

ИЗВЕСТИЯ

№ 2(22)

2015

Транссиба



РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

1. Овчаренко Сергей Михайлович – главный редактор, ректор ОмГУПС, д.т.н., доцент.
2. Галиев Ильхам Исламович – зам. главного редактора, президент ОмГУПС, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ.
3. Шантаренко Сергей Георгиевич – зам. главного редактора, проректор по научной работе ОмГУПС, д.т.н., доцент.
4. Черемисин Василий Титович – зам. главного редактора, директор НИИЭ ОмГУПС, д.т.н., профессор.
5. Бокарев Сергей Александрович – проректор по научной работе СГУПС, д.т.н., профессор (Новосибирск).
6. Глинка Тадеуш – доктор, профессор Силезского политехнического университета (Гливице, Польша).
7. Демин Юрий Васильевич – профессор кафедры «Электрооборудование и автоматика» СГУВТ, д.т.н., профессор (Новосибирск).
8. Камаев Валерий Анатольевич – зав. кафедрой «Системы автоматизированного проектирования» ВолгГТУ, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ (Волгоград).
9. Каргапольцев Сергей Константинович – проректор по научной работе ИрГУПС, д.т.н., профессор (Иркутск).
10. Косарев Александр Борисович – зам. генерального директора ОАО «ВНИИЖТ», д.т.н., профессор (Москва).
11. Лю Цзянькунь – доктор, профессор Пекинского транспортного университета, Школа строительства (Пекин, Китай).
12. Сидоров Олег Алексеевич – зав. кафедрой «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПС, д.т.н., профессор.
13. Солоненко Владимир Гельевич – профессор кафедры «Вагоны» КазАТК, д.т.н., профессор (Алматы, Республика Казахстан).
14. Файзибаев Шерзод Сабирович – проректор по научной работе ТашИИТА, д.т.н., профессор (Ташкент, Республика Узбекистан).
15. Харламов Виктор Васильевич – зав. кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС, 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 – vice-rector for research of SSTU, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
6. Glinka Tadeusz – Ph. D., professor of Silesian University of Technology (Gliwice, Polish).
7. Demin Yuriy Vasilyevich – professor of the department «Electrical equipment and automation» of SSUWT, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
8. Kamaev Valery Anatolyevich – head of the department «Systems of automated designing» of VSTU, D. Sc., professor, the honored worker of science of the Russian Federation (Volgograd, Russia).
9. Kargapoltcev Sergey Konstantinovich – vice-rector for research of ISTU, D. Sc., professor (Irkutsk, Russia).
10. Kosarev Alexander Borisovich – deputy of general director of JSC «VNIIZhT» (Railway Research Institute), D. Sc., professor (Moscow, Russia).
11. Liu Jiankun – Ph. D., professor of Beijing Jiaotong University, School of Civil Engineering (Beijing, China).
12. Sidorov Oleg Alexeevich – head of the department «Power supply of rail transport» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
13. Solonenko Vladimir Gelyevich – professor of the department «Wagons» of KazATC, D. Sc., professor (Almaty, Kazakhstan).
14. Fayzibaev Sherzod Sabirovich – vice-rector for research of TashIIRE, D. Sc., professor (Tashkent, Uzbekistan).
15. Kharlamov Viktor Vasilyevich – head of the department «Electrical machines and common electrotechnic» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).

Захаренко Елена Игоревна – ответственный секретарь (Омск).

СОДЕРЖАНИЕ

Подвижной состав железных дорог

- Иванов П. Ю., Дульский Е. Ю., Худонов А. М. Состояние вопроса надежности и долговечности изоляции асинхронных вспомогательных машин 2
- Клока В. П., Стариков А. П., Кузьменко Д. Ю., Попов А. А. Испытание пассажирских вагонов железных дорог на теплоустойчивость 6
- Матяш Ю. И., Сосновский Ю. М., Петракова А. Г. Физико-химические основы оценки остаточного ресурса узлов и деталей грузовых вагонов железнодорожного транспорта 12
- Мухамедова З. Г. Динамическая модель для исследования продольных колебаний главной рамы электровоза с учетом установки демфирующего поглощающего аппарата в автосцепке 18
- Нехаев В. А., Николаев В. А., Челтыгмашев Е. П., Минжасаров М. Х. Методика исследования импульсного возмущения на железнодорожный экипаж от стыков рельсов 23
- Овчаренко С. М., Денисов И. Н., Минаков В. А. Расчет параметров работы центробежного фильтра масляной системы дизеля 33
- Харламов В. В., Шкодун П. К., Шестаков И. В. Тестирование межвитковой изоляции якорной обмотки тягового электродвигателя по методу волнового отклика 39
- Хлопцов А. С., Долгова А. В., Ахунов Д. А. Применение телевизионного метода для исследования тепловых процессов в зоне коллекторно-щеточного узла тягового электродвигателя подвижного состава 45
- Шантаренко С. Г., Кузнецов В. Ф., Юрасов О. Д. Особенности токосяема в коллекторно-щеточном узле тяговых электродвигателей электровозов 2ЭС6 53

Транспортная энергетика

- Ведрученко В. Р., Крайнов В. В., Жданов Н. В. Расчет процесса топливоподачи тепловозного дизеля на маловязком топливе 58
- Гателюк О. В., Комяков А. А., Эрбес В. В. Сравнительный анализ структур нечеткой нейронной сети для формирования модели электропотребления в системе тягового электроснабжения 64
- Ковалева Т. В., Пашкова Н. В. Исследование волновых процессов в контактной сети и линиях электропередачи 71
- Кондратьев Ю. В., Тарасенко А. В. Выбор мощности и места размещения устройств поперечной компенсации реактивной мощности 79
- Незевак В. Л., Шатохин А. П. Мониторинг выполнения норм удельной рекуперации в границах провольной зоны мониторинга участка постоянного тока 87
- Скоков Р. Б., Кремлев И. А., Тарабин И. В., Терехин И. А. Оценка условий электробезопасности заземления на рельс устройств тяговой сети в условиях применения изолирующих материалов при капитальном ремонте железнодорожного полотна 96
- Черемисин В. Т., Истомин С. Г. Разработка алгоритма определения причин ущерба и ответственных за него участников перевозочного процесса при невыполнении локомотивной бригадой удельной нормы электроэнергии на поездку 101

