отверстие в ускорительной камере каждого прибора разрядки тормозной магистрали. При этом поршни каждого прибора разрядки остаются в крайнем положении, а электрическая цепь электромагнитных катушках остается разомкнутой. Срывной клапан сохраняет свое положение, оставляя перекрытой пневматическую связь тормозной магистрали с атмосферой.

При служебном торможении в начале вагона со стороны локомотива начинается снижение давления воздуха в тормозной магистрали темпом служебной разрядки, тем самым

создавая основную пневматическую тормозную волну, которая распространяется по тормозной магистрали к концу вагона и далее к следующему вагону.

При достижении тормозной волны магистрали первого вагона срабатывает ускоритель торможения автоматического пневматического тормоза этого вагона.

При этом в магистральной камере первого прибора разрядки тормозной магистрали давление воздуха понижается темпом служебной разрядки. Это приводит к возникновению разности давлений воздуха в магистральной и в ускорительной камерах. Воздух из ускорительной камеры через калиброванное отверстие медленно перетекает в магистральную камеру, снижая тем самым давление воздуха в ней темпом, который меньше, чем темп служебной разрядки. В ускорительной камере давление воздуха остается бóльшим, чем давление воздуха в магистральной камере. В результате поршень смещается в сторону магистральной камеры, его шток замыкает замыкающий контакт переключателя первого прибора разрядки тормозной магистрали. В результате создается электрическая цепь, включающая в себя источник питания, замыкающий контакт первого прибора разрядки тормозной магистрали, электромагнитную катушку второго прибора разрядки и размыкающий контакт второго прибора разрядки. При этом электромагнитная катушка первого прибора разрядки тормозной магистрали остается обесточенной.

Под действием электромагнитного поля, созданного электромагнитной катушкой 7 второго прибора разрядки тормозной магистрали, открывается срывной клапан 3 прибора, и его магистральная камера 12 через канал 13 пневматически соединяется с атмосферой. Это приводит к снижению давления воздуха в магистральной камере 12 и, как следствие, к снижению давления в тормозной магистрали на конце вагона со стороны хвоста поезда темпом служебной разрядки и созданию дополнительной пневматической тормозной волны.

Если считать время распространения электрического тока по длине вагона равным нулю, то разрядка тормозной магистрали на вагоне происходит одновременно с обоих концов вагона: с начала со стороны локомотива, а затем в конце со стороны хвоста поезда. На одном конце вагона со стороны локомотива разрядка тормозной магистрали вызвана приходом основной тормозной волны, тогда как на противоположном конце вагона она вызвана срабатыванием ускорителя торможения автоматического пневматического тормоза.

Дополнительная и основная пневматические тормозные волны, распространяясь в тормозной магистрали вагона, при встрече создают пониженное давление воздуха, что приводит к срабатыванию на этом вагоне тормоза на торможение через время, равное времени распространения пневматической волны по тормозной магистрали от конца вагона до его середины t/2. Дополнительная тормозная волна, распространяясь в направлении второго вагона, проходит по тормозной магистрали между вагонами за время t_1 и приводит в действие ускоритель торможения автоматического пневматического тормоза второго вагона.

После срабатывания тормоза первого вагона и ускорителя торможения автоматического пневматического тормоза второго вагона ускоритель торможения первого вагона отключается. При этом во втором приборе разрядки первого вагона поршень смещается в сторону магистральной камеры и своим штоком размыкает электрическую цепь питания электромагнитной катушки прибора разрядки. Поэтому действие электромагнитного поля электромагнитной катушки на срывной клапан прекращается, и он возвращается на свое место – на седло срывного клапана, разобщая магистральную камеру и тормозную магистраль с атмосферой. При этом ускоритель торможения автоматического пневматического тормоза первого вагона выключается из работы.

Автоматический пневматический тормоз второго вагона срабатывает на торможение через время, равное времени распространения пневматической волны по тормозной магистрали между первым и вторым вагонами t_1 и время продвижения ее до середины упомянутого вагона t/2.

Время срабатывания тормоза на втором вагоне T_2 с момента начала торможения машинистом локомотива определяется по формуле:

$$T_2 = 2t_1 + t/2, \quad (1)$$

где t_1 – время распространения пневматической тормозной волны по тормозной магистрали между вагонами или между вагоном и локомотивом, с;

t/2 – время распространения пневматической тормозной волны по тормозной магистрали вагона от его начала до середины, с.

Время до срабатывания тормоза на последнем вагоне при n-м количестве вагонов в поезде

$$T_n = nt_1 + t / 2. \quad (2)$$

При экстренном торможении ускоритель торможения автоматического пневматического тормоза работает так же, как при служебном торможении.

Внедрение разработанного ускорителя торможения автоматического пневматического тормоза позволит сократить тормозной путь поезда за счет сокращения времени на подготовку тормозов.

На основании вышеизложенного можно сделать заключение, что применение предлагаемого ускорителя торможения автоматического пневматического тормоза на грузовых вагонах позволит сократить тормозной путь поезда и уменьшить продольно-динамические силы при торможении. При этом тормоз грузовых вагонов по характеристикам практически сравняется с электропневматическим тормозом.

Список литературы

1. Правила технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава [Текст]. – М.: Техинформ, 2014. – 224 с.

2. Асадченко, В. Р. Расчет пневматических тормозов железнодорожного подвижного состава [Текст] / В. Р. Асадченко. – М.: Маршрут, 2004. – 120 с.

3. Правила тяговых расчетов для поездной работы [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2016.– 514 с.

4. Афонин, Г. С. Автоматические тормоза подвижного состава [Текст] / Г. С. Афонин, В. Н. Барщенков, Н. В. Кондратьев. – М.: Академия, 2010. – 320 с.

5. Асадченко, В. Р. Автоматические тормоза подвижного состава [Текст] / В. Р. Асадченко. – М: Маршрут, 2006. – 392 с.

6. Галай, Э. И. Повышение эффективности электропневматических тормозов поезда [Текст] / Э. И. Галай / Белорусский гос. ун-т транспорта. – Гомель, 2002. – 182 с.

7. Кравчук, В. В. Управление безопасностью движения поездов: Монография [Текст] / В. В. Кравчук, В. К. Верхотуров, Ю. В. Никулин / Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения. – Хабаровск, 2010. – 256 с.

8. Тормозное оборудование железнодорожного подвижного состава: справочник [Текст] / В. И. Крылов, В. В. Крылов и др. – М.: Транспорт, 1989. – 487 с.

9. Патент 2141417 РФ, МПК B60T15/30. Ускоритель экстренного торможения тормоза железнодорожного транспортного средства / Козюлин Л. В., Егоренков А. А, Иноземцев В. Г., Смелов В. Н., Крылов В. В. (РФ). – № 98112210/28; заявл. 25.06.1998; опубл. 20.11.1999, Бюл. № 32.

10. Патент 2623790 РФ, МПК B60T15/30. Ускоритель торможения автоматического пневматического тормоза / Дроздов Е. А. (РФ). – № 2015149181; заявл. 16.11.2015; опубл. 29.06.2017, Бюл. № 19.

References

1. Pravila texnicheskogo obsluzhivaniya tormoznogo oborudovaniya i upravleniya tormozami zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava (Rules of maintenance of the brake equipment and management of brakes of the rolling stock). – M.: Tekhinform, 2014. – 224 p.

2. Asadchenko V. R. Raschet pnevmaticheskix tormozov zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava (Calculation of pneumatic brakes of railway mobile structure). Moscow: Marshrut, 2004. – 120 p.

3. Pravila tyagovy`x raschetov dlya poezdnoj raboty (Rules of traction calculations for train work). JSC "Russian Railways". – M , 2016. – 514 p.

4. Afonin G. S., Barshchenkov V. N., Kondratyev N. V. Avtomaticheskie tormoza podvizhnogo sostava (Automatic brakes of the rolling stock). – M.: Academy, 2010. – 320 p.

5. Asadchenko V.R. Avtomaticheskie tormoza podvizhnogo sostava (Automatic brakes of the rolling stock). – M: Marshrut, 2006. – 392 p.

6. Galay E. I. Povy`shenie e`ffektivnosti e`lektropnevmaticheskix tormozov poezda (Increase in efficiency of electric air brakes of the train). Gomel: BSUT, 2002. – 182 p.

7. Kravchuk V. V., Verkhoturov V. K., Nikulin Yu. V. Upravlenie bezopasnost`yu dvizheniya poezdov (Management of traffic safety of trains: monograph). – Khabarovsk: DVGUPS, 2010. – 256 p.

8. Krylov V. I., Krylov V. V., Efremov V. N., Demushkin P. T. Tormoznoe oborudovanie zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava (Brake equipment of the rolling stock: reference book). – M: Transport, 1989. – 487 p.

9. Patent 2141417 of the Russian Federation, MPK B60T15/30. Uskoritel` e`kstrennogo tormozheniya tormoza zheleznodorozhnogo transportnogo sredstva Accelerator of emergency brake application of a brake of the railway vehicle/L. V. Kozyulin, A.A. Egorenkov, V.G. Inozemtsev, V.N. Smelov, V.V. Krylov (Russian Federation). – No. 98112210/28; It Is stated 25.06.1998; Opubl. 20.11.1999.

10. Patent 2623790 of the Russian Federation, MPK B60T15/30. Uskoritel` tormozheniya avtomaticheskogo pnevmaticheskogo tormoza Accelerator of braking of an automatic pneumatic brake / E.A. Drozdov (Russian Federation). – No. 2015149181; Stated 16.11.2015; Opubl. 29.06.2017 Bulletins no. 19.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дроздов Евгений Александрович

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

Серышева ул., д. 47, г. Хабаровск, 680021, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспорт железных дорог», ДВГУПС.

Тел.: +7 (4212) 40-70-56.

E-mail: vag5@festu.khv.ru

Кузьмичев Евгений Николаевич

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

Серышева ул., д. 47, г. Хабаровск, 680021, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспорт железных дрого», ДВГУПС.

Тел.: +7 (4212) 40-70-56.

E-mail: accord@festu.khv.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Дроздов, Е. А. Усовершенствование автоматического пневматического тормоза вагона./ Е. А. Дроздов, Е. Н. Кузьмичев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 2 (38). – С. 101 – 108.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Drozdov Evgenii Alexandrovich

Far Eastern State Transportation University (FESTU), Khabarovsk, Russian Federation.

47, Seryshev St., Khabarovsk, 680011, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering Sciences, Associate Professor of the department « Transport of the railroads », FESTU.

Phone: +7 (4212) 40-70-56.

E-mail: vag5@festu.khv.ru

Kuzmichev Evgenii Nikolayevich

Far Eastern State Transportation University (FESTU), Khabarovsk, Russian Federation.

47, Seryshev St., Khabarovsk, 680011, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering Sciences, Associate Professor of the department « Transport of the railroads », FESTU.

Phone: +7 (4212) 40-70-56.

E-mail: accord@festu.khv.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Drozdov E. A., Kuzmichev E. N. Improvement of automatic pneumatic car brakes. Journal of Transsib Railway Studies, 2019. vol. 2. No. 38. pp. 101 – 108 (In Russian).

УДК 625.111

И. Н. Кравченя, Т. А. Дубровская
Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ), г. Гомель, Беларусь

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ РЕКОНСТРУКЦИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Аннотация. *Развитие железнодорожного транспорта в настоящее время невозможно представить без использования математических моделей и алгоритмов. Повысить скорости движения поездов и сократить время в пути, минимизировав при этом затраты, можно только при качественном и полном использовании математического аппарата. Использование информационных технологий позволяет принять эффективное решение при разработке проекта реконструкции железнодорожной линии. Применение методов компьютерной оптимизации при реконструкции железных дорог позволяет найти оптимальное решение при той или иной постановке задачи без значительного увеличения материальных расходов, которые в настоящее время являются основным из важнейших критериев любого исследования. При математическом моделировании железная дорога представляется в виде технической системы, которая делится на участки (перегоны и раздельные пункты), в пределах которых ограничение скорости постоянно. Участок описывается множеством параметров технических устройств (верхнее строение пути, в том числе стрелочные переводы, искусственные сооружения), определяющих ограничения скорости на участке. Скорость на линии ограничена возможностями технических устройств. Ограничения скорости изменяются по длине линии. В статье рассмотрены проблемы технической реконструкции плана железных дорог для повышения скорости движения поездов. Указана актуальность применения математических методов для разработки оптимального плана повышения скорости движения поездов. Рассмотрена пара взаимно двойственных задач оптимальной реконструкции железнодорожных кривых для повышения скорости движения поездов при минимальных капитальных вложениях. В качестве методов решения поставленных задач предложены метод наискорейшего спуска, модифицированный метод динамического программирования (метод Кеттеля), метод неопределенных множителей Лагранжа. Указана целесообразность применения каждого метода для решения поставленной задачи. Рассмотренные методы позволяют реализовать ряд процедур автоматизированного проектирования реконструкции плана железных дорог.*

Ключевые слова: *железнодорожный путь, скорость, математическое моделирование, реконструкция, экономическая эффективность.*

Irina N. Kravchenya, Tatyana A. Dubrovskaya

Belarusian State University of Transport (BelSUT) Gomel, the Belarus

APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELING METHODS WHEN DESIGNING RECONSTRUCTION OF RAILWAYS

Annotation. *The development of railway transport is currently impossible to imagine without the use of mathematical models and algorithms. Consider the increase in speeds, reduction of travel time, while minimizing costs, is possible only with the qualitative and full use of the mathematical apparatus. The use of information technologies makes it possible to take an effective decision in the development of a project for the reconstruction of a railway line.*

The current state of the theory of railway transport is characterized by the presence of a developed system of mathematical models and algorithms for analyzing various features of railways. This opens up possibilities for building an approach to the problems of searching and optimizing design solutions on a mathematical basis, with the reduction to a minimum of costly and time-consuming physical modeling procedures. One of the main tasks that are set for the railway transport in the near future is to increase the speed of trains on existing railway lines with the use of computer technology (computer-aided design).

The article deals with the problems of technical reconstruction of the railway plan to increase the speed of train movement. The urgency of the use of computer mathematical methods for the development of an optimal plan for increasing the speed of trains. A pair of mutually dual problems of optimal reconstruction of railway curves to increase the speed of trains with minimal capital investment is considered. As methods for solving the problems posed, the following methods were proposed: the method of steepest descent, a modified method of dynamic programming (the Cattell method), the method of indefinite Lagrange multipliers. The expediency of using each method to solve the problem is indicated. The considered methods allow to implement a number of computer-aided design procedures for the reconstruction of the railway plan.

Keywords: *railway, speed, mathematical modeling, reconstruction, economic efficiency.*

Одной из основных задач современной Белорусской железной дороги являются повышение скоростей движения поездов на существующих железнодорожных линиях для связи столицы республики г. Минск и областных центров. В республике Беларусь есть потребность повысить скорости движения пассажирских поездов так, чтобы у жителей республики была возможность совершить поездку в обе стороны за один день и светлое время суток использовать для выполнения цели поездки. Эту задачу можно решить за счет использования нового подвижного состава, усиления верхнего строения пути и улучшения плана линии [1].

Увеличение скорости движения на всех видах транспорта связано с необходимостью повышения эффективности общественного производства и производительности труда.

Потребность в моделировании самого процесса проектирования реконструкции железных дорог возникает в связи с необходимостью обеспечения специалиста в области системного анализа средствами описания разрабатываемой технологии проектирования.

При проектировании реконструкции железных дорог из-за сложности и многообразия строительных и эксплуатационных затрат во многих случаях приходится рассматривать большое число вариантов и выбирать из них наиболее рациональный по принятому критерию при заданных ограничениях.

Такие задачи классифицируются по различным признакам: количеству критериев (одно- и многокритериальные задачи), степени достоверности информации (детерминированные и стохастические), временному фактору (статические и динамические) и т. д.

Отыскание варианта с оптимальным значением критерия, помимо которого должны учитываться и другие факторы, можно понять и оценить только с помощью теории принятия решений.

Для использования методов математического моделирования представим железную дорогу в виде технической системы. Скорость на линии ограничена возможностями технических устройств. Ограничения скорости изменяются по длине линии.

Количественным показателем *технической эффективности* увеличения скорости на участке является сокращение времени хода ΔT, количественным показателем *экономической эффективности* – величина капиталовложений K на совершенствование постоянных устройств.

Увеличение радиусов кривых в плане линий приведет к повышению скорости движения поездов и, как следствие, к сокращению времени хода ΔT.

Однако чем больше величина радиуса кривой, тем большие капиталовложения K требуются для реконструкции линии. В реальных условиях капиталовложения, отпускаемые на реконструкцию, ограничены: $K \le K_0$. Ограничение может быть наложено и на сокращение времени хода: $\Delta T \ge \Delta T_0$.

Рассмотрим пару взаимно двойственных задач оптимальной реконструкции криволинейных участков пути железных дорог с целью повышения скоростей движения поездов с минимальными денежными затратами.

Задача 1. Найти такие величины проектных радиусов кривых R_i $(i = \overline{1,m})$, при которых для заданных капиталовложений K_0 сокращение времени хода ΔT будет максимальным:

$$\Delta T \to \max \quad \text{при} \quad K = K_0. \tag{1}$$

Задача 2. Необходимо найти такие величины проектных радиусов R_i $(i = \overline{1,m})$, ограничивающие скорость кривых, при которых сокращение времени хода ΔT будет равно заданному ΔT_0, а капиталовложения K будут минимальными:

$$K \to \min \quad \text{при} \quad \Delta T = \Delta T_0. \tag{2}$$

В качестве методов решения поставленных задач для дальнейшей их компьютерной реализации могут быть предложены метод наискорейшего спуска [2 – 4], модифицированный

метод динамического программирования – метод Кеттеля [5], метод неопределенных множителей Лагранжа [6]. Каждый из этих методов применим для решения задачи формирования плана участка железнодорожной линии или линии в целом, но каждый из них имеет свои сферы применения.

Метод наискорейшего спуска. При формировании плана участка линии с большим количеством кривых целесообразно применять метод наискорейшего спуска [3].

Представим железнодорожную линию как некоторую техническую систему, элементами которой являются кривые. Разделим линию на m кривых, для которых рассматривается n вариантов радиусов. Пронумеруем варианты в порядке убывания времени хода поездов. Каждому i-му $(i=\overline{1,m})$ варианту поставим в соответствие пару чисел: Δt_{ij} и ΔK_{ij} – сокращение времени хода и капиталовложений.

Для всех кривых вычислим критерий, который определяет величину капиталовложений на единицу сокращения времени хода:

$$g_{ij}=\frac{\Delta K_{ij}}{\Delta t_{ij}}. \tag{3}$$

Выстроим последовательность критериев g_{ij} в порядке их возрастания. Затем происходит обработка критериев, в процессе которой получится множество оптимальных решений реконструкции участка железной дороги для увеличения скоростей движения. Данная информация является необходимой для лица, принимающего решение.

Метод Кеттеля. При реконструкции участка линии с небольшим количеством кривых для проектирования радиусов этих кривых можно применить модифицированный метод динамического программирования (метод Кеттеля) [5].

Метод Кеттеля основан на композиции вариантов радиусов кривых. Композиция проводится по двум показателям – сокращению времени хода ΔT и капитальных вложений в реконструкцию K.

Вначале осуществляется композиция первого и второго вариантов реконструкции. Пары чисел нумеруются в порядке возрастания суммарных капиталовложений K:

$$K(n^{(1)})\le K(n^{(2)})\le\ldots\le K(n^{(s)}). \tag{4}$$

В дальнейшем из цепочки выбрасываются те пары чисел, где сокращение времени хода меньше предыдущего. Таким образом, устраняются недоминируемые варианты, когда

$$K(n)\ge K(n')\ \text{ и }\ \Delta T(n)\le\Delta T(n'). \tag{5}$$

Результатом этой процедуры является доминирующая последовательность:

$$K(n^{(1)})\le K(n^{(2)})\le\ldots\le K(n^{(s)});$$

$$\Delta T(n^{(1)})\le\Delta T(n^{(2)})\le\ldots\le\Delta T(n^{(s)}). \tag{6}$$

Доминирующая последовательность, возникающая из композиции вариантов реконструкции двух радиусов, называется условным вариантом 1.