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

- Леденёв М. А. Программный модуль повышения качества изображений в задачах распознавания 110

Организация производства на транспорте

- Базилевич С. В., Зайцев А. В., Кузнецов С. М. Организационно-технологические показатели эксплуатации выправочно-подбивочно-рихтовочных машин циклического действия 115
- Хаманов И. Г., Щетинин А. Н., Евстегнеева А. А. Оптимизация методологических подходов к понятию «биологический фактор» применительно к железнодорожному транспорту 122

АННОТАЦИИ 131

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

Учредитель: Омский государственный университет путей сообщения

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35

Тел./факс: (3812) 31-13-44; e-mail: nauka@omgups.ru

УДК 629.4 (23.3:064.5)

П. Ю. Иванов, Е. Ю. Дульский, А. М. Худоногов

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ АСИНХРОННЫХ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МАШИН

В данной статье представлен анализ надежности асинхронных вспомогательных машин (АВМ) типа НВА-55 электровозов серии «Ермак» по депо ст. Вихоревка (ВСЖД) и ст. Смоляниново (ДВЖД) за 2009 – 2011 гг. Выявлены наиболее слабые с точки зрения надежности узлы и проанализированы основные виды и причины неисправностей данных типов АВМ. Одной из целей исследования надежности АВМ типа НВА-55 является определение средней наработки на отказ, позволяющей предотвратить отказы в работе при организации обслуживания и ремонта, а также продлить ресурс машины. Определение объективного математического ожидания отказа АВМ для эффективного корректирования межремонтных пробегов не представляется возможным, так как отказы имеют во многом случайный и непостоянный характер.

Надежность электровозов во многом зависит от стабильной работы тяговых электрических двигателей (ТЭД), силового трансформатора, выпрямительно-инверторного преобразователя, пневматических тормозов поезда. Исправная работа всех упомянутых узлов, агрегатов и машин обеспечивает реализацию максимальной производительности локомотива и позволяет осуществлять перевозку грузов с наибольшей участковой скоростью. Можно также отметить важную роль рекуперативного тормоза, позволяющего поддерживать стабильную максимально допустимую скорость при торможении на спусках благодаря постоянной тормозной силе, создаваемой на ТЭД. Работа всего названного силового оборудования невозможна без стабильной безотказной и надежной работы АВМ.

Надежность асинхронных машин, в свою очередь, зависит от электрической прочности их изоляции и качества эксплуатации [1]. Электрическая прочность изоляции зависит от температурного режима, вибрационных нагрузок и увлажнения. Качество эксплуатации зависит от симметрии, формы кривой токов и напряжений, питающих АВМ, а также от системы ремонта и технического обслуживания. Помимо этого важным фактором, влияющим на качество эксплуатации, часто отмечают сложные условия работы и недостаточно высокое качество ремонта [2], по причине чего наблюдаются множественные выходы АВМ из строя.

Из анализа статистики отказов можно увидеть, что 20 % от общего количества АВМ, эксплуатируемых на электровозах серии «Ермак», выходили из строя в течение пяти лет, причем из них более 73 % не доработали до 300 000 км пробега электровозов в первые два года эксплуатации (таблица 1).

Таблица 1 – Распределение отказов АВМ по пробегам

Интервалы наработок на отказ, км · 10 ³	Количество отказов на интервал, %
До 300	73,3
300 – 400	14
400 – 500	6,4
500 – 600	2,8
600 – 800	2,2
800 – 1000	1,3

Из статистики по распределению отказов по типу приводимых механизмов видно (рисунок 1), что наименьшей надежностью характеризуется двигатель мотор-компрессора (МК) – 50 % всех двигателей данного механизма вышли из строя и были заменены или прошли капитальный ремонт.

Отказы мотор-компрессора происходят по трем основным причинам: выплавление ротора, пробой изоляции статора, неисправность подшипников. За период эксплуатации МК переносит значительно большее количество пусков, однако пуски происходят легче, так как компрессор в пути следования запускается при уже работающих других вспомогательных машинах, что создает лучшие условия с точки зрения качества питающей энергии.

Практически такой же надежностью обладает и первый мотор-вентилятор (МВ1). Условия пуска МВ1 сложнее, чем у МК, по причине более сильных деструктивных воздействий на АВМ пусковых токов.

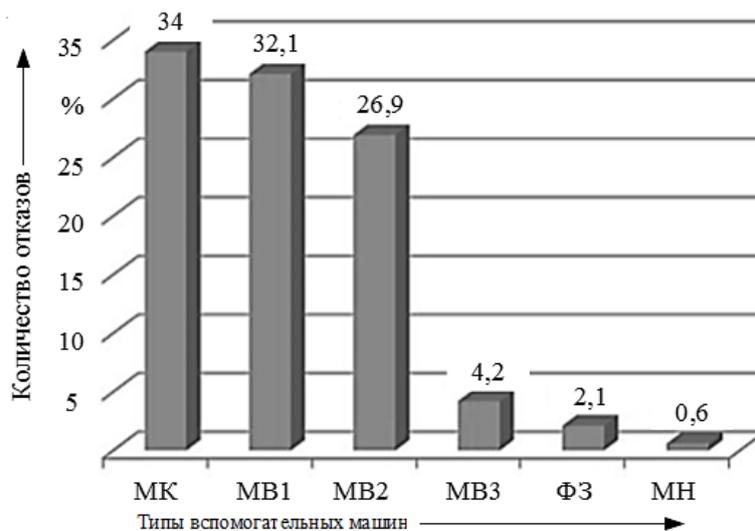


Рисунок 1 – Гистограмма распределения отказов по типу приводимого механизма

Рассмотрим надежность изоляции статорной обмотки АВМ. Гистограмма распределения отказов изображена на рисунке 2. Самая низкая надежность – у изоляции МВ1, что объясняется тяжелыми условиями пусков двигателя данного механизма из-за несовершенства системы фазорасщепления. На втором месте находится изоляция мотор-компрессора. Условия его работы также осложняются качеством энергии и разрушающим воздействием вибрации при повторно-кратковременном режиме работы.

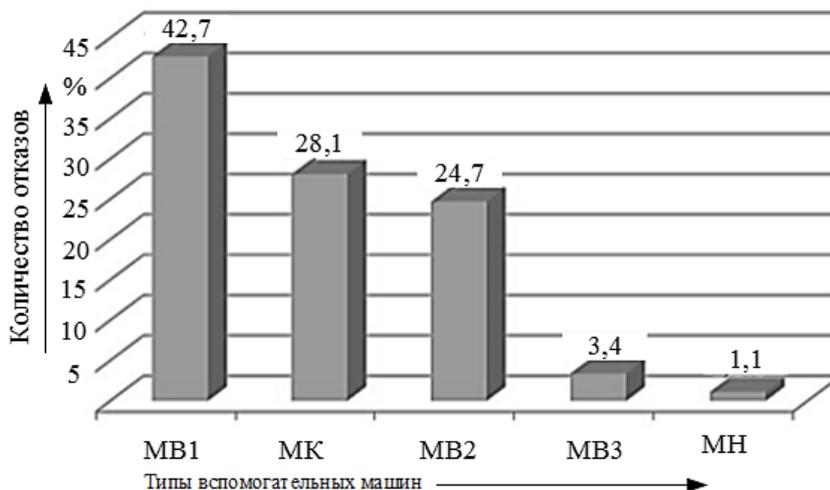


Рисунок 2 – Гистограмма распределения отказов АВМ по причине пробоя изоляции статорной обмотки

Проанализирована надежность АВМ электровозов серии «Ермак», поступивших в депо Вихоревка и Смоляниново за разные периоды времени.

Анализ статистики за 2006 – 2009 гг. показывает большое количество отказов АВМ типа НВА-55 по следующим причинам: выплавление ротора – 79 %, короткое замыкание в обмотке статора – 17, неисправность подшипника – 14 %. При этом общее количество отказов АВМ составило 537 случаев, средняя наработка до отказа – 143 319 км и параметр потока отказов – 6,96 случая на 10^6 км соответственно.

Плотность распределения отказов [2] в период 2006 – 2009 гг. соответствует экспоненциальному закону распределения, коррелируя с ним на 83,14 %. Графически это представлено на рисунке 3.

Анализ статистики отказов в период – с февраля по сентябрь 2010 г. показал распределение отказов по узлам в следующем соотношении: выплавление ротора – 43 %, КЗ обмотки статора – 39, неисправность подшипников 11, прочие причины – 3 %. Общее количество отказов за рассмотренный период составило 96 случаев, средняя наработка до отказа – 273 843 км, параметр потока отказов – 3,65 случая на 10^6 км. Случайная величина коррелировала с нормальным законом распределения на 70,3 % (рисунок 4).

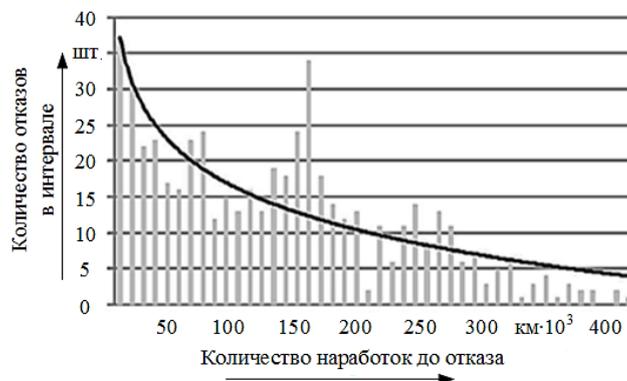


Рисунок 3 – Закон распределения отказов асинхронных вспомогательных двигателей электровозов серии «Ермак» приписного парка парка депо Вихоревка и Смоляниново за период с января 2007 по июль 2009 г.

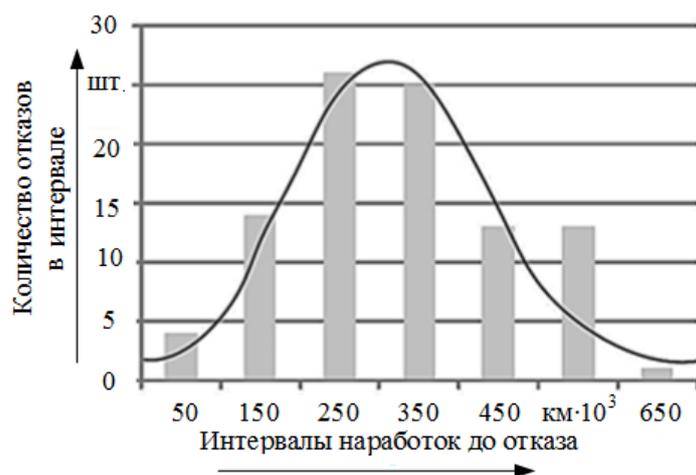


Рисунок 4 – Закон распределения отказов асинхронных вспомогательных двигателей электровозов серии «Ермак» приписного парка парка депо Вихоревка за период с февраля по сентябрь 2010 г.