Аналогично составляется композиция из последующих вариантов реконструкции и формируется следующий условный вариант. Далее выполняется композиция условных вариантов. Результатом является общая доминирующая последовательность, представляющая собой информацию для лица, принимающего решение.

Таким образом, метод Кеттеля позволяет решать задачу формирования оптимального плана участка железнодорожной линии в целом, т. е. дает глобальное оптимальное решение.

Однако при числе кривых более десяти использование этого метода приводит к очень большому объему вычислений даже на ЭВМ.

Отдельно стоит рассмотреть *метод неопределенных множителей Лагранжа,* который является классическим методом решения задач нелинейной оптимизации и позволяет решать взаимно двойственные задачи.

Задача 1. Пусть имеется участок железной дороги, на котором располагается m независимых (однорадиусных и составных) кривых. На каждой i-й $(i=\overline{1,m})$ кривой известны длина криволинейного участка l_i; ограничение скорости в пределах этого участка v_i; угол поворота α_i; капиталовложения K_i, необходимые для реконструкции единицы длины кривой, а также параметр a, зависящий от величины возвышения наружного рельса и допускаемой величины непогашенного ускорения.

Ставится задача отыскания таких величин проектных радиусов R_i $(i=\overline{1,m})$, ограничивающих скорость кривых, при которых капиталовложения K будут равны заданным K_0, а сокращение времени хода ΔT будет максимальным:

$$\Delta T=\sum_{i=1}^{m} l_i\left(\frac{1}{v_i}-\frac{1}{a\sqrt{R_i}}\right)\to \max \tag{7}$$

при

$$\sum_{i=1}^{m} K_i\,\alpha_i R_i^2=K_0. \tag{8}$$

Для решения поставленной задачи будем использовать метод неопределенных множителей Лагранжа. Составим функцию Лагранжа:

$$L(R_i,\lambda)=\sum_{i=1}^{m} l_i\left(\frac{1}{v_i}-\frac{1}{a\sqrt{R_i}}\right)+\lambda\left(K_0-\sum_{i=1}^{m} K_i\,\alpha_i R_i^2\right), \tag{9}$$

где λ – множитель Лагранжа, который показывает, насколько изменится максимальное сокращение времени хода ΔT в оптимальном решении при увеличении величины капиталовложений K_0 на единицу.

Найдем частные производные функции Лагранжа по неизвестным величинам R_i $(i=\overline{1,m})$ и λ и приравняем их к нулю. В результате получим систему уравнений:

$$\begin{cases}\dfrac{\partial L(R_i,\lambda)}{\partial R_i}=\dfrac{l_i}{2a\,R_i^{3/2}}-2\lambda K_i\,\alpha_i R_i=0,\ \ i=\overline{1,m};\\[2ex] \dfrac{\partial L(R_i,\lambda)}{\partial \lambda}=K_0-\sum\limits_{i=1}^{m} K_i\,\alpha_i R_i^2=0.\end{cases} \tag{10}$$

Решив полученную систему уравнений (10) относительно неизвестных R_i $(i=\overline{1,m})$ и λ, для заданной величины капиталовложений K_0 можно найти оптимальные величины проектных радиусов R_i (11) и максимальное сокращение времени хода ΔT (11*).

$$R_i=\left(\frac{l_i}{K_i\alpha_i}\right)^{2/5}\frac{K_0^{1/2}}{\left(\sum\limits_{i=1}^{m} l_i^{4/5}(K_i\alpha_i)^{1/5}\right)^{1/2}}; \tag{11}$$

$$\Delta T = \sum_{i=1}^{m} l_i \left(\frac{1}{v_i} - \frac{1}{a} \left(\frac{K_i \alpha_i}{l_i} \right)^{1/5} \frac{\left(\sum_{i=1}^{m} l_i^{4/5} (K_i \alpha_i)^{1/5} \right)^{1/4}}{K_0^{1/4}} \right). \quad (11^*)$$

Возможна следующая постановка двойственной задачи оптимальной реконструкции железнодорожных кривых.

Задача 2. Необходимо найти такие величины радиусов R_i $(i = \overline{1,m})$, ограничивающих скорость кривых, при которых сокращение времени хода ΔT будет равно заданному ΔT_0, а капиталовложения K будут минимальными:

$$K = \sum_{i=1}^{m} K_i \alpha_i R_i^2 \to \min \quad (12)$$

при

$$\sum_{i=1}^{m} l_i \left(\frac{1}{v_i} - \frac{1}{a\sqrt{R_i}} \right) = \Delta T_0. \quad (13)$$

Составим функцию Лагранжа:

$$L(R_i, \lambda) = \sum_{i=1}^{m} K_i \alpha_i R_i^2 + \lambda \left(\Delta T_0 - \sum_{i=1}^{m} l_i \left(\frac{1}{v_i} - \frac{1}{a\sqrt{R_i}} \right) \right), \quad (14)$$

где λ – множитель Лагранжа, который показывает, насколько уменьшится величина капиталовложений K в оптимальном решении при изменении сокращения времени хода ΔT_0 на единицу.

Получим систему уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial L(R_i, \lambda)}{\partial R_i} = 2 K_i \alpha_i R_i - \lambda \dfrac{l_i}{2 a R_i^{3/2}} = 0, \quad i = \overline{1,m}; \\ \dfrac{\partial L(R_i, \lambda)}{\partial \lambda} = \Delta T_0 - \sum\limits_{i=1}^{m} l_i \left(\dfrac{1}{v_i} - \dfrac{1}{a\sqrt{R_i}} \right) = 0. \end{cases} \quad (15)$$

В результате решения системы уравнений (15) для заданного сокращения времени хода ΔT_0 будут получены оптимальные величины проектных радиусов R_i (16) и величина минимальных капиталовложений K (16*).

$$R_i = \left(\frac{l_i}{K_i \alpha_i} \right)^{2/5} \left[\frac{\sum_{i=1}^{m} l_i^{4/5} (K_i \alpha_i)^{1/5}}{a \left(\sum_{i=1}^{m} \frac{l_i}{v_i} - \Delta T_0 \right)} \right]^2; \quad (16)$$

$$K = \sum_{i=1}^{m} l_i^{4/5} \left(K_i \alpha_i \right)^{1/5} \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^{m} l_i^{4/5} \left(K_i \alpha_i \right)^{1/5}}{a \left(\sum_{i=1}^{m} \frac{l_i}{v_i} - \Delta T_0 \right)} \right)^4. \quad (16^*)$$

Количественное решение задачи определения оптимальных величин реконструируемых радиусов R_i методом Лагранжа рассмотрим на примере участка Белорусской железной доро-

ги на направлении Минск – граница РФ протяженностью 10 км (ПК 7120 – ПК 7220), на котором располагается девять независимых кривых радиусом $R < 2000$ м. Характеристики этих кривых, необходимые для решения данной задачи, представлены в таблице.

Характеристики кривых

№ п/п	Длина кривой l,м	Скорость ν, м/с	Угол поворота α	Капиталовложения K_i, у.е.	Непогашенное ускорение a, м/с^2	Сокращение времени хода ΔT, с
1	171,11	40,9	9,73	97777		
2	226,07	33,3	20,73	129183		
3	436,38	31,3	40,72	249360		
4	196,12	31,4	18,37	112069		
5	245,22	32,1	22,68	140126	0,7	3,5
6	174,41	32,3	15,60	99663		
7	183,70	30,8	15,10	104971		
8	522,27	31,8	48,13	298440		
9	305,66	36,8	21,10	174663		

С помощью системы компьютерной математики Mathcad получены величины оптимальных радиусов R_i (рисунок).

$m := 8 \quad i := 0..m \quad \Delta T := 3.5 \quad a := 0.7$

$l := (171.11 \ 226.07 \ 436.38 \ 196.12 \ 245.22 \ 174.41 \ 183.70 \ 522.27 \ 305.66)^T$

$K := (97777 \ 129183 \ 249360 \ 112069 \ 140126 \ 99663 \ 104971 \ 298440 \ 174663)^T$

$\alpha := (9.73 \ 20.73 \ 40.72 \ 18.37 \ 22.68 \ 15.60 \ 15.10 \ 48.13 \ 21.10)^T$

$\upsilon := (40.9 \ 33.3 \ 31.3 \ 31.4 \ 32.1 \ 32.3 \ 30.8 \ 31.8 \ 36.8)^T$

$$R_i := \left(\frac{l_i}{K_i \cdot \alpha_i}\right)^{\frac{2}{5}} \cdot \left[\frac{\sum_{k=0}^{m} (l_k)^{\frac{4}{5}} \cdot (K_k \cdot \alpha_k)^{\frac{1}{5}}}{a \cdot \left(\sum_{k=0}^{m} \frac{l_k}{\upsilon_k} - \Delta T\right)}\right]^2$$

$R^T = (3.595 \times 10^3 \ \ 2.656 \times 10^3 \ \ 2.028 \times 10^3 \ \ 2.788 \times 10^3 \ \ 2.563 \times 10^3 \ \ 2.976 \times 10^3 \ \ 3.015 \times 10^3 \ \ 1.897 \times 10^3 \ \ 2.638 \times 10^3)$

Решение задачи с помощью системы компьютерной математики Mathcad

Таким образом, рассмотренные методы на каждом участке позволяют определить максимально допустимую скорость, чтобы в целом на дороге маршрутные скорости достигали заданного значения при минимальных капитальных вложениях.

Однако метод неопределенных множителей Лагранжа позволил определить на каждом участке максимально допустимую скорость, чтобы в целом на дороге маршрутные скорости достигали заданного значения при минимальных капитальных вложениях.

Список литературы

1. Ерофеев, А. А. Проблемы повышения скорости движения поездов на существующих железнодорожных линиях [Текст] / А. А. Ерофеев, П. В. Ковтун, Т. А. Дубровская // Вестник

БелГУТа: наука и транспорт / Белорусский гос. ун-т транспорта. – № 2(37). – Гомель. – 2018. – С.57 – 59.

2. Кравченя, И. Н. Определение оптимальных скоростей движения поездов в кривых при введении скоростного движения [Текст] / И. Н. Кравченя, Т. А. Руденко // Транспорт и транспортная логистика: Бюллетень научных работ Брянского филиала МИИТа. – Брянск: Дизайн-Принт. – № 2 (4). – 2013. – С. 15 – 17.

3. Кравченя, И. Н. Определение параметров реконструкции железной дороги для скоростного движения с учетом неопределенности [Текст] / И. Н. Кравченя, Т. А. Дубровская // Транспорт и транспортная логистика : Бюллетень научных работ Брянского филиала МИИТа. – Брянск: Дизайн-Принт. – № 1 (7). – 2015. – С. 24 – 29.

4. Кравченя, И. Н. Оптимизация затрат на реконструкцию железнодорожной линии под скоростное движение [Текст] / И. Н. Кравченя, Т. А. Дубровская // Вестник экономики транспорта и промышленности / Украинский гос. ун-т ж.-д. трансп. – Харьков. – 2018. – № 62 (спецвыпуск).– С. 82 – 89.

5. Окулов, С. М. Динамическое программирование: Учебное пособие [Текст] / С. М. Окулов, О. А. Пестов. – М.: Бином, 2012. – 299 с.

6. Кравченя, И. Н. Математическое моделирование. Линейное и нелинейное программирование, сетевое планирование и управление [Текст] / И. Н. Кравченя, Е. Л. Бурдук, Т. В. Алымова / Белорусский гос. ун-т транспорта. – Гомель. – 2014. – 112 с.

7. Курган, Д. Н. Методология расчетов железнодорожной колеи при взаимодействии со скоростным подвижным составом: Автореф. … д.т.н.: 05.22.06. – Днепропетровск, 2017. – 35 с.

8. Economic Analysis of High Speed Rail in Europe. Fundacion BBVA, 2009. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://w3.grupobbva.com/ TLFU/dat/inf_web_economic_analysis.pdf. (Дата обращения: 15.04.2018).

9. Frédéric Dobruszkes, Catherine Dehon, Moshe Givoni Does European high-speed rail affect the current level of air services? An EU-wide analysis // Transportation Research Part A № 69.– Elsevier, 2014.– P. 461 – 475.

10. Гавриленков, А. В. Теоретические основы проектирования скоростных и высокоскоростных железнодорожных магистралей: Монография [Текст] / А. В. Гавриленков / Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения. – Хабаровск, 2004. – 213 с.

11. Birge, J. Introduction to Stochastic Programming : Springer Series in Operations Research and Financial Engineering / J. Birge, Fr. Louveaux. – Springer, 2011. – 485 с.

References

1. Erofeev A. A., Kovtun P.V., Dubrovskaya T. A. Problems of increasing the speed of trains on existing railway lines [Problemy povysheniya skorosti dvizheniya poyezdov na sushchestvuyushchikh zheleznodorozhnykh liniyakh]. *Vestnik BelGUTa: nauka i transport – Bulletin of BelGUT*, 2018, no. 2 (37), pp. 57 – 59.

2. Kravchenya I. N., Rudenko T. A. Determination of optimal train speeds in curves with the introduction of high-speed traffic [Opredeleniye optimal'nykh skorostey dvizheniya poyezdov v krivykh pri vvedenii skorostnogo dvizheniya]. *Transport i transportnaya logistika: Byulleten' nauchnykh rabot Bryanskogo filiala MIIT – Transport and transport logistics: Bulletin of scientific works of the Bryansk branch of MIIT*, 2013, no. 2 (4), pp.15 – 17.

3. Kravchenya I. N., Dubrovskaya T. A. Determining the parameters of the reconstruction of the railway for high-speed traffic, taking into account the uncertainty [Opredeleniye parametrov rekonstruktsii zheleznoy dorogi dlya sko-rostnogo dvizheniya s uchetom neopredelennosti]. *Transport i transportnaya logistika: Byulleten' nauchnykh rabot Bryanskogo filiala MIIT – Transport and transport logistics: Bulletin of scientific works of the Bryansk branch of MIIT*, 2015, no. 1 (7), pp. 24 – 29.

4. Kravchenya I. N., Dubrovskaya T. A. Optimization of the cost of reconstruction of the railway line for high-speed traffic [Optimizatsiya zatrat na rekonstruktsiyu zheleznodorozhnoy linii

pod skorostnoye dvizheniye]. *Vestnik ekonomiki transporta i promyshlennosti – Bulletin of economy, transport and industry*, 2018, no. № 62 (Spetsvypusk), pp. 82 – 89.

5. Okulov S. M., Pestov O. A. Dinamicheskoye programmirovaniye [Dynamic programming]. Moscow: Beanom, 2012, 299 p.

6. Kravchenya I. N., Burduk E. L., Alymova T. V. Matematicheskoye modelirovaniye. Lineynoye i nelineynoye programmi-rovaniye, setevoye planirovaniye i upravleniye [Mathematical modeling. Linear and nonlinear programming, network planning and management]. Gomel: BelSUT, 2014, 112 p.

7. Kurgan D.N. *Metodologiya raschetov zheleznodorozhnoy kolei pri vzaimodeystvii so skorostnym podvizhnym sostavom* (Methodology of calculation of railway track when interacting with high-speed rolling stock). Author's abstract. on the competition scientific step. Ph.D., Dnepropetrovsk, 2017, 35 p.

8. Economic Analysis of High Speed Rail in Europe. Fundacion BBVA, 2009. [Electronic resource]. – Access mode: https://w3.grupobbva.com/ TLFU/dat/inf_web_economic_analysis.pdf. – Access Date: 15.04.2018.

9. Frédéric Dobruszkes, Catherine Dehon, Moshe Givoni Does European high-speed rail affect the current level of air services? An EU-wide analysis // Transportation Research Part A № 69.– Elsevier, 2014.– P.461 – 475.

10. Gavrilenkov A.V. Theoretical basis for the design of high-speed and high-speed railway lines: Monograph [Teoreticheskiye osnovy proyektirovaniya skorostnykh i vysokosko-rostnykh zheleznodorozhnykh magistraley: Monografiya]. Khabarovsk: DVGUPS Publishing House, 2004, 213 p.

11. John Birge, Francois Louveaux Vvedeniye v stokhasticheskoye programmirovaniye: seriya Springer v oblasti issledovaniya operatsiy i finansovogo inzhiniringa [Introduction to Stochastic Programming : Springer Series in Operations Research and Financial Engineering]. Springer, 2nd ed., 2011, 485 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кравченя Ирина Николаевна

Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ).

Кирова ул., д. 34, г. Гомель, 246031, Республика Беларусь.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление автомобильными перевозками и дорожным движением», БелГУТ.

Тел.: +37529 6207145.

E-mail: krav_2000@mail.ru

Дубровская Татьяна Алексеевна

Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ).

Кирова ул., д. 34, г. Гомель, 246031, Республика Беларусь.

Старший преподаватель кафедры «Проектирование, строительство и эксплуатация транспортных объектов», БелГУТ.

Тел.: +37544 5545253.

E-mail: rt-555@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kravchenya Irina Nikolaevna

Belarusian State University of Transport (BelSUT).

St. Kirova, 34, Gomel, 246031, Republic of Belarus.

Ph.D of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department "Management of automobile transportations and traffic" BelSUT.

Тел.: +37529 6207145.

E-mail: krav_2000@mail.ru

Dubrovskaya Tatyana Alekseevna

Belarusian State University of Transport (BelSUT).

St. Kirova, 34, Gomel, 246031, Republic of Belarus.

Senior Lecturer of the Department "Design, construction and operation of transport facilities" BelSUT.

Тел.: +37544 5545253.

E-mail: rt-555@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Кравченя, И. Н. Применение методов математического моделирования при проектировании реконструкции железнодорожного пути [Текст] / И. Н. Кравченя, Т. А. Дубровская // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019.– № 2 (38).– С. 109 – 116.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kravchenya I. N., Dubrovskaya T. A. Application of mathematical modeling methods when designing reconstruction of railway track. Journal of Transsib Railway Studies, 2019, vol. 2, no. 38, pp. 109 – 116 (In Russian).

УДК 519.876.5 : 629.4.083

Т. Б. Брылова[1], А. В. Кутышкин[2]

[1]Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация;
[2] Югорский государственный университет (ЮГУ), г. Ханты-Мансийск, Российская Федерация

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РЕМОНТА УЗЛОВ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Аннотация. *В статье рассматриваются вопросы имитационного моделирования технологических процессов ремонта узлов подвижного состава. Приведена модель технологического процесса ремонта тележки (мод. 18-100) полувагона в среде ARENA.*

Ключевые слова: *полувагон, технология, моделирование функционирования технологического процесса, многофазная система массового обслуживания (МФСМО), оценка эффективности использования ресурсов.*

Tatyana B. Brylova[1] , Andrey V. Kutyshkin[2]

[1]Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation;
[2]Yugra State University (YSU), Khanty-Mansiysk, the Russian Federation

SIMULATION MODELLING THE FUNCTIONING THE TECHNOLOGICAL PROCESSES OF ROLLING STOCK UNITS REPAIR

Abstract. *The article discusses issues of simulation modeling of technological processes of repair of rolling stock components. A model of the technological process of repairing a trolley (mod. 18-100) of a gondola car in an ARENA environment is given.*

Key words: *the car, technology, modeling of the operation of the process, multi-phase queuing system (MFSM), evaluation of the efficiency of resource use.*

Для моделирования технологических процессов (ТП) дискретного производства, к которым можно отнести и ТП ремонта узлов железнодорожного транспорта, как правило, используют аппарат теории динамических систем, методы теории массового обслуживания и стохастические методы событийного моделирования [1]. Технологические процессы ремонта подвижного состава (ТП РПС) так же, как и ТП дискретного производства, жестко структурированы и регламентированы в плане потребления различного рода ресурсов [2, 3]. К особенностям ТП ремонта узлов подвижного состава относится не только большое разнообразие видов выполняемых ремонтных работ (операций) с использованием соответствующего технологического оборудования, приспособлений и инструмента, но и то, что планировка ремонтных предприятий (ремонтных депо) стандартизирована и «опирается» на железнодорожный путь, который используется для перемещения ремонтируемых узлов между технологическими операциями (ТО), реализуемыми на определенных ремонтных позициях (поточный метод ремонта). Таким образом, ТП РПС линейны не только в плане последовательности выполняемых ТО, но и в плане ограничения по направлению перемещения ремонтируемого узла от операции к операции [4]. В указанной работе была предложена методика организации гибких ТП РПС, реализация которой возможна только при наличии нескольких железнодорожных путей, что позволяет формировать встречно-параллельные пути транспортирования ремонтируемых узлов подвижного состава между ремонтными позициями.

Альтернативным вариантом организации ремонта подвижного состава является стационарный метод, при котором весь комплекс ремонтных работ выполняется на одном рабочем месте. Вне этого места производятся только те операции, которые нуждаются в применении специального оборудования. Этот метод характеризуется низкой производительностью и вследствие этого большой продолжительностью ремонтного цикла.

В настоящее время происходит укрупнение вагоноремонтных предприятий (вагоноремонтных депо), а это обусловливает существенный рост объемов ремонтных работ для данных предприятий. Поэтому, несмотря на значительный накопленный опыт организации, реализации и управления ТП РПС, для решения ряда задач производственного менеджмента, по мнению авторов, целесообразно использовать имитационное моделирование функционирования этих технологических процессов.

К наиболее важным результатам в данной области, по мнению авторов, можно отнести следующее.

1. Вероятностную имитационную модель [4] в виде многофазной системы массового обслуживания, работа которой имитирует функционирование технологического процесса ремонта полувагона для нескольких вариантов его перемещения между ремонтными позициями. Каждая фаза данной системы представляет собой кусочно-линейный агрегат, моделирующий реализацию технологических операций на определенной ремонтной позиции. Для практического использования разработанной имитационной модели автором работы [4] было разработано программное обеспечение (ПО) на языке Visual Basic в среде Microsoft Visal Studio 2010. Использование данной модели позволяет получать количественные оценки достаточно широкого перечня показателей, характеризующих работу ремонтного депо и отдельных технологических процессов РПС, начиная от их пропускной способности и заканчивая оценками загруженности определенной ремонтной позиции.

2. Имитационную модель технологического процесса ремонта узлов подвижного состава на основе ориентированных патерновых сетей [5 – 7]. Данная модель реализует дискретно-событийный подход и представляет собой специальным образом структурированный ориентированный граф на основе паттернов (шаблонов). Формируя цепочки паттернов при построении этого графа, разработчик модели ТП РПС описывает взаимосвязанные технологические процессы ремонта рассматриваемого узла. Реализация данной модели была осуществлена в среде MatLab™ для цеха, осуществляющего ремонт тяговых электрических двигателей (ТЭД) [6]. Результатами моделирования являются оценки соответствия интервала моделирования (горизонт планирования работы ремонтного подразделения депо) значениям перечня показателей аналогичному, приведенному в работе [4].

Авторы данной статьи считают, что основным недостатком перечисленных выше имитационных моделей является их реализация, т. е. разработанное соответствующее ПО. Пользователям разработанных ПО, которые являются специалистами в предметной области, все-таки необходимо иметь достаточно высокий уровень подготовки в области определенных направлений развития имитационного моделирования и определенный уровень пользователя, например, пакета MatLab™. Кроме того, у потенциальных эксплуатантов ПО всегда возникают закономерные вопросы о сопровождении и последующей его модернизации, а также о возможности интеграции в действующие и развивающиеся системы автоматизированного управления производством. Перспективным направлением в области разработки подобного рода имитационных моделей [8, 9] является использование достаточно хорошо зарекомендовавших себя специализированных программных продуктов, например, такого как ARENA 15™ (Rockwell Software, USA) [8].

В данной работе представлена разработанная авторами в этой среде имитационная модель технологического процесса ремонта ответственного узла подвижного состава – тележки (мод. 18-100) полувагона, а также приведен анализ результатов моделирования функционирования данного технологического процесса. Выбор в качестве объекта моделирования данного ТП РПС обусловлен тем, что тележки данной модели составляют порядка 85 % грузового подвижного состава (ГПС) России [10]. Кроме того, запланирован рост ряда целевых эксплуатационных показателей грузовых вагонов: осевые нагрузки – до 27 – 30 тс, скорость – до 140 км/ч, наработки грузовых вагонов на отказ – на 30 – 40 % (Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г., утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 17.06.2008 № 877-р), что предопределяет повы-

шение требований к организации и эффективности ремонта как грузовых вагонов в целом, так и рассматриваемого узла в частности.

При разработке имитационной модели технологического процесса ремонта тележки (мод. 18-100) полувагона в среде ARENA [8] были приняты следующие допущения.

1. Функционирование рассматриваемого технологического процесса имитируется работой многофазной системы массового обслуживания.

2. Требованием на обслуживание (в терминах среды ARENA «entity» – сущность) в данной МФСМО является тележка, поступившая на ремонт.

3. Под обслуживанием требования будем понимать последовательное прохождение требования через все фазы МФСМО, т. е. последовательное прохождение тележки через все ремонтные позиции – технологические операции.

4. Обслуживание требования считается завершенным, если оно было последовательно обслужено во всех фазах МФСМО.

5. При обслуживании требования не возникают отказы, связанные как с выходом из строя технологического оборудования, инструмента и приспособлений, так и с возникновением отклонений от контролируемых при реализации ТО соответствующих показателей качества.

6. Время поступления требований в МФСМО известно и считается постоянным.

7. Время облуживания требования в каждой фазе МФСМО известно и считается постоянным.

8. Дисциплина ремонта (обслуживания) тележки (требования на обслуживание) – FIFO (First In – First Out).

9. Ожидание требования в очереди на обслуживание не ограничено как по времени ожидания, так и по длине очереди.

10. Под фазой данной МФСМО понимается технологическая операция, входящая в состав данного ТП.

11. При обслуживании требования в каждой фазе МФСМО расходуется единственный вид ресурса (Resource) – рабочий(-ие), выполняющий соответствующую технологическую операцию.

В таблице 1 приведена структура ТП (технологические операции и виды работ) ремонта тележки мод. 18-100 [2, 3], а также некоторые характеристики функциональных блоков/модулей ARENA типа Process, функционирование которых будет моделировать реализацию соответствующих технологических операций ТП.

1. Работы (операции) № 1, 4, 8, 9, 10, 18, т. е. операции транспортирования тележки и ее узлов выполняется одним рабочим – «Оператором_1».

2. Операции № 2, 3 выполняются рабочим – «Оператором_2».

3. Операции № 5 – 7 и № 19 – 22 выполняются либо одной группой рабочих (слесари механосборочных работ) – «Слесарь_3» (2 чел.), либо двумя группами рабочих: «Слесарь_3» (2 чел.) и «Слесарь_5» (2 чел.). Данная вариативность состава слесарей оказывает влияние на пропускную способность рассматриваемого ТП и является одним из объектов исследования при моделировании его функционирования.

4. Операции № 12, 15 – 17 выполняются одной группой рабочих (слесари механосборочных работ) – «Слесарь_4» (2 чел.).

5. Суммарное время операций с №1 по 10 – $T_{1.10}$ = 46,6 мин, а суммарное время операций с № 12 по 17 – $T_{12.17}$ = 53,49 мин, что говорит о возможном существовании «узкого места» (диспропорции пропускной способности) рассматриваемого технологического процесса.

Таблица 1 – Данные о технологическом процессе ремонта тележки мод. 18-100 [2, 3], адаптированные для построения его имитационной модели в среде ARENA

Номер работ ТО	Виды работ	Обозначение функционального блока ARENA, имитирующего работы ТО	Обозначение ресурса (Resource), используемого модулем Process	Общий доступный объем ресурса (Capacity Resource)/ Потребляемая величина ресурса модулем Process	Длительность работы T модуля Process (технологическое время), мин
1	Подать тележку в моечную машину	Process 1	Operator_1	1/1	2,2
2	Снять раму тележки с колесных пар, выкатить колесные пары из моечной камеры	Process 2	Operator_1	1/1	2,7
3	Обмыть раму тележки	Process 3	Operator_2	1/1	10,0
4	Переместить раму тележки на позицию разборки ТРП	Process 4	Operator_1	1/1	0,66
5	Разобрать тормозную рычажную передачу	Process 5	Slesar_3	2/2	7,83
6	Разобрать рессорно-пружинный комплект	Process 6	Slesar_3	2/2	4,35
7	Снять шкворень и вкладыши скользунов	Process 7	Slesar_3	2/2	1,5
8	Переместить раму тележки на позицию раздвижки	Process 8	Operator_1	1/1	0,66
9	Раздвинуть боковые рамы	Process 9	Operator_1	1/1	1,6
10	Перекантовать надрессорную балку	Process 10	Operator_1	1/1	1,5
11	Произвести магнитный контроль боковых рам и надрессорной балки	Process 11	Defectospist_1	1/1	12,5
12	Разделать трещину для заварки	Process 12	Slesar_5	2/1	3,33
13	Заварить трещину	Process 13	Svarshik_1	1/1	2,84
14	Наплавить челюстные проемы для букс	Process 14	Svarshik_1	1/1	15,8
15	Обработать сварной шов и места наплавки механически	Process 15	Slesar_5	1/1	15,3
16	Рассверлить отверстия в кронштейнах боковых рам, запрессовать втулки	Process 16	Slesar_5	2/2	13,09
17	Установить боковые рамы на надрессорную балку	Process 17	Slesar_5	2/2	3,13
18	Переместить раму тележки на позицию сборки	Process 18	Operator_1	1/1	0,66
19	Собрать тормозную рычажную передачу	Process 19	Slesar_4	2/2	7,08
20	Собрать рессорно-пружинный комплект	Process 20	Slesar_4	2/2	5,8
21	Установить раму на колесные пары	Process 21	Slesar_4	2/2	2,12
22	Поставить шкворень и вкладыши скользунов, смазать подпятник	Process 22	Slesar_4	2/2	6,0
23	Окрасить тележку	Process 23	Malyar_1	1/1	10,6
	Итого				129,93

Таким образом, можно сформулировать ряд задач, решение которых представляет интерес с точки зрения производственного менеджмента, т. е. организации и управления данным технологическим процессом.

1. Оценка пропускной способности рассматриваемого технологического процесса. Пропускную способность можно определить, опираясь на общее технологическое время (таблица 1). Однако наличие диспропорции пропускных способностей отдельных операций ТП (см. п. 5 таблицы 1) может снизить пропускную способность технологического процесса.

2. Оценка «загруженности» рабочих, реализующих операции (работы) данного ТП.

3. Оценка влияния количественного состава рабочих и их распределения по технологическим операциям и работам (Оператор_1, Слесарь_3, Слесарь_4) на их загруженность и пропускную способность ТП в целом.

4. Оценка необходимости организации межоперационных складов для временного хранения или аккумуляции ремонтируемого изделия.

Из-за ограничений по объему статьи на рисунке 1 представлена структурная модель рассматриваемого ТП совместно с визуализацией части результатов моделирования его функционирования в течение 420 мин, что соответствует среднему времени рабочей смены с учетом часового обеденного перерыва. Приведены результаты (см. рисунок 1) моделирования ТП ремонта тележки для ситуации, когда разборку и сборку тележки осуществляют одни и те же слесари («Slesar_3») и со сварщиком работают постоянно закрепленные слесари – «Slesar_5» (см. таблицу 1).

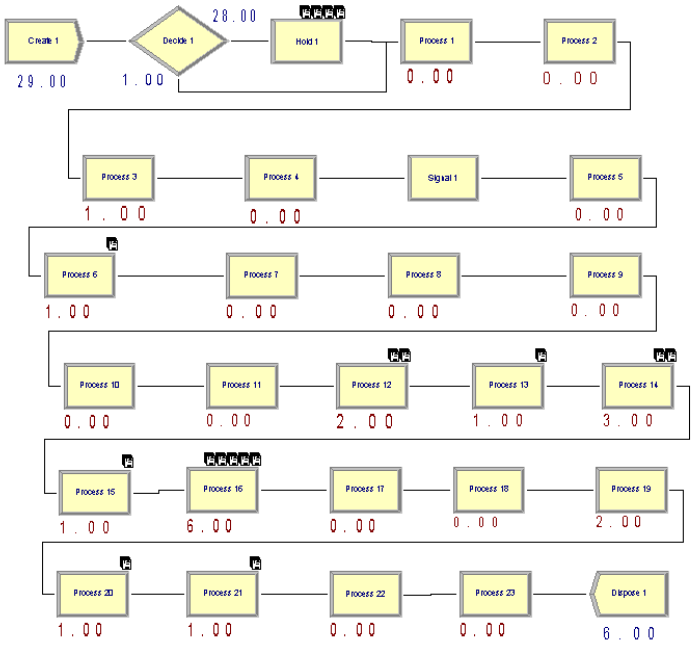


Рисунок 1 – Имитационная модель технологического процесса ремонта тележки (мод. 18-100) полувагона с результатами моделирования с использованием двух видов ресурсов: «Slesar_3», «Slesar_5»

Стикеры (ярлыки) над модулями типа Process показывают, сколько требований находится в очереди на обслуживание этими модулями, т. е. это количество тележек, ожидающих обработки на соответствующих ТО на момент завершения временного интервала моделирования, т. е. на конец смены. Цифровая индикация под каждым модулем предназначена для онлайн-фиксации количества требований, обслуживаемых модулем типа Process, на момент завершения процесса моделирования, что соответствует количеству тележек, обработка которых не завершена в этот момент времени на соответствующей этому модулю ТО.

Также из-за ограничения по объему статьи авторами не приводятся настройки функциональных модулей типа разработанной модели. Вместе с тем следует отметить, что поскольку системы массового обслуживания из-за характера перемещения в них требований в первом приближении можно рассматривать как вид потоковых моделей, то функциональный модуль Create является своего рода «истоком» и предназначен для описания дисциплины поступления требований в модель. Модуль Dispose выступает в роли «стока»

и предназначен для накопления требований, обработанных/обслуженных функциональными блоками модели.

Связка функциональных модулей «Deside_1», «Hold_1», «Signal_1» [8] предназначена для имитации работы склада тележек, которые направлены для ремонта. Это обусловлено тем, что в модулях Create необходимо задать дисциплину поступления требований в модели ARENA, которая характеризуется интервалом времени между поступлением требований и количеством требований, поступающим в течение этого интервала времени. Оценку значения интервала времени между поступлением требований в модель, как правило, осуществляют на основе статистической обработки ретроспективных данных о функционировании технологического процесса. Авторы в полном объеме такими данными не располагали, поэтому была сформирована указанная последовательность функциональных модулей, которая обеспечивает подачу в модель только одного требования после того, когда предыдущее требование пройдет через модуль «Signal_1», что означает поступление тележки на начальную операцию ее разборки, т. е. на операцию № 5 (см. таблицу 1). Если известно количество тележек, которое направлено на ремонт, т. е. известен план по ремонту данного узла, то эта величина может быть задана в явном виде в модуле «Create_1».

На рисунке 2 в свою очередь представлены результаты ТП ремонта тележки для ситуации, когда разборку тележки выполняют закрепленные слесари («Slesar_3»), со сварщиком работают также постоянно закрепленные слесари – «Slesar_5», а сборку осуществляют 1 закрепленные слесари («Slesar_4») (см. таблицу 1).

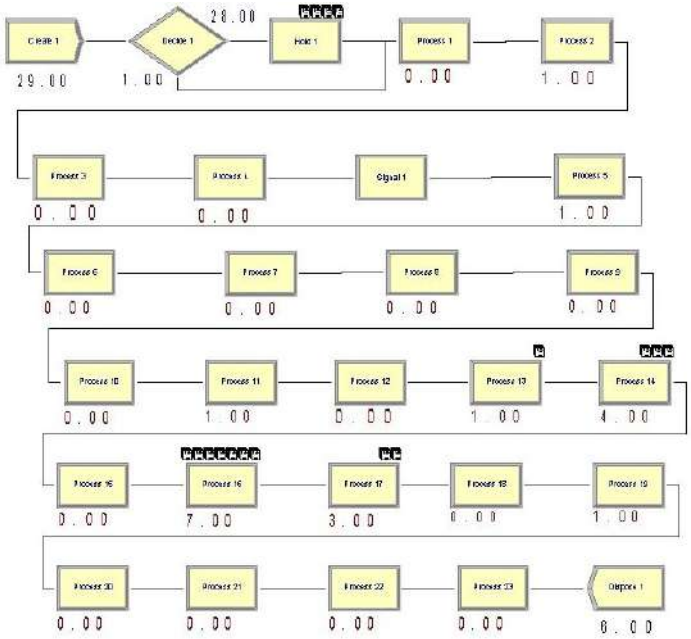


Рисунок 2 – Результаты моделирования функционирования ТП ремонта тележки (мод. 18-100) полувагона с использованием трех видов ресурсов: «Slesar_3», «Slesar_4», «Slesar_5»

Сравнение визуализированной части результатов моделирования функционирования ТП (см. рисунки 1, 2) позволяет сделать вывод о том, что использование постоянно закрепленных на ремонтных позициях трех групп слесарей – «Slesar_3», «Slesar_5» и «Slesar_4» – не увеличивает его пропускную способность в целом, но снижает объемы незавершенного производства на его отдельных ТО.

Вместе с тем следует отметить, что такое увеличение численности рабочих (слесарей) возможно при отсутствии бюджетных ограничений.

Непосредственно же пропускная способность рассматриваемого ТП для обоих рассмотренных вариантов состава рабочих составляет шесть отремонтированных тележек, что несколько больше, нежели оценка данного показателя, получаемая на основе технологического времени, равного 129, 93 мин (см. таблицу 1). И как отмечалось выше, для обоих рассмот-

ренных вариантов состава рабочих присутствуют объемы незавершенного производства на ряде технологических операций, что отражено наличием очередей требований на схемах рисунков 1 и 2. Полученные результаты моделирования позволяют сделать заключение о целесообразности организации межоперационного склада перед ремонтной позицией, где выполняется комплекс ремонтно-восстановительных операций, в том числе «Разделать трещину для заварки» (Process_12), «Наплавить челюстные проемы для букс» (Process_14), «Отверстия в кронштейнах боковых рам рассверлить, втулки запрессовать» (Process_16). Это иллюстрируется наличием очередей требований перед данными операциями (см. рисунки 1, 2).

Оценка загруженности рабочих – ресурсов (Recourse) (см. таблицу 1) осуществляется на основе результатов моделирования (см. таблицу 2), характеризующих их использование модулями типа Process. В данной таблице представлены расчетные значения этих оценок для обоих вариантов состава рабочих, участвующих в реализации рассматриваемого ТП.

Данные таблицы 2 показывают, что для обоих вариантов состава рабочих, участвующих в реализации рассматриваемого ТП, наиболее загруженными по показателю Num Busy являются ресурсы «Slesar_3» и «Slesar_5». Для варианта, когда сборку отремонтированной тележки осуществляет отдельно закрепленная группа слесарей – ресурс «Slesar_4», удельная загрузка ресурса «Slesar_3» снижается почти на 25 % (см. значения Num Seized).