Следующий анализируемый период – с сентября 2010 по март 2011 г. Основные причины отказов за данный период распределяются в следующем соотношении: выплавление ротора – 49, КЗ обмотки статора – 39, неисправность подшипников – 4, прочие причины – 8 %. Общее количество отказов за рассмотренный период составило 151 случай, средняя наработка до отказа – 275 713,7 км, параметр потока отказов – 3,63 случая на 10^6 км. В данном случае можно рассматривать в качестве закона χ -распределение (рисунок 5).

Время эксплуатации с 2006 по 2009 г. можно отнести к периоду приработки электровозов серии «Ермак», в течение которого выявляются конструктивные недоработки. Недостаточно эффективно работала система конденсаторного расщепления фаз (ФР). После неудачного начала эксплуатации с большим количеством отказов АВМ был предпринят ряд мер, в том числе решение о замене статического фазорасщепителя электромашинным («пусковой двигатель»). Полученная после модернизации схема практически не отличается от системы питания АВМ всех отечественных электровозов переменного тока. После модернизации отмечено снижение числа отказов с 2010 по 2011 г.

Количественные показатели надежности, такие как средняя наработка до отказа и параметр потока отказов за различные периоды времени, демонстрируют постоянство, что свиде-

тельствует о переходе к периоду, называемому в теории надежности «периодом нормальной эксплуатации». Плотность распределения отказов в данном периоде близка к нормальному закону, а математическое ожидание наработки до отказа постоянно и равно $27 \cdot 10^4$ км.

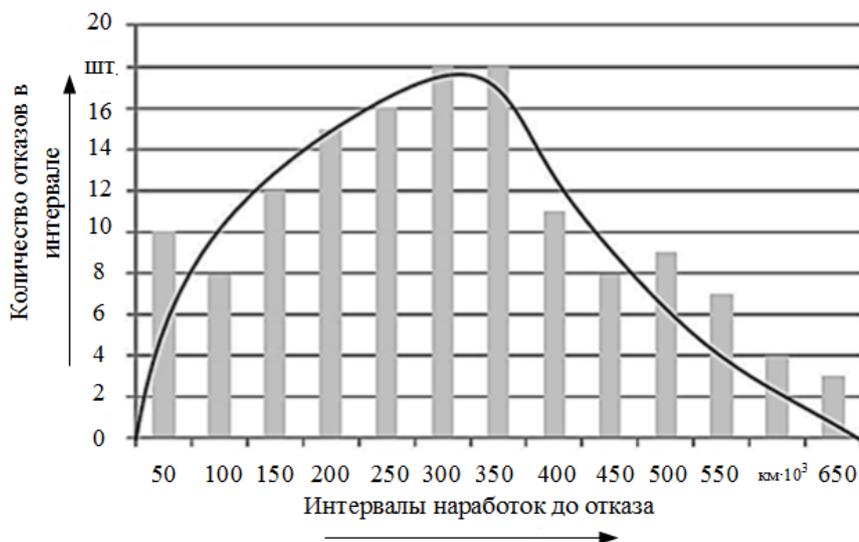


Рисунок 5 – Закон распределения отказов асинхронных вспомогательных двигателей электровозов серии «Ермак» приписного парка депо Вихоревка за период с сентября 2010 по март 2011 г.

На надежность АВМ влияют множество факторов, установление взаимодействий и степени влияния которых не представляется возможным. По этой причине законы распределения наработок до отказа имеют низкую корреляцию (степень достоверности) – 83,12; 70,3; 85,1 и не могут служить моделью для эффективного функционирования существующей системы планово-предупредительного ремонта.

Полученное математическое ожидание наработки до отказа $27 \cdot 10^4$ км на 32 % меньше срока первого ТР-3 и на 175,5 % меньше ресурса, заданного производителем, с предположительным коэффициентом использования локомотива 0,65.

Проведенный анализ надежности показал, что изоляция обмоток АВМ имеет низкий ресурс. Основными наиболее слабыми и выходящими из строя узлами АВМ являются статор – по причине пробоя изоляции (таблица 2), ротор – по причине выплавления стержней и неисправность подшипников, причем процентные соотношения данных групп отказов изменяются от года к году. Нарботка на отказ у выходящего из строя оборудования также невелика, и по этой причине эффективное использование ресурса АВМ в рамках существующей системы ремонта и обслуживания двигателей снижается.

Одной из целей исследования надежности АВМ является определение средней наработки на отказ, позволяющей предотвратить отказы в работе при организации обслуживания и ремонта, а также продлить ресурс машины. Определение объективного математического ожидания отказа АВМ для эффективного корректирования межремонтных пробегов не представляется возможным, так как отказы имеют во многом случайный, непостоянный характер.

Таблица 2 – Сводная таблица соотношений отказов АВМ по механизмам и по причинам за период 2006 – 2011 г.

Причина отказа	Тип механизма						Все машины
	МВ1	МВ2	МВ3	КМ	ФР	МН	
Пробой изоляции статора, %	74,85	82,86	81,82	77,97	27,27	33,33	65
Выплавление обмотки ротора, %	21,56	15,71	13,64	14,12	0,00	66,67	30
Неисправность подшипников, %	2,40	1,43	4,55	6,78	72,73	0,00	4,5
Прочее, %	1,20	0,00	0,00	1,13	0,00	0,00	0,5

Список литературы

1. Анализ надежности асинхронных вспомогательных машин при различных системах фазорасщепления [Текст] / Н. Н. Гарев, П. Ю. Иванов и др. // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока / Новосибирская гос. акад. водного транспорта. – Новосибирск. – 2012. – № 1. – С. 348 – 351.

2. Худоногов, А. М. Контроль качества эксплуатации асинхронных вспомогательных машин электровозов [Текст] / А. М. Худоногов, П. Ю. Иванов // Вестник Иркутского гос. техн. ун-та / Иркутский гос. техн. ун-т. – Иркутск. – 2013. – № 4 (75). – С. 106 – 110.

References

1. Garev N. N., Ivanov P. Yu., Vyzhimova V. N., Dul'skii E. Yu. Reliability analysis of asynchronous auxiliary machines at different phase splitting systems [Analiz nadezhnosti asinkhronnykh vspomogatel'nykh mashin pri razlichnykh sistemakh fazorasshchepleniia]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka – Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East*, 2012, no. 1, pp. 348 – 351.

2. Khudonogov A. M., Ivanov P. Yu. Quality Control operation of asynchronous electric auxiliary machines [Kontrol' kachestva ekspluatatsii asinkhronnykh vspomogatel'nykh mashin elektrovozov]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2013, no. 4 (75), pp. 106 – 110.

УДК 629.45/46

В. П. Клюка, А. П. Стариков, Д. Ю. Кузьменко, А. А. Попов

ИСПЫТАНИЕ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ НА ТЕПЛОУСТОЙЧИВОСТЬ

В статье рассмотрен наиболее эффективный способ выявления тепловых потерь, связанных с неплотностью ограждающих конструкций. Предлагается метод по использованию аэродинамических и термодинамических исследований с возможностью применения на железнодорожном транспорте.

Одной из основных задач современного процесса перевозки пассажиров на железнодорожном транспорте является обеспечение санитарных норм и комфортных условий в поезде. Для этого пассажирский вагон оснащен системами отопления, водоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха. Существенные затраты энергетических ресурсов идут на поддержание работоспособности этих систем. Техническое состояние кузова, способность ограждающих конструкций сохранять микроклимат внутри вагона во многом определяют эффективность и экономичность работы его систем жизнеобеспечения.

На теплоустойчивость вагона влияют герметичность и теплопроводность оболочки. Герметичность оценивается объемом проникновения воздуха через ограждающие конструкции вагона из окружающей среды в помещение за счет ветрового и теплового напора, формируемого разностью температур и перепадом давления воздуха снаружи и внутри помещения. Герметичность зависит от плотности примыкания элементов конструкции вагона и от воздухопроницаемости материала стенок. Теплопроводность оболочки определяется толщиной слоя теплоизолятора, его свойствами, влажностью, плотностью заполнения межстеночного пространства, наличием металлических несущих элементов, выступающих в роли «термических мостиков» [1].

Надежная теплоизоляция пассажирских вагонов имеет решающее значение для снижения затрат на отопление. Температура поверхности стен, пола и потолков оказывает существенное влияние на создание комфорта в помещении вагона, а также на его сохранность. Достаточная изоляция способствует повышению качества перевозки пассажиров и поддерживает вагон в надлежащем состоянии.

Комфортное помещение вагона возможно лишь при условии, если в нем будут поддерживаться соответствующие температура и влажность [2]. Конденсацию влаги, пятна сырости и образование термических трещин можно эффективным образом предотвратить, если использовать изолирующие материалы.

Недостаточное внимание к теплоизоляции мест примыкания приводит к значительным потерям тепла, конденсации влаги, росту плесени и грибов, образованию трещин. Сравнение стоимости работ по изоляции с полученными преимуществами показывает, что теплоизоляция является экологически и экономически выгодным вложением капитала. Однако следует отметить то, что должны соблюдаться физические и технические принципы конструкции вагонов, а также то, что следует использовать изоляционные материалы высокого качества. Качество теплоизоляции зависит от многих свойств используемых материалов. Например, величина водопоглощения теплоизоляционных материалов (гидрофильность) значительно влияет на теплопроводность материалов и теплотехнические качества кузова вследствие того, что при эксплуатации вагона влага за счет процессов диффузии проникает в изоляционный слой и скапливается в нем в виде конденсата. Чем выше гидрофильность материала, тем больше влаги скапливается и тем хуже становятся теплотехнические качества материала вследствие возрастания коэффициента теплопередачи.

Теплоизоляция является одним из важнейших элементов конструкции кузова. Поэтому к теплоизоляционным материалам, используемым для теплоизоляции кузовов пассажирских вагонов при их строительстве и капитально-восстановительных ремонтах, предъявляются жесткие требования, регламентированные нормами ОСЖД (Памятка ОР538/1):

- негорючесть;
- виброустойчивость и механическая прочность;
- нетоксичность (вещества, выделяемые изоляцией в воздушную среду вагона, не должны превышать установленных значений ПДК);
- стабильность физико-технических качеств в условиях эксплуатации;
- устойчивость формы при колебаниях температуры окружающей среды в диапазоне от минус 65 до плюс 75 °С;
- однородность структуры материала;
- технологичность при укладке в ограждающие конструкции кузова вагона;
- обеспечение устойчивости к коррозии металла, соприкасающегося с теплоизоляцией;
- объемная масса – не более 50 кг/м³;
- коэффициент теплопроводности при температуре 20 °С – не более 0,040 Вт/(м·К);
- максимальное сорбционное увлажнение – не более 5 % по массе;
- изолированный теплоизоляцией кузов пассажирского вагона должен иметь средний коэффициент теплопередачи в стационарных условиях не более 1,0 Вт/(м²·К), и эта величина после шести лет эксплуатации не должна увеличиваться более чем на 10 %.

Показатели водопоглощения, прочности и сохранности линейных размеров всегда дополнительно согласовываются с заказчиком.

Срок службы теплоизоляции должен соответствовать сроку службы вагона, т. е. 28 лет.

По назначению теплоизоляция вагонов разделяется на несколько видов:

- для обеспечения допустимого уровня потерь тепла (теплоизоляция кузова);
- для предотвращения конденсации влаги (системы водоснабжения, вентиляции, отопления);
- для создания санитарно-гигиенических условий (изоляция энергетических и холодильных агрегатов);

– для предотвращения возгораний (системы отопления).

В эксплуатации свойства теплоизоляции меняются из-за старения под действием температуры, увлажнения, вибрации, коррозии и т. д. Поэтому при постройке и после капитальных ремонтов проводится диагностирование технического состояния ограждающих конструкций кузовов по трем критериям:

- относительная герметичность;
- средний коэффициент теплопередачи всего кузова;
- способность обеспечивать функционирование в разных эксплуатационных условиях.