Вместе с тем пропускная способность технологического процесса не увеличивается (см. рисунки 1, 2). Вторым по уровню загруженности является ресурс «Operator_1» (см. значения Num Seized), причем его величина мало меняется в зависимости от обоих вариантов состава рабочих. Самая низкая загруженность у ресурсов «Malyar_1» и «Defectoscopist_1», что обусловлено спецификой реализации соответствующих технологических операций.

Таблица 2 – Загруженность рабочих (ресурсов), реализующих технологические операции ТП ремонта тележки (мод. 18-100) полувагона в течение смены

Ресурс (Resourse)	Num Busy*		Num Seized**	
	использование двух видов ресурсов: «Slesar_3», «Slesar_5»	использование трех видов ресурсов: «Slesar_3», «Slesar_4», «Slesar_5»	использование двух видов ресурсов: «Slesar_3», «Slesar_5»	использование трех видов ресурсов: «Slesar_3», «Slesar_4», «Slesar_5»
Defectoscopist_1	0,68	0,66	23,00	23,00
Malyar_1	0,15	0,15	6,00	6,00
Operator_1	0,39	0,39	128,00	125,00
Operator_2	0,75	0,73	50,00	49,00
Slesar_3	2,27	1,52	198,00	140,00
Slesar_5	1,58	1,54	79,00	75,00
Svarchik_1	0,81	0,81	38,00	39,00
Slesar_4	-	0,60		50,00

* Num Busy (Total Number Busy) – показатель, характеризующий среднюю удельную загруженность ресурса за время моделирования [8].

** Num Seized (Total Number Seized) – показатель, характеризующий общее число единиц ресурса (Resourse), которые были задействованы за время моделирования [8], т. е. это общее количество выполненных операций с использованием соответствующего ресурса за все время моделирования.

В таблице 3 приведены упорядоченные по возрастанию значения показателей, характеризующих интервалы времени работы и ожидания/простоя функциональных модулей Process разработанной модели за весь период времени моделирования рассматриваемого ТП.

Данные таблицы 3 показывают, что по показателю NVA Time наибольшее количество времени «работают» функциональные блоки «Process 6», «Process 5», «Process 3», «Process 15», «Process 14», «Process 11», имитирующие операции разборки-сборки, выявления дефекта тележки и его ремонта.

Таблица 3 – Загруженность операций ТП ремонта тележки (мод. 18-100) полувагона в течение смены

NVA Time*, мин				Wait Time**, мин			
Использование двух видов ресурсов: «Slesar_3», «Slesar_5»		Использование трех видов ресурсов: «Slesar_3», «Slesar_4», «Slesar_5»		Использование двух видов ресурсов: «Slesar_3», «Slesar_5»		Использование трех видов ресурсов: «Slesar_3», «Slesar_4», «Slesar_5»	
Process 18	6,60	Process 18	4,62	Process 2	0,00	Process 2	0,00
Process 21	12,72	Process 21	12,72	Process 3	0,00	Process 3	0,00
Process 8	15,18	Process 8	15,18	Process 9	0,00	Process 5	0,00
Process 4	15,84	Process 4	15,84	Process 18	4,19	Process 6	0,00
Process 17	31,30	Process 17	21,91	Process 8	5,25	Process 7	0,00
Process 7	34,50	Process 7	34,50	Process 10	6,60	Process 8	0,00
Process 10	34,50	Process 10	34,50	Process 19	7,98	Process 9	0,00
Process 22	36,00	Process 20	34,80	Process 1	14,16	Process 11	0,00
Process 9	38,18	Process 22	36,00	Process 7	16,07	Process 18	3,54
Process 20	40,60	Process 9	38,18	Process 4	18,30	Process 10	7,92
Process 1	55,00	Process 19	42,48	Process 6	19,26	Process 1	18,00
Process 19	56,64	Process 1	55,00	Process 21	22,97	Process 23	18,40
Process 13	56,80	Process 13	59,64	Process 5	23,55	Process 19	18,80
Process 23	63,60	Process 23	63,60	Process 22	23,72	Process 4	25,30
Process 2	67,50	Process 2	64,80	Process 23	26,04	Process 21	31,68
Process 12	70,35	Process 12	73,70	Process 20	28,33	Process 22	32,48
Process 6	100,05	Process 6	100,05	Process 11	34,09	Process 20	51,52
Process 16	130,90	Process 16	130,90	Process 14	61,60	Process 14	93,20
Process 5	187,92	Process 5	180,09	Process 13	130,42	Process 13	165,01
Process 3	240,00	Process 3	240,00	Process 12	284,41	Process 12	285,51
Process 15	244,80	Process 15	260,10	Process 16	304,80	Process 16	301,45
Process 14	268,60	Process 14	268,60	Process 15	330,37	Process 15	331,42
Process 11	287,50	Process 11	275,00	Process 17	622,16	Process 17	403,90

* NVA Time (Non-value added time) - показатель характеризует время, которое работает процесс за время моделирования [8].

** Wait Time – показатель характеризует накапливаемое требованием время ожидания/задержки, когда оно обслуживается процессом, находится в очереди перед ним до тех пор, пока не поступит на обслуживание в этот функциональный модуль [8].

Данная ситуация характерна для обоих вариантов состава рабочих. По показателю Wait Time его наибольшие значения для обоих вариантов состава рабочих соответствуют операциям непосредственно устранения выявленного дефекта, что подтверждает сделанный ранее вывод о целесообразности формирования межоперационного склада перед ремонтной позицией, где реализуются данные ТО. Альтернативным вариантом «расшивки узкого места» рассматриваемого ТП может быть организация дублирующей ремонтной позиции. Следует также отметить положительное влияние на снижение значений показателя Wait Time варианта состава рабочих, в котором присутствует группа слесарей – ресурс «Slesar_4», закрепленных за операциями сборки тележки. Так, для ряда ТО, включая и операцию выявления дефектов, величина Wait Time стала равной нулю, т. е. перед этими операциями очереди не образовывались и тележка при достижении данных операций сразу поступала на обработку.

Использование имитационного моделирования функционирования организационно-технических систем, к которым относятся и технологические процессы дискретного производства, в том числе ТП ремонта узлов железнодорожного транспорта, позволяет решать достаточно актуальные задачи производственного менеджмента, связанные с анализом их функционирования и оценки эффективности использования ресурсов различного типа.

Результаты моделирования, рассмотренного в статье ТП ремонта одного из важных узлов подвижного состава позволили получить оценки:

пропускной способности этого ТП с учетом состава и распределения ресурсов (рабочих) по его технологическим операциям;

загруженности данных операций и соответствующих ресурсов в течение фиксированного промежутка времени – рабочей смены;

влияния диспропорций между производительностью операций ТП на их загруженность;

целесообразности организации межоперационных складов незавершенного производства.

Следует также отметить, что решение подобного рода задач производственного менеджмента на основе использования специализированных CASE-средств имитационного моделирования не только значительно упрощается, обеспечивая снижение сопутствующих издержек, но позволяет в более сжатые сроки проводить разноплановый анализ функционирования моделируемых технологических систем и процессов как на стадии их проектирования, так и при их сопровождении в рамках действующего производства.

Список литературы

1. Мальков, М. В. Моделирование технологических процессов: методы и опыт [Текст] / М. В. Мальков, А. Г. Олейник, А. М. Федоров // Труды Кольского научного центра РАН. – Апатиты. – 2010. – № 3. – С. 93 – 101.

2. РД 32 ЦВ 052-2009. Руководящий документ. Ремонт тележек грузовых вагонов с бесконтактными скользунами [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://pkbcv.ru/docs/metodicheskie-i-rukovodyashchie-dokumenty.php (Дата обращения: 17.06.2019).

3. РД 587-2010. Руководство по деповскому ремонту «Грузовые вагоны железных дорог колеи 1520 мм» [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://pkbcv.ru/docs/metodicheskie-i-rukovodyashchie-dokumenty.php (Дата обращения: 17.06.2019).

4. Мямлин, В. В. Теоретические основы создания гибких поточных производств для ремонта подвижного состава [Текст] / В. В. Мямлин. – Днепропетровск: Стандарт-Сервис. – 2014. – 380 с.

5. Смирнов, В. А. Имитационное моделирование технологических процессов предприятий транспортного машиностроения [Текст] / В. А. Смирнов, А. М. Семенов // Вестник Ростовского гос. ун-та путей сообщения / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. – Ростов-на-Дону. – 2012. – № 2 (46). – С. 67 – 74.

6. Смирнов, В. А. Оценка производственно-технологических параметров предприятий по ремонту подвижного состава методами математического моделирования [Текст] / В. А. Смирнов, А. М. Семенов // Вестник Ростовского гос. ун-та путей сообщения. – Ростов-на-Дону. – 2012. – № 4 (48). – С. 45 – 53.

7. Смирнов, В. А. Модульный принцип моделирования ремонта ПС [Текст] / В. А. Смирнов, А. М. Семенов // Мир транспорта. – 2012. – № 3. – С. 158 – 163.

8. Kelton, W. D. Simulation with Arena 5th Edition [Text] / W. D. Kelton, R. P. Sadowski, N. B. Swets // Rockwell Automation McGraw-Hill. – 2010. – 656 p.

9. Высочина, О. С. Моделирование производственных процессов на промышленном предприятии при помощи системы имитационного моделирования ARENA [Текст] / О. С. Высочина, В. Н. Данич, В. П. Пархоменко // Вестник Запорожского национ. техн. ун-та / Запорожский наццион. техн. ун-т. – Запорожье. – 2012. – № 1. – С. 82 – 85.

10. Донцов, С. А. Ресурсы безопасности грузового подвижного состава [Текст] / С. А. Донцов // Мир транспорта. – 2012. – № 4. – С. 134 – 141.

References

1. Mal'kov M. V., Oleinik A. G., Fedorov A. M. Modeling of technological processes: methods and experience [Modelirovanie tekhnologicheskih processov: metody i opyt]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN – Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2010, no. 3, pp. 93 – 101.

2. *RD 32 CV 052-2009. Rukovodyashchij dokument. Remont telezhek gruzovyh vagonov s beskontaktnymi skol'zunami* (RD 32 CV 052-2009. Guidance document. Repair of trucks of freight cars with contactless side bearings) / Access mode: http://www.vagonnik.rf/2018/01/64-67.html, http://pkbcv.ru/docs/metodicheskie-i-rukovodyashchie-dokumenty.php (Access date: 17.06.2019).

3. *RD 587-2010. Rukovodstvo po depovskomu remontu «Gruzovye vagony zheleznyh dorog kolei 1520 mm»* (RD 587-2010. Depot repair manual "Freight wagons of 1520 mm gauge railways) / Access mode: http://pkbcv.ru/docs/metodicheskie-i-rukovodyashchie-dokumenty.php. (Access date: 17.06.2019).

4. Myamlin V. V. *Teoreticheskie osnovy sozdaniya gibkih potochnyh proizvodstv dlya remonta podvizhnogo sostava* (The theoretical basis for the creation of flexible flow production for the repair of rolling stock). Dnepropetrovsk: Standard-Service, 2014. 380 p.

5. Smirnov V. A. Evaluation of production and technological parameters of enterprises for the repair of rolling stock by methods of mathematical modeling [Imitacionnoe modelirovanie tekhnologicheskih processov predpriyatij transportnogo mashinostroeniya]. *Vestnik Rostovskogo gos. un-ta putej soobshcheniya – Bulletin of the Rostov State University of Communications*, 2012, no. 2 (46), pp. 67 – 74.

6. Smirnov V. A., Semenov A. M. Evaluation of production and technological parameters of enterprises for the repair of rolling stock by methods of mathematical modeling [Ocenka proizvodstvenno-tekhnologicheskih parametrov predpriyatij po remontu podvizhnogo sostava metodami matematicheskogo modelirovaniya]. *Vestnik Rostovskogo gos. un-ta putej soobshcheniya – Bulletin of the Rostov State University of Communications*, 2012, no. 4 (48), pp. 45 – 53.

7. Smirnov V. A., Semenov A. M. The modular principle of simulation of repair of substations [Modul'nyj princip modelirovaniya remonta PS]. *Mir transporta – World of Transport*, 2012, no. 3, pp. 158 – 163.

8. Kelton, W. D. Simulation with Arena 5th Edition [Text] / W. D. Kelton, R. P. Sadowski, N. B. Swets // Rockwell Automation McGraw-Hill. – 2010. – 656 p.

9. Vysochina O. S., Danich V. N., Parkhomenko V. P. Modeling of production processes at an industrial enterprise using the simulation system ARENA [Modelirovanie proizvodstvennyh processov na promyshlennom predpriyatii pri pomoshchi sistemy imitacionnogo modelirovaniya ARENA]. *Vestnik Zaporozhskogo nacional'nogo tekh. un-ta. – Bulletin of Zaporizhzhya National Technical University*, 2012, no. 1, pp. 82 – 85.

10. Dontsov S. A. Safety resources for freight rolling stock [Resursy bezopasnosti gruzovogo podvizhnogo sostava]. *Mir transporta – World of Transport*, 2012, no. 4, pp. 134 – 141.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Брылова Татьяна Борисовна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-72.

E-mail: biser65@mail.ru

Кутышкин Андрей Валентинович

Югорский государственный университет (ЮГУ).

Чехова ул., д. 16, г. Ханты-Мансийск, 628012, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор Института цифровой экономики, ЮГУ.

Тел.: +7 (919) 534-11-42, (3467) 35-77-15, 35-75-38.

E-mail: avk_200761@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Brylova Tatyana Borisovna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering Sciences, Associate Professor of the department « Carriages and wagon economy», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-72.

E-mail: biser65@mail.ru

Kutyshkin Andrey Valentinovich

Ygra State University (YSU).

Chekhov st., h. 16, Khanty-Mansiysk, 628012, Russian Federation. Tel .: +7 (919) 534-11-42

Advanced Doctor of Engineering Sciences, Professor at the Institute of digital Economics, YGU

Phones: +7 (919) 534-11-42, (3467)35-77-15, 35-75-38

E-mail: avk_200761@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Брылова, Т. Б. Имитационное моделирование функционирования технологических процессов ремонта узлов подвижного состава [Текст] / Т. Б. Брылова, А. В. Кутышкин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 2 (38). – С. 117 – 127.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Brylova T. B., Kutyshkin A .V. Simulation modelling the functioning thr technological processes of rolling stock units repair . Journal of Transsib Railway Studies, 2019, vol. 2, no. 38, pp. 117 – 127 (In Russian).

УДК 697.329

И. И. Кадцын, О. В. Хороших, В. Ф. Кузнецов
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ ГЛУБИНЫ ОДНОСКВАЖИННОГО КОАКСИАЛЬНОГО ГЕОТЕРМАЛЬНОГО КОЛЛЕКТОРА

Аннотация. *В статье описаны актуальность использования источников низкопотенциальной вторичной тепловой энергии и разработанная методика расчета зависимости температуры пропиленгликоля от глубины односкважинного коаксиального коллектора при неизменных значениях параметров геотермальной скважины. Предложенная методика расчета геотермального коллектора позволяет определить оптимальную глубину скважины, при которой увеличение температуры пропиленгликоля в практическом отношении не меняется, соответственно дальнейшее выполнение буровых работ становится экономически неэффективным.*

Ключевые слова: *низкопотенциальная энергия, грунтовая скважина, коаксиальность, теплообменник, коллектор.*

Ivan I. Kadtcyn, Ol'ga V. Khoroshikh, Viktor F. Kuznetsov
Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

METHOD OF DETERMINING THE OPTIMAL DEPTH OF SINGLE WELL COAXIAL GEOTHERMAL MANIFOLD

Abstract. *The article presents the relevance of the use of sources of low-potential, secondary thermal energy, as well as a method for calculating the dependence of the propylene glycol temperature on the depth of a single-well coaxial collector, with constant values of the parameters of the geothermal well. The proposed methodology of the geothermal reservoir, allows to determine the optimal depth of the well, in which the increase in the temperature of propylene glycol in practical terms does not change, respectively, further drilling becomes economically inefficient.*

Keywords: *low-potential energy, underground well, coax, heat exchanger, collector.*

В настоящее время приоритетными направлениями развития энергетики в России являются энергосбережение и эффективное использование топливно-энергетических ресурсов. Потребность в эффективности вызвана необходимостью снижения эксплуатационных затрат на отопление зданий и сооружений, уменьшение истощения природных ресурсов экосистем (природного капитала), обострение экологических проблем в крупных промышленно-урбанизированных городских территориях.

Автономные объекты железнодорожной инфраструктуры (посты дежурных по переезду, стрелочные посты, посты охраны, пункты обогрева стационарного или модульного типа и прочие здания и сооружения, входящие в структуру ОАО «РЖД») подключены только к инженерным сетям энергообеспечения вследствие большого расстояния от населенных пунктов. Указанные объекты имеют высокие эксплуатационные затраты на системы отопления, горячего водоснабжения и электроснабжение.

Применение современных материалов и технологий позволяет существенно снизить содержание (эксплуатацию) и повысить энергетическую эффективность объектов капитального строительства [2, 3]. Внедрение существующей низкопотенциальной тепловой энергии грунта,

воздуха, воды, хозяйственно-бытовых стоков, шахтных вод, промышленных сбросов и многого другого является одним из наиболее актуальных малоиспользуемых источников тепловой энергии, преобразование которой позволяет без изменения (реконструкции) существующей инженерной инфраструктуры отапливать новые промышленные, административные, жилые объекты, не используя дополнительные топливно-энергетические ресурсы.

В качестве низкотемпературных источников тепла могут использоваться [1, 6]:

а) повторные (побочные) энергетические ресурсы:

– тепло вентиляционных выбросов;

– тепло канализационных стоков;

– сбрасываемая теплота технологических процессов (пар, вода) и пр.;

б) нетрадиционные возобновляемые источники энергии:

– тепло окружающего воздуха;

– тепло грунтовых и геотермальных вод;

– теплота водоемов и природных водных потоков;

– теплота солнечной энергии и т. п.;

– теплота поверхностных и более глубоких слоев грунта.

Тепловой насос повышает температуру нагретого теплоносителя до нужного уровня температуры воздуха в соответствии с нормативными требованиями [7, 9, 10]. Существенным преимуществом применения геотермальной энергии является возможность использования системы в качестве отопления и структуры кондиционирования помещений всех типов зданий.

Рабочий цикл теплового насоса представлен на рисунке 1, он заключается в следующем: жидкий хладагент поступает в испаритель, где переходит в газообразное состояние. Необходимая для протекания этого процесса энергия отбирается у теплоносителя, циркулирующего в первом контуре. Далее подогретый на несколько градусов газообразный хладагент всасывается в компрессор, главное назначение которого – сжатие газа (на совершение текущей работы расходуется электроэнергия). Давление газа возрастает в несколько раз, при этом он существенно разогревается, например, если на входе в компрессор температура хладагента 6 – 10 °С, то на выходе она будет примерно около 50 °С. На следующей стадии разогретый газ направляется в конденсатор, где отдает полученное тепло системе отопления, сам же при этом конденсируется, т. е. переходит в жидкое состояние. Затем избыточное давление сбрасывается с помощью дроссельного клапана и цикл начинается заново.

В качестве основного показателя результативности теплового насоса используется коэффициент преобразования COP, равный отношению теплопроизводительности теплового насоса к мощности, потребляемой компрессором. В среднем (на основании анализа эксплуатируемого оборудования) эффективность работы такова: на 1 кВт затраченной электроэнергии можно получить 4 – 4,2 кВт тепла. Для оценки эффективности режима охлаждения применяется холодильный коэффициент EER, равный отношению холодопроизводительности теплового насоса к мощности, потребляемой компрессором.

Высокий рост популярности тепловые насосы получили во многом из-за того, что тепловая энергия получается непосредственно на месте установки оборудования. При высокой экологичности рассматриваемые технологические решения обладают высокой степенью пожаро- и взрывобезопасности, так как отсутствуют процессы горения топлива и выбросы продуктов сгорания.

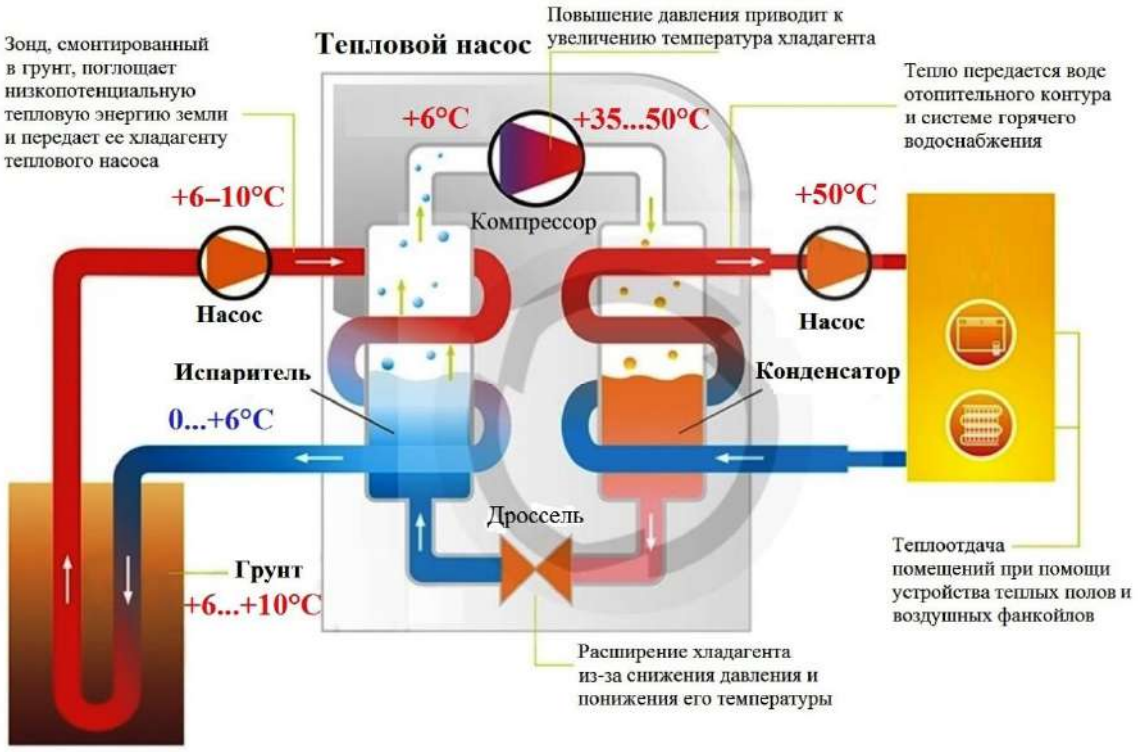


Рисунок 1 – План-схема рабочего цикла теплового насоса

В сравнении с централизованными системами теплоснабжения при строительстве геотермального отопления исключаются проектно-изыскательские работы по созданию протяженных тепловых сетей до потребителя, источник теплоснабжения располагается непосредственно на месте или в близком расположении от потребителя.

За последние годы в нашей стране значительно вырос интерес к использованию тепловых насосов, однако количество реализованных проектов невелико, что объясняется целым рядом климатических [8], социально-экономических и технологических особенностей их применения.

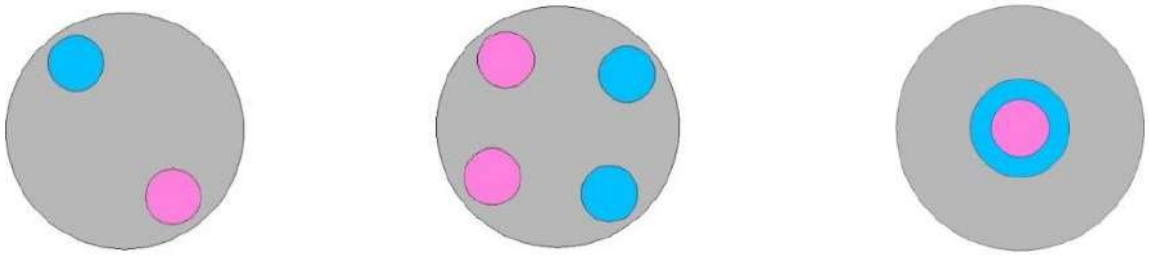
Преимущественно распространенными типами использования низкопотенциальной энергии земли являются технические решения с устройством вертикальных зондов. Наиболее высокий процент внедрения получили коллекторы, которые используют от двух и более грунтовых скважин (административные, промышленные объекты капитального строительства общей площадью более 50 м^2). Устройство подключения к тепловому насосу с одной грунтовой скважиной в большей степени применяется на объектах индивидуальной жилой застройки, имеющей малую площадь (до 50 м^2).

Необходимая длина скважины рассчитывается по основным критериям:

1) площадь объекта капитального строительства;
2) площадь ограждающих конструкций;
3) класс энергоэффективности объекта капитального строительства (при новом строительстве, реконструкции, капитальном ремонте);
4) температура низкопотенциального источника (грунта, грунтовых вод);
5) климатический район объекта капитального строительства [8];
6) наличие межпластовых вод;
7) наличие термального источника.

Преимущественное применение получили три основные конструкции коллекторов вертикального типа, представленные на рисунке 2.

Коаксиальность – это соосное положение тел в пространстве (имеют общую ось вращения), при котором один из элементов расположен внутри другого.



а б в

Рисунок 2 – Примеры вертикальных коллекторов в поперечном разрезе:
а – одиночный U-образный коллектор; б – сдвоенный U-образный коллектор; в – коаксиальный коллектор

В такой схеме наружная труба используется в виде нагревающего контура, внутренняя – для передачи нагретого источника низкопотенциальной тепловой энергии в контур системы отопления. После охлаждения пропиленгликоль по кольцевой схеме уходит в наружный контур геотермальной скважины. В рассматриваемой системе нагретый пропиленгликоль во внутренней трубе при движении будет остывать от наружного нагреваемого контура. Для уменьшения снижения нагретого источника необходимо на этапе монтажных работ выполнить теплоизоляцию внутренней трубы.

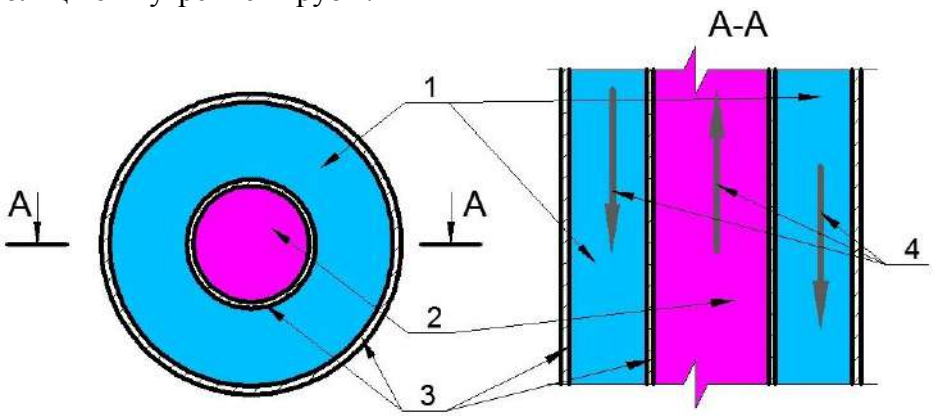


Рисунок 3 – Схема поперечного разреза коаксиального коллектора:
1 – нагреваемый пропиленгликоль в низкопотенциальном тепловом контуре грунта; 2 – нагретый пропиленгликоль; 3 – коллекторные трубы; 4 – направление движения пропиленгликоля

При движении пропиленгликоля в трубе ее нагрев за счет теплообмена с низкопотенциальным тепловым полем грунта в значительной степени зависит от распределения температуры почвы по глубине скважины и от скорости движения пропиленгликоля в трубе.

Для получения математической модели нагрева пропиленгликоля воспользуемся решением уравнения теплопроводности для нагрева точек полупространства от сосредоточенного источника тепловой энергии, расположенной на поверхности [4]:

$$\mathrm{T}(\mathrm{R},t)=\frac{Q}{c\gamma\left(4\pi at\right)^{\frac{3}{2}}}\mathrm{e}^{\frac{-\mathrm{R}^2}{4at}}+\mathrm{T}_0, \quad (1)$$

где R – расстояние от источника тепла до произвольной точки тела; Q – количество тепла, сосредоточенное в источнике энергии; t – время с начала процесса нагрева; T_0 – начальная температура нагреваемой среды (пропиленгликоля).

Коэффициент температуропроводности a (м^2/с) представляет собой плотность теплового потока при единичном температурном градиенте, отнесенную к плотности вещества и к его

теплоемкости, соответственно этот показатель пропорционален скорости изменения температуры или скорости распространения изотермической поверхности в теле:

$$a = \frac{\lambda}{c\gamma}, \tag{2}$$

где λ – теплопроводность; c – теплоемкость; γ – плотность среды.

При нагреве пропиленгликоля, движущегося в цилиндрической трубе, задача будет осесимметричной и ее можно свести к нагреву пластины (рисунок 4) с распределенным по ее грани источником тепловой энергии. Эту зависимость можно аппроксимировать формулой:

$$T_{гр} = \left(T_{гр0} - T_{ск}\right) e^{-bz^2} + T_{ск}, \tag{3}$$

где $T_{гр0}$ – температура грунта в точке (глубине) промерзания; $T_{ск}$ – температура грунта на дне скважины.

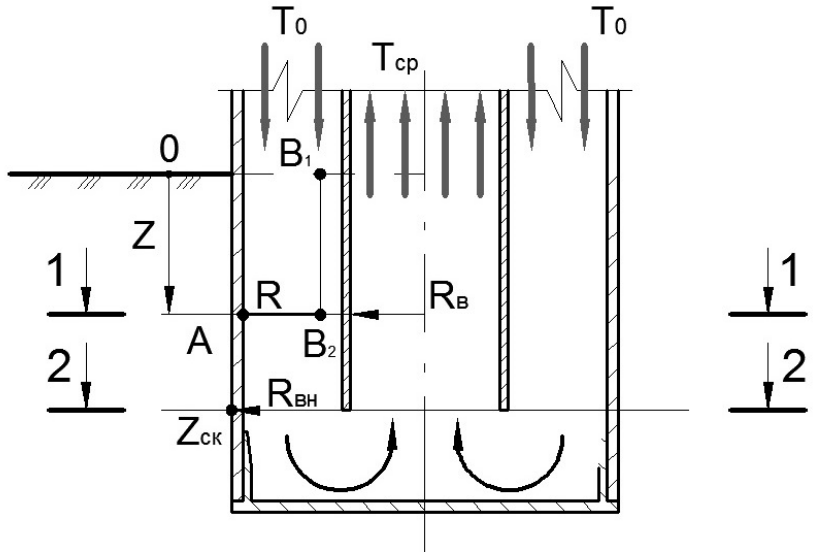


Рисунок 4 – Схема движения пропиленгликоля в скважине: T_0 – начальная температура нагреваемой среды (пропиленгликоля); $T_{ср}$ – температура нагретого пропиленгликоля; Z – расстояние от точки А до поверхности грунта; $Z_{скв}$ – глубина скважины; R – расстояние от источника тепла до произвольной точки тела; $R_{вн}$ – внутренний радиус наружной трубы; $R_в$ – внутренний радиус внутренней трубы; B_1 – начальная точка нагреваемого элемента; B_2 – конечная точка элемента через пройденное время t

Температуру трубы в точке А принимаем равной температуре грунта $T_{гр}$ в этой точке, которая зависит от расстояния *Z*.

Качественный график зависимости температуры грунта от глубины Z скважины представлен на рисунке 5, он получен непосредственно при бурении разведочной скважины. Значения температуры по глубине грунта определяются непосредственными замерами при выполнении разведочной скважины.

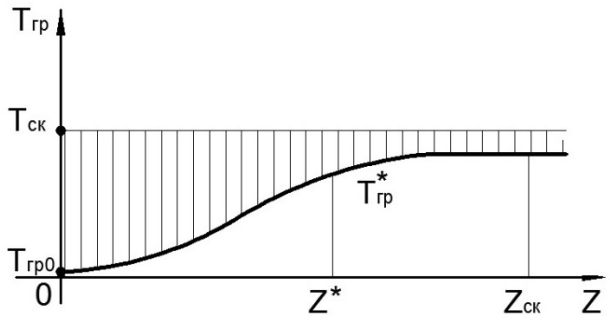


Рисунок 5 - График распределения температуры грунта по глубине:
$T_{гр}$ – температура грунта; $T_{ск}$ – температура грунта на дне скважины; $T_{гро}$ – температура грунта в точке (глубине) промерзания; Z – глубина грунта; $Z_{ск}$ – глубина скважины

Формула (3) является аппроксимирующей для графика, представленного на рисунке 5. Все факторы, влияющие на распределение температуры учтены, так как произведены инструментальные замеры во время геологической разведки.

Для определения коэффициента b в формуле (3) замеряем температуру грунта $T^*_{гр}$ на глубине Z^* промерзания грунта:

$$b = \frac{1}{\left(Z^*\right)^2} ln\left(\frac{T_{20} - T_{ск}}{T^*_{гр} - T_{ск}}\right). \tag{4}$$

Нагрев пропиленгликоля в точке B_2 сечения А – А происходит по закону

$$T\left(R,t\right) = \frac{T_{гр}}{\left(4\pi at\right)^{\frac{3}{2}}} e^{-\frac{R^2}{4at}} + T_0, \tag{5}$$

где T_0 – начальная температура пропиленгликоля.

В точку B_2 элемент пропиленгликоля, расположенный в точке B_1, попадает через время

$$t = \frac{z_{в2}}{v}, \tag{6}$$

где v – скорость движения пропиленгликоля в трубе скважины.

Подставляя t в формулу (5), получаем формулу для расчета температуры в произвольной точке B_2 (R, Z) потока пропиленгликоля в трубе:

$$T\left(R,Z\right) = \frac{T_{гр}(z)}{\left(\frac{4paz}{v}\right)^{\frac{3}{2}}} e^{-\frac{R^2 v}{4az}} + T_0. \tag{7}$$

Формула (5) позволяет исследовать зависимость температуры теплоносителя, поступающего в теплообменник, от глубины скважины и от скорости движения потока пропиленгликоля в трубе. Следует учесть, что распределение температуры в сечении 1 – 1, рисунка 4 трубы скважины будет неравномерным, поэтому во внутреннюю трубу будет поступать пропиленгликоль с температурой средней по сечению 2 – 2 в точке $Z - Z_{ск}$:

$$T_{ср} = \frac{T_{гр}(z_{ск})}{\left(R_{вн} - R_в\right)\left(\frac{4paz_{ск}}{v}\right)^{\frac{3}{2}}} \int_0^{R_{вн}-R_в} e^{-\frac{R^2 v}{4az_{ск}}} + T_0. \tag{8}$$

Вводим замену:

$$R\sqrt{\frac{v}{2az_{ск}}} = x. \tag{9}$$

Тогда выражение (8) будет иметь вид:

$$dR = dx\sqrt{\frac{2az_{ск}}{v}}; \tag{10}$$

$$T_{ср} = \frac{T_{гр}(z_{ск})}{\left(R_{вн} - R_в\right)\left(\frac{2z_{ск}}{v}\right)^2 \sqrt{8\pi^3}} \int_0^{\left(R_{вн}-R_в\right)\sqrt{\frac{v}{2az_{ск}}}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx + T_0. \tag{11}$$

При неизменных значениях параметров $R_{вн}$; $R_в$; v; T_0; $T_{гр}$ произведем расчет зависимости температуры пропиленгликоля от глубины по формуле (11). Результаты расчета приведены на рисунке 6.

Предложенная методика представляет расчетный метод определения оптимальной глубины скважины ($Z_{опт}$), при которой увеличение температуры пропиленгликоля в практическом отношении не меняется, соответственно дальнейшее увеличение глубины скважины экономически неэффективно. Для возможности массового применения разработанной методики на проектируемых (реконструируемых) объектах капитального строительства рекомендуется учитывать поправочные коэффициенты в зависимости от основных критериев здания или сооружения, климатологии района и от характеристик грунта (температуры, влажности, теплоемкости и других данных).

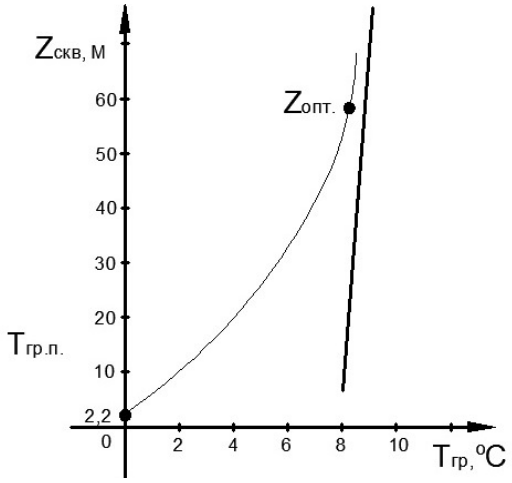


Рисунок 6 – График зависимости средней температуры пропиленгликоля от глубины скважины: $T_{гр}$ – температура грунта; $T_{гр.п}$ – температура промерзания грунта; $T_{опт.п.р}$ – температура грунта, определенная при выполнении полевых работ; $Z_{скв}$ – глубина скважины; $Z_{опт.}$ – оптимальная глубина скважины.

Список литературы

1. Руководство по применению тепловых насосов с использованием вторичных энергетических ресурсов и нетрадиционных возобновляемых источников энергии [Текст] / Г. П. Васильев, Л. В. Хрустачев и др. / Правительство Москвы, Москомархитектура, ГУП «НИАЦ». – М., 2001. – 6 с.

2. Федеральный закон от 23.11.2009 №261-ФЗ (ред. от 27.12.2018) «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93978 (Дата обращения: 08.04.2019).

3. Распоряжение Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. № 1715р. «Энергетическая стратегия России на период до 2030 г.» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_94054 (Дата обращения: 08.04.2019).

4. Рыкалин, Н. Н. Расчет тепловых процессов при сварке [Текст] / Н. Н. Рыкалин.– М.: Государственное науч.-техн. изд. машиностроительной литературы, 1951. – 296 с.

5. Васильев, Г. П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев Земли [Текст] / Г. П. Васильев. – М.: Граница. – 2006. – 176 с.

6. ГОСТ Р 54865-2011. «Теплоснабжение зданий. Методика расчета энергопотребности и эффективности системы теплогенерации с тепловыми насосами» [Текст]. – М.: Стандартинформ, 2012. – 8 с.

7. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях [Текст]. – М.: Стандартинформ, 2013. – 7 с.

8. СП 131.13330.2012. Строительная климатология [Текст]. – М.: Аналитик, 2015. – 79 с.

9. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий [Текст]. – М.: Аналитик, 2012. – 7 с.

10. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [Текст] / ГУП «ЦПП» – М., 2001. – 9 с.

References

1. *Rukovodstvo po primeneniyu teplovy`x nasosov s ispol`zovaniem vtorichny`x e`nergeticheskix resursov i netradicionny`x vozobnovlyaemy`x istochnikov e`nergii* (Guidance on the application of heat pumps using secondary energy resources and nontraditional renewable energy sources), Moscow, The Moscow Government, the Moscow Committee, 2001, 6 p.