В летнее время в пассажирском вагоне работает кондиционер и задача ограждающих конструкций сводится к ограничению проникновения тепла внутрь вагона. В зимний период процесс теплопереноса идет в обратном направлении. В обоих случаях решается задача максимального снижения переноса тепла через стенки вагона. Назначение системы кондиционирования воздуха пассажирского вагона состоит в поддержании параметров воздуха в вагоне на определенном комфортном уровне, регламентированном государственными стандартами.

Установлены следующие требования к параметрам воздуха в вагоне:

- температура воздуха 22, 26 °С;
- относительная влажность 40, 60 %;
- минимальное количество подаваемого в вагон свежего воздуха на одного пассажира летом 25, зимой 20 м³/ч;
- максимально допустимое содержание пыли 1 мг/м³;
- максимально допустимое содержание углекислого газа 0,1 % по объему.

С целью создания оптимальных санитарно-гигиенических условий система кондиционирования пассажирского вагона должна быть оснащена оборудованием для вентиляции, охлаждения, отопления, автоматического управления, регулирования и защиты, очистки воздуха, энергоснабжения.

Цельнометаллические пассажирские вагоны оборудованы устройствами, которые обеспечивают естественную и искусственную вентиляцию в помещениях. Естественная вентиляция вагонов летом происходит через опускаемые окна, форточки и потолочные вытяжные дефлекторы; зимой естественная вентиляция может осуществляться только через дефлекторы. Равномерный воздухообмен с помощью дефлекторов обеспечить невозможно, так как их пропускная способность изменяется в широких пределах в зависимости от скорости набегающего потока воздуха, который в свою очередь зависит от скорости движения поезда, силы и направления ветра, а также от температурного напора внутри вагона.

Эффективность работы теплоизоляции вагона непосредственно определяет расход энергоресурсов на отопление и кондиционирование. Таким образом, оценка теплоустойчивости вагона является важной технической задачей.

Существуют несколько методов, позволяющих оценить фактическое состояние теплоизоляционных свойств и характеристик вагона [3].

Информационно-измерительная система «Поиск». С помощью электроотопительных приборов или холодильной установки, смонтированных внутри испытываемого рефрижераторного (пассажирского) вагона, первоначально соответственно нагревают или охлаждают внутренние поверхности ограждений. После этого между ними и окружающей средой возникает перепад температур, а в местах нарушения состояния изоляции – локальные искажения температурного поля. Система «Поиск» как бы построчно сканирует контролируемую поверхность, осуществляя анализ температурного поля.

Разработанная методика определения коэффициента теплопередачи кузова вагона позволяет не только избежать одной из очень трудоемких операций – разборки внутренней обшивки кузова для выявления участков с пониженной изоляцией, но и оценить качество выполненного ремонта ограждающих конструкций кузова, произведенного со сменой теплоизоляционного материала. К недостаткам системы следует отнести невозможность диагностирования качества теплоизоляции торцевых стен и пола.

Более совершенным методом определения дефектов теплоизоляции без вскрытия элементов кузова является способ, основанный на *детальном измерении инфракрасного излучения (ИК-излучения)*. Реализация данного способа стала возможной в настоящее время благодаря появлению новых тепловизоров (ИК-радиометров).

Пирометры и тепловизоры – приборы для бесконтактного измерения инфракрасного излучения, распространяемого от нагретого тела. Количество излучаемой энергии зависит от температуры, состояния поверхности и ее излучающей способности. Излучаемая энергия распределяется во всем электромагнитном спектре. Однако для любого предмета с определенной температурой имеется только одна длина волны, для которой излучаемая энергия является максимальной.

Пирометры предназначены для точечного измерения температуры, а тепловизоры воспроизводят картину распределения тепловых полей по поверхности объекта.

Полученная информация позволяет не только количественно оценить величину теплопотерь через участки ограждающих элементов, но и внести коррективы в конструкторскую документацию при проектировании теплоизолированного кузова.

Использование испытательных станций, например, *климатическая аэродинамическая труба*, которая предоставила возможность создания «искусственных» погодных условий, цель которых заключалась в оценке теплового баланса пассажирских вагонов, специальных грузовых вагонов и вагонов-рефрижераторов. Эти исследования предусматривали определение потребности в тепле, тепловых потерь, коэффициент теплопередачи и показателей комфорта в салонах пассажирских вагонов.

Однако действие только одних климатических испытаний не является достаточным.

Методик определения состояния теплоизоляции вагона не существуют, но в строительной индустрии приняты следующие стандарты:

ГОСТ Р 54852-2011. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций;

ГОСТ 31167-2009. Метод определения воздухопроницаемости ограждающих конструкций в натуральных условиях;

ГОСТ 26254-84. Метод определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций.

Обследование теплосохраниющих свойств зданий как с помощью тепловизора, так и с помощью других приборов эффективно применяется для выявления потерь тепла и разработки энергосберегающих мероприятий. Эксперименты в этой области показали хорошую эффективность.