2. *Federal`ny`j zakon ot 23.11.2009 №261-FZ (red. ot 27.12.2018) «Ob e`nergosberezhenii i povy`shenii e`nergeticheskoj e`ffektivnosti i o vnesenii izmenenij v otdel`ny`e zakonodatel`ny`e akty` Rossijskoj Federacii»* (Federal law of 23.11.2009 №261-FZ (ed. From 27.12.2018) "On energy saving and energy efficiency enhancement and on amendments to certain legislative acts of the Russian Federation"). Access mode: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93978 (Accessd date: 08.04.2019).

3. *Rasporyazhenie Pravitel`stva RF ot 13 noyabrya 2009 g. № 1715–r. «E`nergeticheskaya strategiya Rossii na period do 2030 g.»* (The order of the Government of the Russian Federation of November 13, 2009 No. 1715-R. "Energy strategy of Russia for the period till 2030"). Access Mode: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_94054 Hm. (Accessd date: 08.04.2019).

4. Rykalin N. N. *Raschet teplovy`x processov pri svarke* (Calculation of thermal processes in welding). Moscow: State scientific and technical publishing house of engineering literature, 1951, 296 p.

5. Vasiliev G. P. *Teploxladosnabzhenie zdanij i sooruzhenij s ispol`zovaniem nizkopotencial`noj teplovoj e`nergii poverxnostny`x sloev Zemli* (Heat and cold supply of buildings and structures using low-potential thermal energy of the surface layers of the Earth). Moscow: Border, 2006, 176 p.

6. *Teplosnabzhenie zdanij. Metodika rascheta e`nergopotrebnosti i e`ffektivnosti sistemy` teplogeneracii s teplovy`mi nasosami*, *GOST R 54865-2011* (Heat supply of buildings. Method of calculation of energy demand and efficiency of heat generation system with heat pumps, State Standart 54865-2011). Moscow, Standartinform, 2012, 8 p.

7. *Zdaniya zhily`e i obshhestvenny`e. Parametry` mikroklimata v pomeshheniyax*, *GOST 30494-2011* (Residential and public buildings. The parameters of indoor climate, State Standart 30494-2011). Moscow, Standartinform, 2013, 7 p.

8. *Stroitel`naya klimatologiya* (Building climatology, SP 131.13330.2012), Moscow, Analyst, 2015, 79 p.

9. *Teplovaya zashhita zdanij* (Thermal protection of buildings, SP 50.13330.2012), Moscow, Analyst, 2012, 7 p.

10. *Gigienicheskie trebovaniya k mikroklimatu proizvodstvenny`x pomeshhenij* (Hygienic requirements for the microclimate of industrial premises, SanPiN 2.2.4.548-96), Moscow, GUP CzPP, 2001, 9 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кадцын Иван Ильич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.
Аспирант кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.
Тел.: 8-913-963-20-13.
E-mail: kii55@bk.ru

Хороших Ольга Владимировна
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.
Аспирант кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.
Тел.: 8-913-626-62-97.
E-mail: bmk.omsk@yandex.ru

Кузнецов Виктор Федорович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Высшая математика», ОмГУПС.
Тел.: 8-913-670-99-02.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kadtcyn Ivan Ilyich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av.m., Omsk, 644000, the Russian Federation.
Postgraduate student of the department «Heat power engineering», OSTU.
Phone: 8-913-963-20-13
E-mail: kii55@bk.ru

Khoroshikh Ol'ga Vladimirovna
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av.m., Omsk, 644000, the Russian Federation.
Postgraduate student of the department «Heat power engineering», OSTU.
Phone: 8-913-626-62-97
E-mail: bmk.omsk@yandex.ru

Kuznetsov Viktor Fedorovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av.m., Omsk, 644000, the Russian Federation.
Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the department «Higher mathematics», OSTU.
Phone: 8-913-670-99-02

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Кадцын, И. И. Методика определения оптимальной глубины односкважинного коаксиального геотермального коллектора / И. И. Кадцын, О. В. Хороших, В. Ф. Кузнецов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. –№ 2 (38). – С. 127 – 135.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kadtcyn I. I., Khoroshikh O. V., Kuznetsov V. F. Method of determining the optimal depth of single well coaxial geothermal manifold . Journal of Transsib Railway Studies, 2019, vol. 2, no. 38, pp. 127 – 135 (In Russian).

УДК 537.226.1

В. Е. Митрохин, Н. Е. Агарков
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

К ВОПРОСУ О ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ КОНДЕНСАТОРНЫМ МЕТОДОМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ И КАБЕЛЕЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА НА ВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ

Аннотация. *В статье рассматривается вопрос о границах применимости конденсаторного метода для измерения действительной части величины диэлектрической проницаемости изоляции печатных плат и кабелей телекоммуникаций железнодорожного транспорта на примере фольгированного стеклотекстолита FR-4 и кабеля РК-75-4-12 в области частот от 10 Гц до 100 МГц. Измерения проводились при неизменных температуре и влажности известного материала.*

Выполнено сравнение полученных значений с паспортными данными на материал, выработана методика измерений с перекрытием частотных диапазонов при помощи изменения номиналов измерительных резисторов от большего к меньшему с увеличением частоты подаваемого сигнала. Показано, что в высокочастотной области (десятки мегагерц) на точность измерений непосредственно влияют паразитная последовательная индуктивность исследуемого образца конденсатора и активное сопротивление выводов и обкладок и его повышение с ростом частоты, обусловленное скин-эффектом.

В статье рассматриваются также пути учета и вычисления паразитных элементов конденсатора-образца. Одним из таких путей является изучение характеристик элементов образца на первом собственном последовательном резонансе.

Ключевые слова: *диэлектрическая проницаемость, конденсаторный метод, высокая частота, направляющая система, паразитные элементы конденсатора, плоский конденсатор, моделирование полного сопротивления конденсатора, погрешность измерения.*

Valery E. Mitrokhin, Nikita E. Agarkov
Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

TO THE QUESTION OF THE POSSIBILITY OF MEASURING BY A CAPACITOR METHOD DIELECTRIC PERMITTIVITY OF PRINT BOARDS AND CABLES OF TELECOMMUNICATIONS AT HIGH FREQUENCIES

Abstract. *The authors consider the question of the limits of applicability of the capacitor method for measuring the real part of the dielectric constant of printed circuit boards and telecommunications cabled rail transport using the example of FR-4 fiberglass laminate and the cable PK-75-4-12 in the frequency range from 10 Hz to 100 MHz. The measurements were carried out at a constant temperature and humidity of a known material.*

Comparison of the obtained values with the passport data on the material is carried out; a measurement procedure is developed with overlapping frequency ranges by changing the values of the measuring resistors from larger to smaller with increasing frequency of the input signal. It is shown that in the high-frequency region, the measurement accuracy is directly affected by the parasitic inductance of the capacitor sample under study, as well as the active resistance of the leads and plates and its increase due to the skin effect. The article also discusses the ways of accounting and calculating the parasitic elements of a capacitor. One of these ways is to study the characteristics of the elements of the sample at the first proper serial resonance of the capacitor under study.

Keywords: *dielectric permittivity, capacitor method, high frequency, guiding system, parasitic capacitor elements, flat capacitor, capacitor impedance modeling, measurement error.*

Построенная и ныне функционирующая сеть железнодорожного транспорта России ориентирована на аналоговые системы приема и передачи информации. В последние годы на железных дорогах РФ наблюдается интенсивный переход с устаревшей аналоговой аппаратуры на современную цифровую, т. е. происходит цифровизация сети. В связи с этим, частотный спектр каналов и сред передачи резко расширяется, поэтому специалистам требуется знать параметры кабельных линий и систем передачи информации в широком диапазоне частот. Основным параметром, определяющим физическую дальность приема и передачи информации, а также спектр рабочих частот для кабельных линий и аппаратуры, является величина относительной диэлектрической проницаемости материалов изоляции кабелей и подложек печатных плат. Параметры среды передачи направляющей системы являются основными характеристиками при разработке широкополосных радиотехнических и телекоммуникационных систем.

Актуальность темы определяется тем, что в настоящее время происходит резкое расширение спектра передаваемых частот в гигагерцовую область, а существующие ГОСТы и справочники по параметрам среды передачи [1 – 3] не приводят данные по параметрам направляющих систем (проводимость σ, диэлектрическая проницаемость ε, магнитная проницаемость μ) в широком диапазоне частот. В данной работе рассматривается величина действительной составляющей диэлектрической проницаемости, которая напрямую влияет на затухание в направляющих системах (например, печатные платы или коаксиальные кабели), на скорость распространения волн в среде (задержку сигнала при распространении в среде), на импеданс схемы, на емкость слоев печатной платы или погонную емкость кабеля и т. д.

На рисунках 1 и 2 показаны современные железнодорожные цифровые носимые радиостанции – «Альтавия-301М» и «ICOM IC-706mk2». Обе радиостанции выполнены на многослойных печатных платах, причем рабочие частоты приема и передачи на разных диапазонах – от 144 МГц до 470 МГц, что остро ставит вопрос о необходимости учета (и, в большинстве случаев, измерения) величины диэлектрической проницаемости подложки при проектировании данных и подобных устройств.

Конденсаторный метод является базовым для всех остальных методов измерения диэлектрической проницаемости, основанных на элементах с сосредоточенными параметрами – от метода замещения до мостовых методов и метода биений. В литературе, посвященной методам измерения ε [4], говорится о том, что данный класс методов не может использоваться на длинах волн, меньших 3 м, иначе говоря, на частотах выше 100 МГц из-за паразитных трудноучитываемых параметров, присущих самим измерительным схемам, и выполнения условия квазистационарности протекающих в схемах токов.

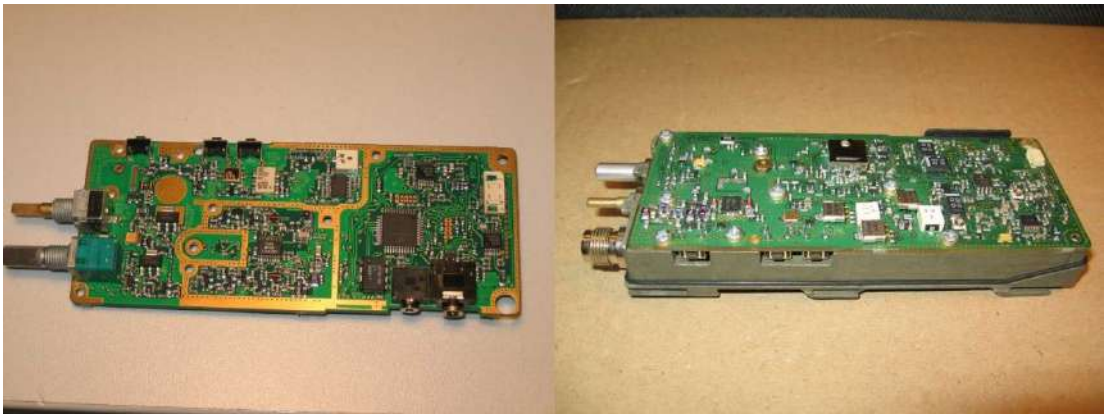


Рисунок 1 – Печатная плата носимой радиостанции «Альтавия-301М»

Рисунок 2 – Печатная плата носимой радиостанции «ICOM IC-706mk2»

В конденсаторном методе возможна реализация измерений ε как материалов печатных плат, так и материалов изоляции коаксиальных кабелей с использованием их отрезков в качестве конденсатора с известной геометрией. Важным преимуществом данного метода является и то, что образцы материалов печатных плат затем могут быть использованы в установках для измерения величины ε на высоких частотах и СВЧ, основанных, например, на измерении параметров матрицы рассеяния S_{11} и S_{12} [5]. Конденсаторный метод основан на изменении емкости плоского конденсатора в ε раз при размещении между его пластинами исследуемого диэлектрика и сравнении этой емкости с еще одним плоским конденсатором (называемым эталонным) тех же размера, формы и воздушным зазором между пластинами, что и первый. Так, в литературе [4, 6] указывается, что данный метод применяется в частотном диапазоне частот от 100 Гц до 1 – 5 МГц и неприменим для высоких частот (десятки мегагерц и выше) из-за всевозможных возникающих паразитных явлений, что было рассмотрено и уточнено в ходе измерений, в результате которых рабочий диапазон частот оказался значительно шире, о чем подробно будет сказано далее.

В разработанной установке, принципиальная схема которой представлена на рисунке 3, измерения проводились в диапазоне частот 10 Гц – 100 МГц, а в качестве эталонного конденсатора использовался резистор с заранее измеренным сопротивлением $R2$ (270 Ом – 1 МОм), а измеряемый конденсатор C в первом случае представлял собой двух-

сторонний фольгированный стеклотекстолит *FR*-4 квадратной формы, который был вырезан из листа стеклотекстолита, а во втором – три отрезка коаксиального кабеля одинаковой длины, спаянных параллельно для набора емкости при одновременном уменьшении паразитной индуктивности и активного сопротивления из-за длины отрезков.

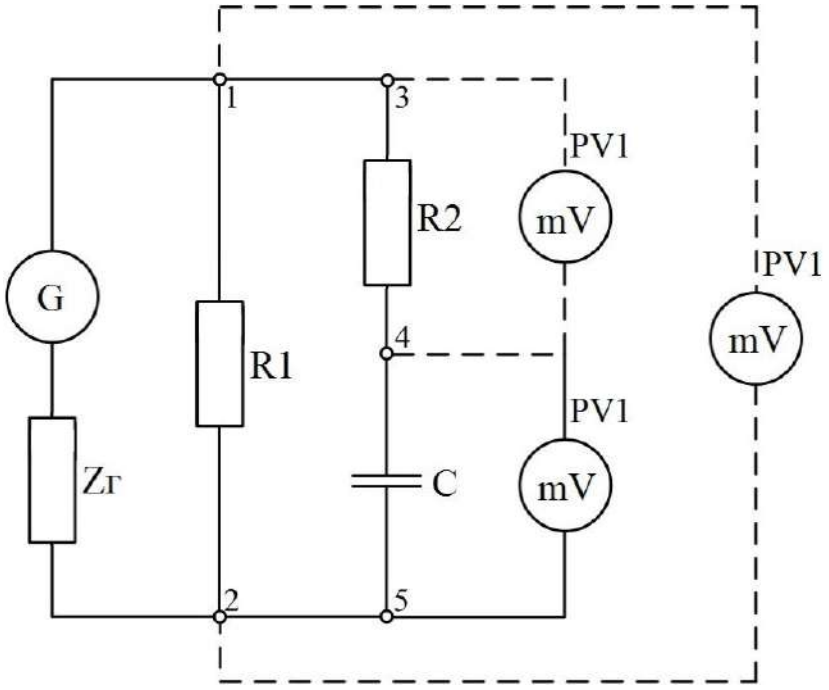


Рисунок 3 – Принципиальная схема для измерения диэлектрической проницаемости

На рисунке 3 представлены следующие обозначения: *G* – генератор синусоидального сигнала (Г3-112, Г4-151); *Z*г – выходное сопротивление генератора (50 Ом); 1 – 5 – приборные клеммы для подключения выводов генератора и щупов измерительных приборов; *R*1 – согласующее сопротивление (55 Ом); *C* – конденсатор, заполненный диэлектриком (плоский, цилиндрический); *R*2 – резистор с заранее известным сопротивлением; *mV* – милливольтметр для измерения падения напряжения на элементах цепи (в данной работе в качестве милливольтметра использовался осциллограф АКТАКОМ ADS-2221MV). Клеммы 1 и 3, а также 2 и 5 (рисунок 3) были физически объединены в одну. Номинал согласующего резистора *R1* рассчитан так, чтобы обеспечивать согласование с генератором на уровне 45 – 55 Ом и на низких частотах, когда параллельная *RC*-цепь практически не влияет на *R1*, и на высоких частотах, где сопротивление образца мало и можно считать, что всю нагрузку на согласующее сопротивление создает резистор *R2*, который должен иметь как можно меньшее сопротивление для адекватного сравнения падения напряжения на нем и исследуемом образце.

Вычисление ε диэлектрика проводится в три этапа. Первый этап – измеряются падения напряжения на резисторе *R*2 и конденсаторе *C*. На втором этапе рассчитывается ток в последовательной *RC*-цепи по известному сопротивлению резистора *R*2 по закону Ома. По известному току и измеренному падению напряжения на конденсаторе рассчитывается его сопротивление на конкретной частоте также по закону Ома. На третьем этапе рассчитанное сопротивление конденсатора приравнивается к формуле сопротивления конденсатора через площадь пластин и расстояние между пластинами (которые измеряются предварительно), а также и через величину диэлектрической проницаемости, откуда последняя и выражается [1].

$$X_{C_2} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} = X_{C_1}, \qquad (1)$$

где X_{C_1} – вычисленное реактивное сопротивление конденсатора по закону Ома;

X_{C_2} – реактивное сопротивление конденсатора, выраженное через его емкость и частоту сигнала;

f – частота, на которой происходит измерение;

C – емкость конденсатора.

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_{C_1}} = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{d}, \quad (2)$$

где ε – величина действительной части диэлектрической проницаемости вещества;

ε_0 – электрическая постоянная;

S – площадь пластин конденсатора;

d – расстояние между пластинами конденсатора.

$$\varepsilon = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_{C_1} \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{d}}. \quad (3)$$

Расчет был выполнен в среде MathCad.

Так как конденсатор был вырезан из листа стеклотекстолита, возникает вопрос о точном измерении площади его пластин. Наиболее точно площадь пластин можно рассчитать по формуле площади через стороны и противолежащие углы [7]:

$$S = \sqrt{(p-a)(p-b)(p-c)(p-d) - a \cdot b \cdot c \cdot d \cdot cos^2\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right)}, \quad (4)$$

где S – площадь пластин конденсатора;

p – полупериметр пластин конденсатора;

a, b, c, d – стороны пластин конденсатора;

α, β – значения противолежащих углов.

Формула (4) справедлива только для четырехугольника, а не сложного многоугольника, каковым является вырезанный конденсатор (в силу наличия небольших выпуклостей и вогнутостей сторон при резке образца). Поэтому был взят допуск по рассчитанной площади ±1%, покрывающий данные отклонения от правильной квадратной формы.

Линейные размеры пластин измерялись штангенциркулем с точностью 0,02 мм, расстояние между пластинами – микрометром с точностью 0,01 мм, оно совпало со значением, указанным в ГОСТе [8] (1,5 мм).

Полученные значения диэлектрической проницаемости на нашей установке представлены на рисунках 5 и 6.

В экспериментах использовался метод частотного перекрытия диапазонов. Изначально в схему (см. рисунок 3) впаивался резистор $R2$ сопротивлением 100 кОм, на котором проводились измерения во всем возможном для него частотном диапазоне (от минимального точно регистрируемого падения напряжения на резисторе (самая низкая частота) до минимального точно регистрируемого падения напряжения на конденсаторе (самая высокая частота)), затем данный резистор перепаивался на следующий, сопротивлением 10 кОм, и процедура повторялась. Также, измерения проводились с резистором 1 кОм и 540 Ом (рисунок 5).

На рисунке 4 показано устранение влияния емкости и индуктивности щупов генератора и приборных клемм. Кроме того, в ходе проведения экспериментов оказалось, что вместо трудоемких измерений с четырьмя резисторами можно ограничиться лишь двумя, причем с большим перекрытием диапазонов измерения, по крайней мере в один порядок по частоте.

Измерения проводились осциллографом «АКТАКОМ ADS-2221MV» с полосой 200 МГц (см. рисунки 5, 6).

В литературе [8] указывается, что диапазон значений диэлектрической проницаемости фольгированного двухстороннего стеклотекстолита *FR*-4 составляет 4,5 – 5,4 на частоте 1 МГц.