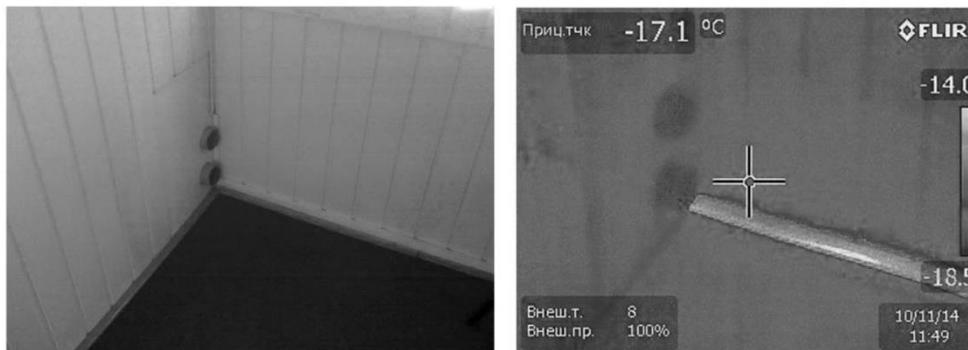
Для подвижного состава железных дорог требуется специфический подход, учитывающий особенности конструкции вагона, условия эксплуатации при высоких скоростях движения. Кроме того, длительная эксплуатация вагона приводит к изменению характеристик и снижению теплоизоляционных свойств. Для получения фактической картины теплового состояния вагона необходимо проводить комбинированный теплотехнический эксперимент с использованием аэродинамического испытания, которое ранее не применялось для исследования теплоизоляционного состояния пассажирских вагонов, а использовалось только для тестирования на утечки воздуха в ограждающих конструкциях зданий.

Аэродинамическое исследование – это новшество в тестировании вагонов на наличие неплотностей в теплоизоляции, которое проводится с использованием комплекта специального диагностического оборудования, основными компонентами которого являются измерительный вентилятор большой мощности и цифровой двухканальный манометр, отслеживающий изменение давления воздуха и управляющий работой вентилятора.

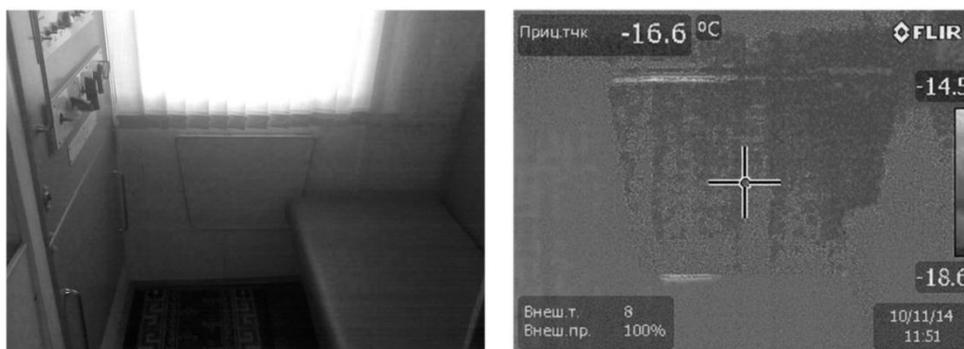
Использование аэродинамического испытания в сочетании с тепловизионным обследованием – гарантия выявления многих скрытых дефектов, вызывающих ускоренное разрушение несущих конструкций и являющихся главной причиной повышенных затрат на отопление (кондиционирование). Обнаружение этих дефектов каким-либо другим способом невозможно.

На базе полигона действующей железнодорожной техники ОмГУПСа было произведено комбинированное исследование вагона:

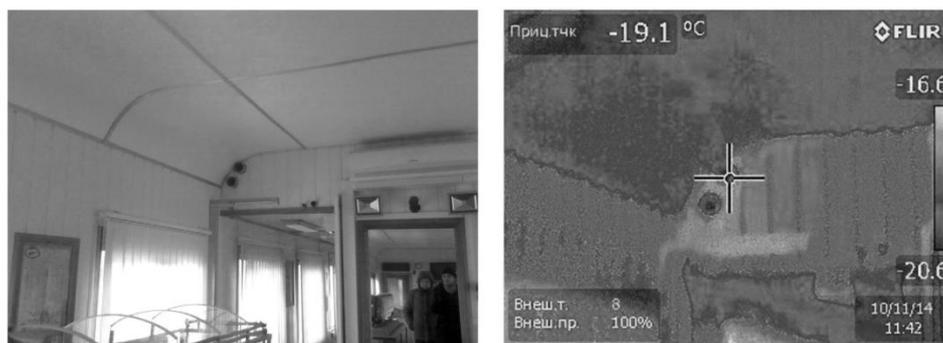
первый этап состоял из тепловизионного обследования пассажирского вагона модели 61-4170 «Тверской экспресс» с использованием тепловизора Flir E60 для получения сравнительных данных, в результате чего были получены термограммы, представленные на рисунке 1.



а



б



в

Рисунок 1 – Результаты тепловизионного обследования вагона с использованием тепловизора Flir E60

Визуально исследуемый объект представляется на термограмме, там мы видим места, где происходят утечки. Отдельные фрагменты термограммы имеют разную окраску, она зависит от интенсивности излучения инфракрасной части спектра;

вторым этапом было проведено обследование с применением аэродинамического испытания с использованием аэродвери Retrotec EU1000 и тепловизора Flir E60.

Технически аэродинамический метод представляет собой перегородку со встроенным вентилятором, которая устанавливается в дверной проем, вентилятор включается, повышая

или понижая давление внутри помещения. Воздух начинает проходить сквозь недостаточно герметичные стыки, температура воздушной массы отличается от температуры окружающей среды, эту разницу фиксируют приборы.

На фотографиях рисунка 2 видны результаты тепловизионного обследования с использованием аэродинамического метода.