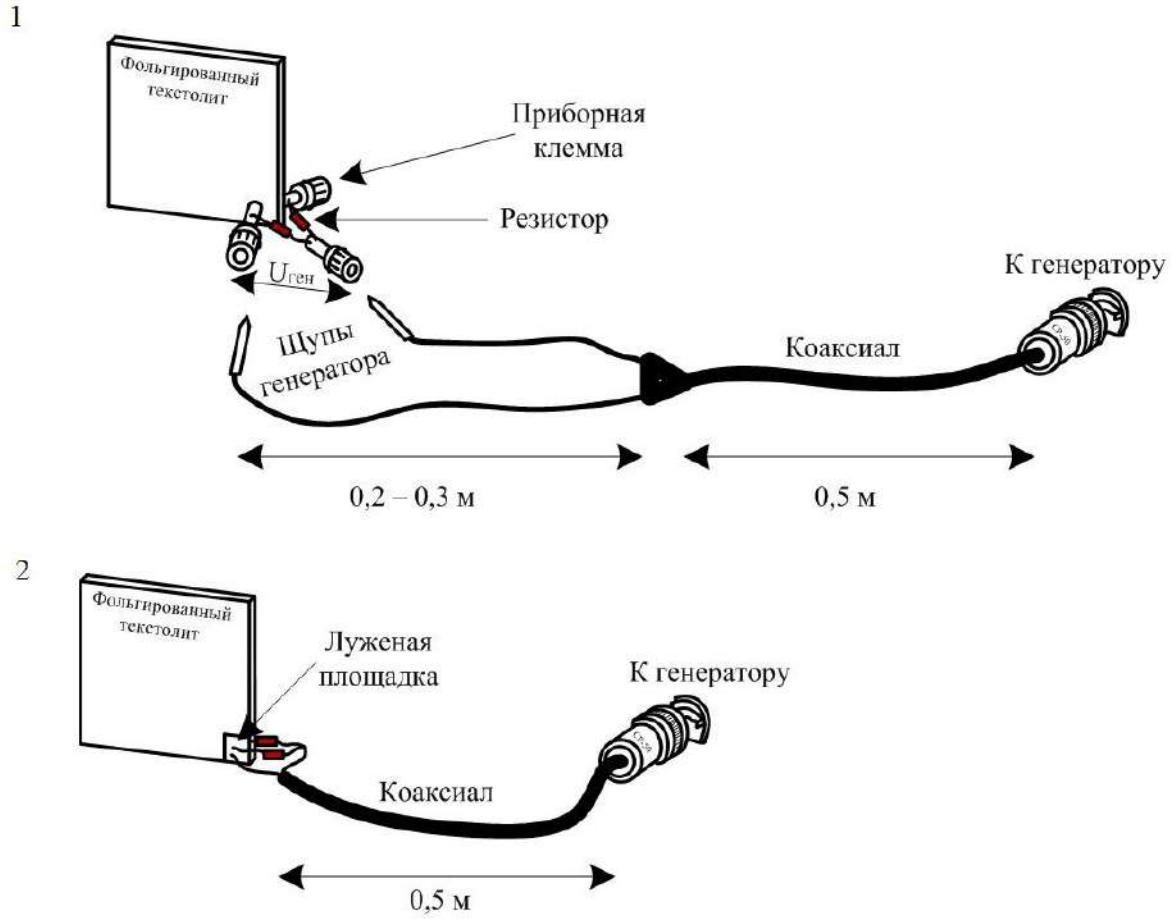


Рисунок 4 – Устранение влияния емкости и индуктивности щупов генератора и приборных клемм

Рисунок 5 дает представление о вкладе краевых эффектов в общую емкость образца. Графики рисунков 5, а и 5, б с учетом инструментальной погрешности оказываются примерно одинаковыми, нельзя сказать, что из-за уменьшения размеров с 10 до 5 см сторон образца вклад краевой емкости стал заметен, т. е. при отношении длины обкладок образца к расстоянию между обкладками около 33,3 раза при диэлектрике с $\varepsilon = 4,5 – 5,4$ единицы, краевая емкость достаточно мала и ее можно не учитывать при измерениях. Иначе, график на рисунке 5, б оказался бы ниже графика на рисунке 5, а во всем диапазоне частот из-за того, что значения ε, вычисленные для суммарной емкости образца, оказались бы завышенными. При этом в методах измерения ε, основанных на моделях с распределенными параметрами, работающих в области СВЧ, где исследуемые образцы имеют размеры, измеряемые в миллиметрах, невозможно не учитывать вклад краевой емкости в получаемые результаты [5].

На рисунке 6 показан график измерения ε усовершенствованной схемы с устранением влияния емкости и индуктивности щупов генератора и приборных клемм при размере пластин 5 см с помощью осциллографа «ADS-2221MV».

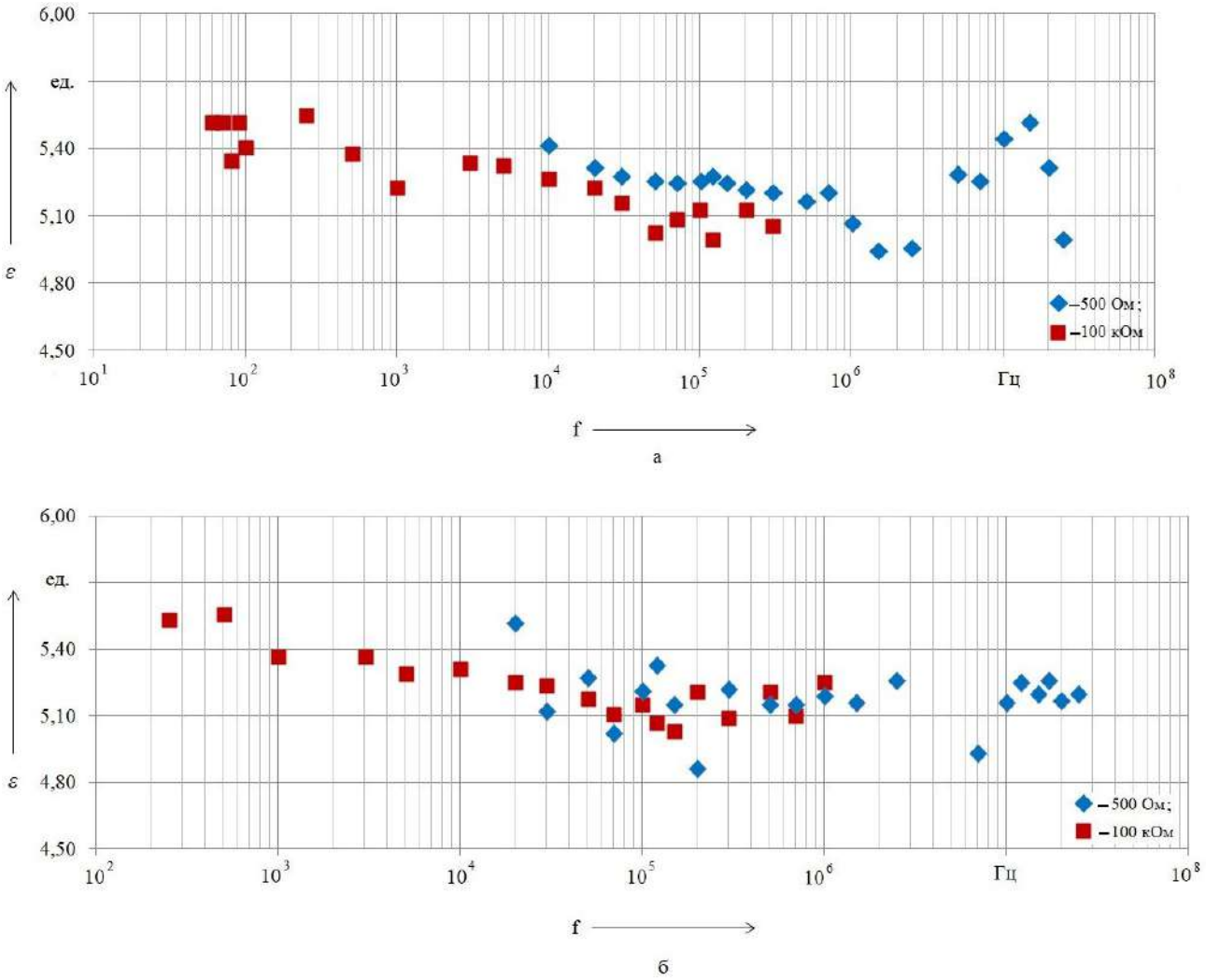


Рисунок 5 – Значения ε стеклотекстолита *FR-4:*
а – размер пластин конденсатора 10 см; б – 5 см

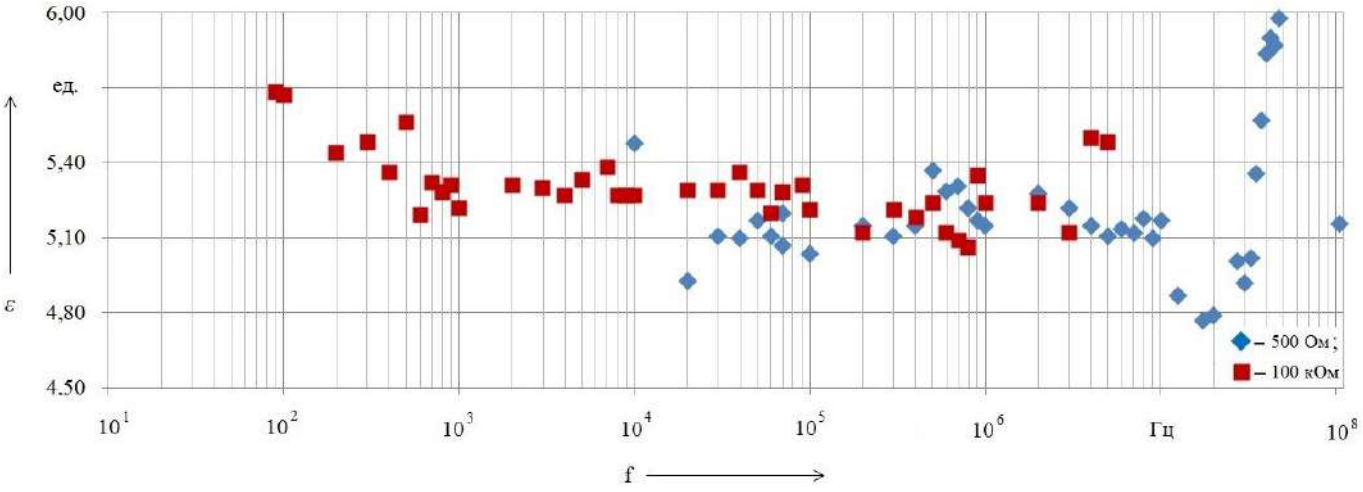


Рисунок 6 – Значения ε стеклотекстолита *FR-4*

На рисунке 6 необходимо обратить внимание на область частот выше 30 МГц, где отчетливо видно повышение измеряемых значений ε. Для того чтобы подробнее рассмотреть данное явление, приведем график в линейных координатах с расширенным вверх диапазоном полученных значений ε (рисунок 7).

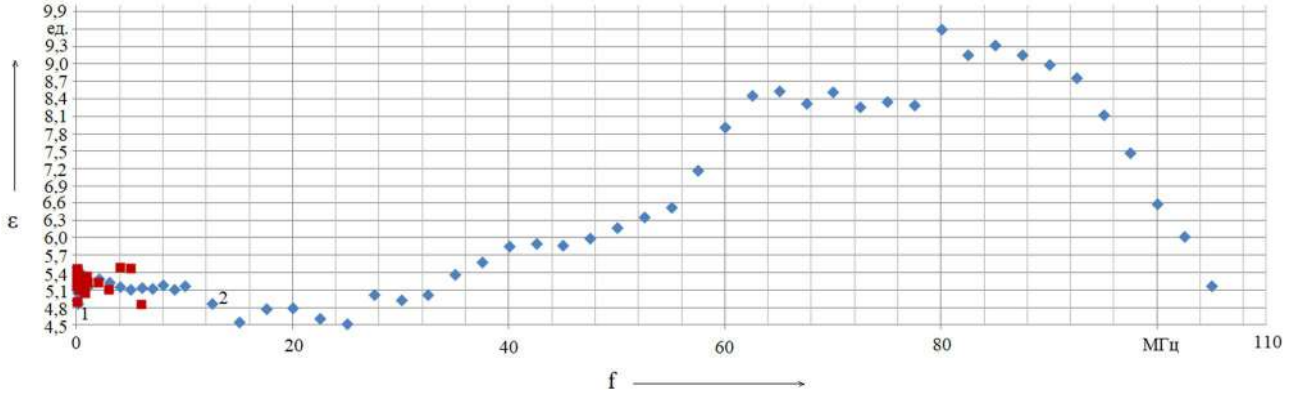


Рисунок 7 – Значения *ε* стеклотекстолита *FR-4* в линейных координатах:
1 – резистор 100 кОм; 2 – резистор 540 Ом

Для объяснения формы графика на рисунке 7 разберем подробно, как измеренные значения падений напряжения на измерительном резисторе и конденсаторе на конкретной частоте влияют на итоговое значение ε. Итак, на каждой частоте измерения, как уже было сказано выше, регистрируются падения напряжения на двух элементах. Именно сохранение отношения друг к другу значений падений напряжения на каждой частоте, т. е. их линейность, определяет вид получаемого графика. Чем больше отклонение этого отношения для конкретной частоты от теоретического, тем выше будет находиться значение ε. Само отношение падений напряжения для последовательной RC-цепи, где выводной резистор R в данном диапазоне частот является абсолютно линейным элементом, означает отклонение полного сопротивления исследуемого конденсатора от простейшей модели, учитывающей только собственную емкость. Таким образом, полное сопротивление конденсатора оказывается меньше, чем должно быть. Данное явление свидетельствует о проявлении последовательной паразитной индуктивности образца, которая в данном случае проявляется с частот выше 30 МГц. Она приводит к собственному последовательному резонансу в образце на частоте 80 МГц. На резонансной же частоте полное сопротивление конденсатора и падение напряжения на нем не достигают нулевого значения, что обусловлено активной составляющей сопротивления выводов и обкладок конденсатора, которое может достигать нескольких единиц Ом благодаря скин-эффекту и размерам (длинам) обкладок. Данная величина поддается точному расчету и описана в технической литературе [1 – 3].

Для проверки наших измерений на установке был использован измеритель емкости Lutron LCR-9053, с помощью которого были найдены значения диэлектрической проницаемости стеклотекстолита (3) на частоте измерителя 1 кГц при известной площади пластин. Данные сведены в таблицу.

Площади, емкости, диэлектрические проницаемости стеклотекстолита конденсаторов различных размеров

Размер пластин, см	5		7,5	10
№ конденсатора	1	2	3	4
S пластины, см^2	24,57	24,24	56,57	98,54
Емкость, пФ	76	74	176	305
ε, ед.	5,24	5,18	5,27	5,24

Таким образом, величина диэлектрической проницаемости с учетом допуска ±1 % по площади и погрешности измерителя LCR-9053 находится в пределах 5,24 ± 0,07 единиц для всех трех конденсаторов на частоте 1 кГц, что было подтверждено экспериментами.

Погрешность же осциллографа равна по паспорту ±3 %. Необходимо учитывать также погрешность считывания с экрана осциллографа (±1 %).

Для удобства измерений при отсутствии дифференциального пробника необходимо добавить в схему второй коаксиальный вход с радиочастотным соединителем СР-50 (рисунок 8) и максимально сократить длину питающего коаксиального кабеля, что уменьшит емкость отключаемых поочередно входов и повысит максимальное напряжение, подводимое с генератора и затухающее в питающем кабеле. Дополнительно уменьшить краевые эффекты на углах квадратных образцов печатных плат можно применением образцов с круглой формой. Помимо прочего погрешность вычисления площади обработанных круглых образцов меньше по сравнению с аналогичными образцами квадратной формы. Так как речь зашла про удобство измерений, необходимо отметить, что вместо навесного монтажа резисторов и питающих кабелей на самом образце можно выделить их в отдельную схему, где предусмотреть наличие контактных площадок под запайку образца.

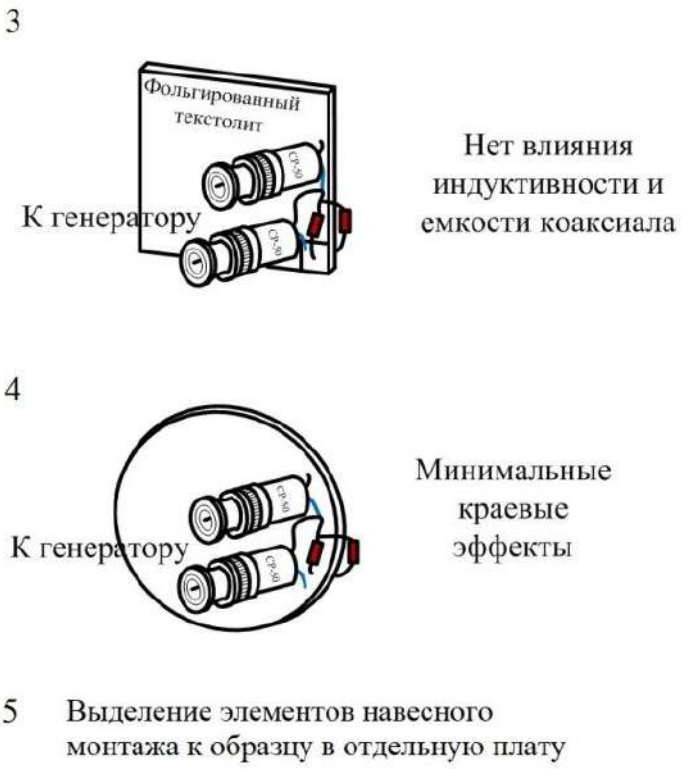


Рисунок 8 – Дальнейшее совершенствование измерительной схемы

В качестве дополнительного тестирования конденсаторного метода и нашей установки было произведено измерение ε радиочастотного кабеля РК-75-4-12 в диапазоне частот 10 Гц – 80 МГц (рисунок 9). По ГОСТ 11326.9-79 [9] для РК-75-4-12 погонная емкость кабеля составляет 67 пФ/м, а коэффициент укорочения, являющийся квадратным корнем от величины ε, составляет 1,52 единицы, что соответствует значению ε в 2,31 единицы. Внутренняя изоляция кабеля – полиэтилен. В отличие от стеклотекстолита, рассмотренного выше, полиэтилен имеет высокую стабильность значения ε от частоты вплоть до гигагерцового диапазона. Поэтому такой образец удобно использовать в качестве калибровочного образца для конденсаторного метода. На рисунке 9 приведен полученный график ε для образца РК-75-4-12, представляющего собой три параллельно спаянных отрезка длиной 38,5 см каждый общей емкостью около 83 пФ.

Рассмотрим в линейных координатах высокочастотную область (представлена на рисунке 10), где наблюдается рост отношения падения напряжения на резисторе к падению напряжения на конденсаторе от теоретического.

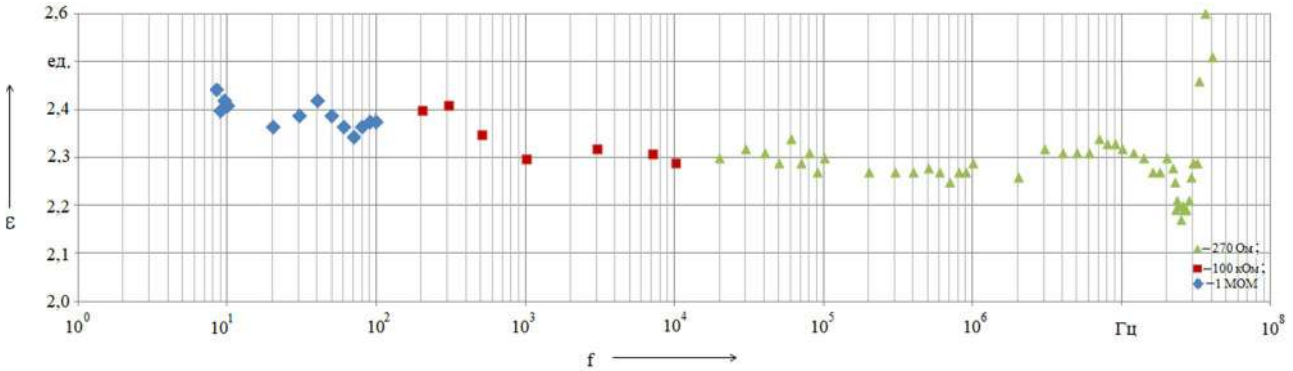


Рисунок 9 – Значения ε радиочастотного кабеля РК-75-4-12

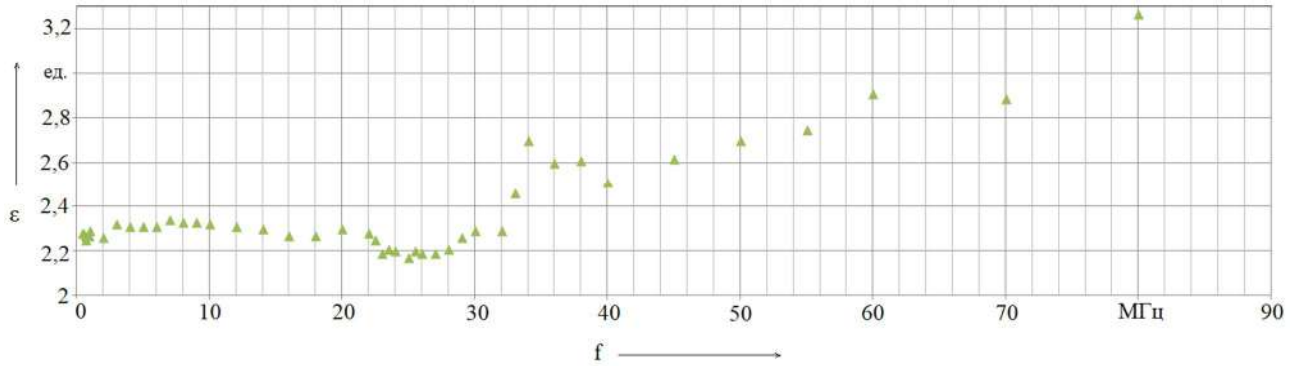


Рисунок 10 – Значения ε радиочастотного кабеля РК-75-4-12

Благодаря проявлению паразитной индуктивности значения ε, начиная с частоты 33 МГц, оказываются завышенными и не могут рассматриваться как собственно значения ε. Первый последовательный резонанс данного образца происходит на частоте 119 МГц. Таким образом, по имеющимся данным необходимо сделать обобщение и обозначить рекомендации для возможности применения конденсаторного метода на высоких частотах.

Во-первых, для возможности применения рассматриваемого метода на высоких частотах порядка десятков мегагерц – нескольких сотен мегагерц, необходим учет паразитной индуктивности исследуемых образцов и активного сопротивления, усиленного скин-эффектом, значение которого можно рассчитать, используя первый последовательный резонанс самого образца.

Во-вторых, физические ограничения на максимальную рабочую частоту устанавливают размер образца, величина ε и условие квазистационарности протекающего по измеряемым элементам тока; т. е. длина отрезка кабеля или диаметр листового образца конденсатора должны быть во много раз меньше длины волны подаваемого сигнала. При невыполнении условия квазистационарности исследуемая цепь превращается в цепь с распределенными параметрами и точность измерений ε таким способом резко падает.

В-третьих, при исследовании возможностей конденсаторного метода в области высоких частот целесообразно иметь образцы с изоляцией, диэлектрическая проницаемость которой не зависит от частоты вплоть до гигагерцового диапазона, иначе говоря, калибровочные образцы. Они позволят построить точные модели полного сопротивления конденсатора с его паразитными параметрами и получать достоверные результаты измерения ε даже после первого последовательного резонанса в случае достаточно больших размеров образцов.

В-четвертых, для оценки получаемых результатов в случае диэлектриков, применяемых в печатных платах, можно использовать эти образцы в других установках по определению ε. Установки со схожим назначением описаны в источниках [5, 10].

В-пятых, для уменьшения паразитной индуктивности образцов необходимо уменьшать их геометрические размеры – длину отрезков кабелей и диаметр печатных плат, это позволит применять модель конденсатора, учитывающую только собственную емкость на более высоких частотах, но серьезно уменьшит емкость образцов и возможность проведения измерений на низких частотах в силу чрезмерно большого импеданса, сравнить который даже с резистором в 1 МОм невозможно в силу ограничения чувствительности измерительной техники. Оптимальная емкость образца для широкополосных измерений от десятков герц до сотен мегагерц – от 50 до 150 пФ.

В заключение отметим, что при соблюдении изложенных выше рекомендаций и применении модели конденсатора второго порядка, учитывающей паразитные элементы, погрешность измерения действительной части комплексной диэлектрической проницаемости во всем рабочем диапазоне при наличии высокоточного оборудования, например цифрового осциллографа, по полученным данным не будет превосходить 3 – 5 %.

Список литературы

1. Физические величины: Справочник [Текст] / И. С. Григорьев, Е. З. Мейлихов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

2. Справочник по электротехническим материалам [Текст] / Под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова и др. – М.: Энергия, 1974. – Т. 1. – 367 с.

3. Электротехнический справочник. [Текст] / Под ред. В. Г. Герасимова, П. Г. Грудинского и др. – М.: Энергия, 1980. – Т. 1. – 520 с.

4. Брандт, А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах [Текст] / А. А. Брандт. – М.: Физматгиз, 1963. – 406 с.

5. Бобров, П. П. Измерение комплексной диэлектрической проницаемости листовых диэлектриков в диапазоне частот от 3 кГц до 300 МГц [Текст] / П. П. Бобров, С. П. Кривальцевич // Техника радиосвязи / Омский науч.-исследоват. ин-т приборостроения. – Омск. – 2017. – № 3 (34). – С. 62 – 71.

6. Родионова, О. В. Метод измерения комплексной диэлектрической проницаемости почвогрунтов в широкой полосе частот [Текст] / Родионова Ольга Васильевна: дис…канд. физ.-мат. наук. – Омск, 2016. – 115 с.

7. Выгодский, М. Я. Справочник по элементарной математике [Текст] / М. Я. Выгодский. – М.: АСТ, 2006. – 404 с.

8. ГОСТ 26246.5-89. Материал электроизоляционный фольгированный нормированной горючести для печатных плат на основе стеклоткани, пропитанной эпоксидным связующим. Технические условия [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://docs.cntd.ru/document/1200011703 (дата обращения: 03.06.2019).

9. ГОСТ 11326.9-79 Кабель радиочастотный марки РК 75-4-12. Технические условия. [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://docs.cntd.ru/document/1200012021 (дата обращения: 03.06.2019).

10. Гусев, Ю. А Основы диэлектрической спектроскопии: Учебное пособие [Текст] / Ю. А. Гусев. – Казань: Казанский гос. ун-т, 2008. – 112 с.

References

1. Grigor'yev I. S., Meylikhov Ye. Z. *Fizicheskiye velichiny. Spravochnik* (Physical quantities. Directory). Moscow: Energoatomizdat, 1991, 1232 p.

2. Koritskii YU. V., Pasynkov V. V. *Spravochnik po elektrotekhnicheskim materialam. T. 1* (Directory of electrical materials. Volume 1). Moscow: Energiya, 1974, 367 p.

3. Gerasimov V. G., Grudinskii P. G. *Elektrotekhnicheskiy spravochnik. T. 1.* (Electrotechnical reference. Volume 1). Moscow: Energiya, 1980, 520 p.

4. Brandt A. A. Issledovaniye dielektrikov na sverkhvysokikh chastotakh (Investigation of dielectrics at microwave frequencies). Moscow: Fizmatgiz, 1963, 406 s.

5. Bobrov P. P., Krivaltsevich S. V. Izmereniye kompleksnoy dielektricheskoy pronitsayemosti listovykh dielektrikov v diapazone chastot ot 3 KHz do 300 MHz. (Measurement of the complex dielectric constant of sheet dielectrics in the frequency range from 3 KHz to 300 MHz), Tekhnika radiosvyazi, 2017, no 3, pp. 62 – 71.

6. Rodionova O. V. *Metod izmereniya kompleksnoy dielektricheskoy pronitsayemosti pochvogruntov v shirokoy polose chastot* (The method of measuring the complex dielectric constant of soil in a wide frequency band). Candidate thesis, Omsk, 2016, 115 p.

7. Vygodskiy M. YA. *Spravochnik po elementarnoy matematike* (Elementary Mathematics Directory). Moscow: AST, 2006, 404 p.

8. GOST 26246.5-89. *Material elektroizolyatsionnyy fol'girovannyy normirovannoy goryuchesti dlya pechatnykh plat na osnove steklotkani, propitannoy epoksidnym svyazuyushchim. Tekhnicheskiye usloviya*. (Insulating foil material of standardized combustibility for printed circuit boards based on fiberglass impregnated with an epoxy binder. Technical conditions) URL: http://docs.cntd.ru/document/1200011703 (access date: 03.09.2019).

9. GOST 11326.9-79 *Kabel' radiochastotnyy marki RK75-4-12. Tekhnicheskiye usloviya. Tekhekspert* (cable RF mark RC75-4-12. Technical conditions) URL: http://docs.cntd.ru/document/1200012021 (access date: 03.09.2019).

10. Gusev Yu. A. *Osnovy dielektricheskoy spektroskopii: uchebnoye posobiye* (Fundamentals of dielectric spectroscopy: a training manual). Kazan', 2008, 112 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Митрохин Валерий Евгеньевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, 644046, г. Омск, Российская Федерация.
Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Телекоммуникационные, радиотехнические системы и сети», ОмГУПС.
Тел.: +7(3812) 31-06-94.
E-mail: mitrokhin@list.ru

Агарков Никита Евгеньевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, 644046, г. Омск, Российская Федерация.
Студент группы 24А кафедры «Телекоммуникационные, радиотехнические системы и сети», ОмГУПС.
Тел.: +7(3812) 32-36-24.
E-mail: agarkov.nikita@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Митрохин, В. Е. К вопросу о возможности измерения конденсаторным методом диэлектрической проницаемости печатных плат и кабелей телекоммуникаций железнодорожного транспорта на высоких частотах [Текст] / В. Е. Митрохин, Н. Е. Агарков // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 2 (38). – С. 135 – 146.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Mitrokhin Valery Evgenievich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Advanced Doctor of Engineering Sciences, Professor, professor of the department "Telecommunication, radio engineering systems and networks", OSTU.
Phone: +7(3812) 31-06-94.
E-mail: mitrokhin@list.ru.

Agarkov Nikita Evgenievich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
The student of group 24A of the department "Telecommunication, radio engineering systems and networks", OSTU.
Phone: +7(3812) 32-36-24.
E-mail: agarkov.nikita@gmail.com

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Mitrokhin V. E., Agarkov N. E. To the question of possibility of measuring by a capacitor method dielectric permittivity of print boards and cables of telecommunications at high frequencies. Journal of Transsib Railway Studies, 2019, vol. 2, no. 38, pp. 135 – 146 (In Russian).

Уважаемые коллеги!

Редакция научно-технического журнала «Известия Транссиба» приглашает Вас публиковать результаты научных исследований по тематическим направлениям журнала:

– подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация;
– железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог;
– транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте;
– совершенствование промышленных теплосистем, теплотехнического и теплового оборудования;
– электрические станции и электроэнергетические системы;
– энергетические системы и комплексы;
– автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Материалы просим высылать ответственному секретарю редакционной коллегии журнала Иванченко Владимиру Ивановичу по электронной почте: izvestia_transsiba@mail.ru.

Правила представления рукописей научных статей в научно-технический журнал «Известия Транссиба»

В редакцию журнала представляется:

рукопись статьи на белой бумаге формата А4 в двух экземплярах, а также в электронном виде (на любом носителе или по e-mail), имя файла определяется по фамилии первого автора: фамилия.doc;

экспертное заключение о возможности опубликования статьи в открытой печати.

Рукопись статьи включает в себя УДК, ФИО авторов, аффилиацию (место работы или учебы) авторов, название статьи, аннотацию, ключевые слова (5 – 10 слов) на русском и английском языках, текст статьи, список литературы (более 10 наименований), транслитерацию списка литературы в романском алфавите, сведения об авторах и библиографическое описание статьи на русском и английском языках.

Рукопись статьи оформляется в соответствии с образцом.

Сведения об авторах включают в себя фамилию, имя, отчество, ученую степень и звание, место работы с указанием почтового адреса, должность, контактные телефоны, e-mail для обратной связи.

Один экземпляр текста статьи должен быть подписан всеми авторами на оборотной стороне каждой страницы.

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 лаконичным и четким, свободным 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 (Equation): обычный – 12 пт, крупный индекс – 7, мелкий – 5, крупный символ – 15, мелкий – 12 пт;

буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавитов, математические символы такие, например, как cos, sin, max, min, – прямым шрифтом;

текст в таблицах, подрисуночные подписи и названия таблиц набираются шрифтом Times New Roman, 10 пт;

межстрочный интервал одинарный, абзацный отступ – 0,75 см;

каждый рисунок дополнительно должен быть представлен в оригинальном файле (формат JPEG или TIFF, разрешение – не ниже 300 пикс/дюйм);

рисунки, выполненные в редакторе Word, должны быть вставлены как объект;

после текста статьи следует список литературы на русском языке и в романском алфавите (латинице) с переводом названий литературных источников на английский язык;

ссылки на литературу в тексте статьи указываются в квадратных скобках, список литературы имеет заголовок *Список литературы* (более 10 наименований), библиографическое описание источников на русском языке оформляется по требованиям ГОСТ 7.1-2003;

в романском алфавите (латинице) список литературы имеет заголовок *References* и оформляется по следующему образцу: Author1 A.A., Author2 A.A., Author3 A.A., Author4 A.A., Author5 A.A. Title of article [Nazvanie stat'i v romanskom alfavite]. Nazvanie zhurnala v romanskom alfavite – *Title of Journal*, 2014, no. 1, pp. 54 – 57.

Рукописи статей, опубликованных ранее или переданных в другие издания, не принимаются.

Число соавторов не должно превышать трех человек. Рекомендуемый объем статьи – не менее пяти и не более 10 страниц. В ином случае вопрос по объему статьи необходимо согласовать с редакцией журнала. Иллюстрации, схемы, таблицы, включаемые в текст статьи, учитываются в общем объеме текста.

Авторы должны избегать повторения одних и тех же данных в таблицах, на графиках и в тексте статьи.

В случае представления двух или более статей одновременно необходимо указывать желательную очередность их публикации.

В случае возвращения статьи автору для устранения замечаний или для ее сокращения датой представления статьи считается день получения редакцией журнала окончательного текста.

Принятые к публикации рукописи статей не возвращаются авторам.

Материалы, оформленные не в соответствии с указанными выше требованиями, не принимаются к публикации и не возвращаются.

Редакционный совет оставляет за собой право литературного редактирования статьи без согласования с авторами.

Научное издание

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

№ 2 (38) 2019

Научно-технический журнал «Известия Транссиба» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзором) 03 июня 2009 г., свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-75780 от 23 мая 2019 г.

Номер ISSN – 2220-4245.

Подписной индекс в общероссийском каталоге НТИ агентства «Роспечать» – 66087.

Издание обрабатывается в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦа).

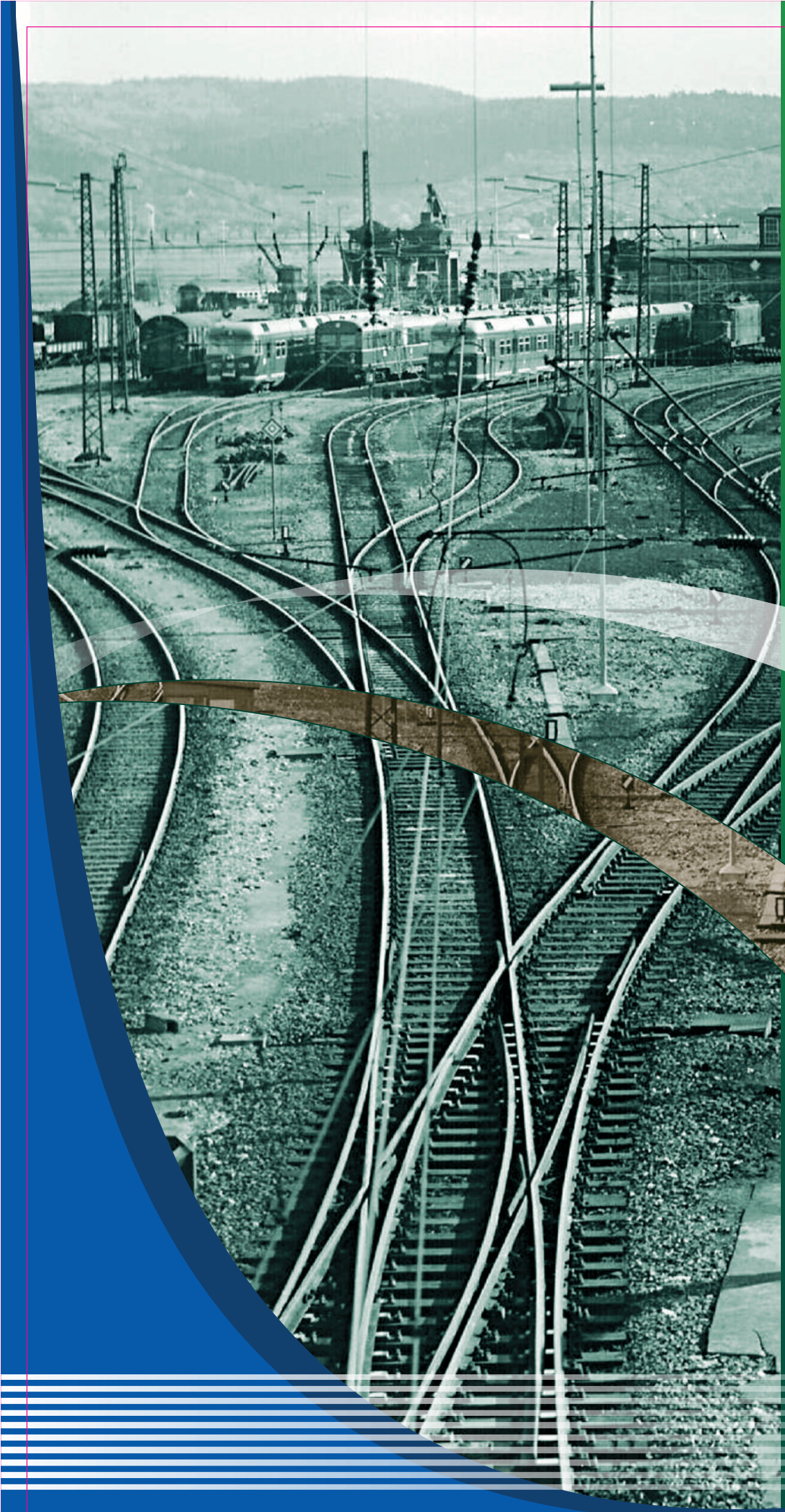
Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Издание выходит с периодичностью 4 номера в год.

Цена свободная.

Редактор – Майорова Н. А.
Компьютерная верстка – Иванченко В. И.

Адрес редакции (издательства) и типографии: 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35;
тел.: (3812) 31-05-54; e-mail: izvestia_transsiba@mail.ru

Подписано в печать 20.09.2019.
Тираж 500 экз.

Дата выпуска: 20.09.2019.