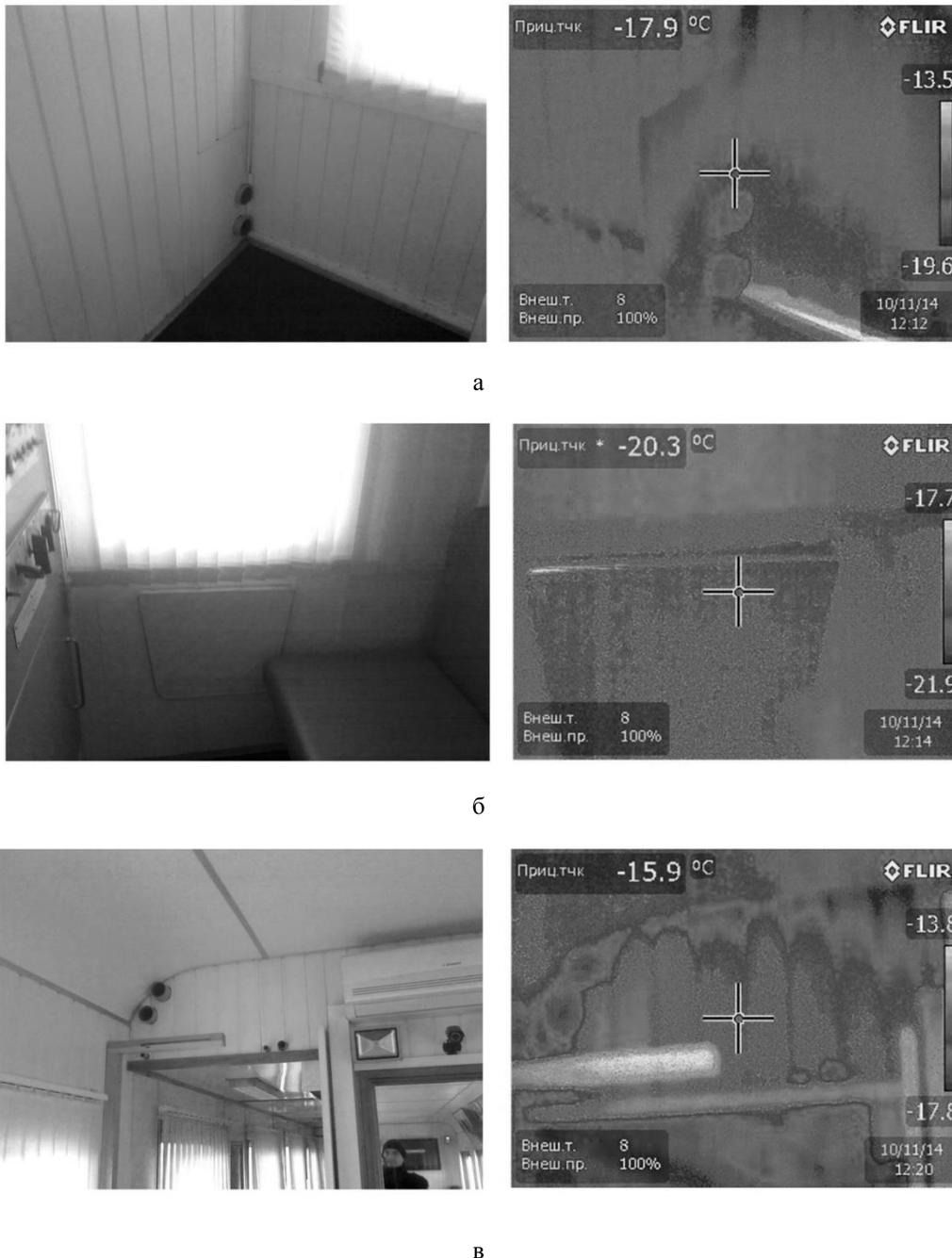


Рисунок 2 – Результаты тепловизионного обследования вагона с применением аэродинамического испытания

При проведении сравнительного анализа результатов комбинированного теплотехнического эксперимента было выявлено снижение температуры в месте стыков приблизительно на 2,1 °С, на рисунке 1, а температура стыков – примерно 17,5 °С, на рисунке 2, а – 19,6 °С, наблюдалось понижение средней температуры на 3,2 °С (рисунки 1, 2, б), что говорит о негерметичности теплоизоляционного слоя кузова вагона. На рисунке 1, в видно более равномерное, светлое окрашивание примыкающей стенки, после проведения аэродинамического

метода исследования были выявлены темные области в местах стыков, в которых теплоизоляция имеет неплотности и нуждается в ремонте (рисунок 2, в).

На основе проведенного исследования можно сделать выводы.

1. Использование одного только тепловизора для выявления теплопотерь недостаточно, так как он не дает полной информации о состоянии теплоизоляции вагона.

2. Применение аэродинамического метода исследования дает более полную картину о нарушении теплоизоляционного слоя (наблюдается изменение температуры в местах стыков, проявляются темные области, указывающие на места с нарушением герметичности).

3. Внедрение аэродинамического испытания необходимо, так как оно упростит контроль за состоянием ограждающих конструкций вагона, ускорит процесс нахождения неплотностей в теплоизоляции, что улучшит микроклимат внутри вагона и повысит экономичность работы его систем жизнеобеспечения.

Список литературы

1. Жариков, В. А. Климатические системы пассажирских вагонов [Текст] / В. А. Жариков. – М.: ТрансИнфо, 2006. – С. 10 – 21.

2. Матяш, Ю. И. Перспективы развития систем индивидуального регулирования микроклимата в пассажирских вагонах железнодорожного транспорта [Текст] / Ю. И. Матяш, А. Д. Родченко // Материалы VI науч.-практ. конф. «Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте» / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2012. – С. 152 – 156.

3. Техническая диагностика вагонов [Текст] / Р. А. Ахмеджанов, В. Ф. Криворудченко и др. / Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте. – М., 2013. – С. 67 – 80.

References

1. Zharikov V. A. *Klimaticheskie sistemy passazhirskikh vagonov* (Climate systems for passenger cars). Moscow: TransInfo, 2006, pp. 10 – 21.

2. Matiash Iu. I. Prospects for the development of systems of individual control of microclimate in the passenger rail transport wagons [Perspektivy razvitiia sistem individual'nogo regulirovaniia mikro-klimata v passazhirskikh vagonakh zheleznodorozhnogo transporta]. *Materials VI scientific-practical conference «Innovative projects and new technologies in education, industry and transport»* (Materialy VI nauchno-prakticheskoi konferentsii «Innovatsionnye proekty i novye tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte»). – Omsk, 2012, pp. 152 – 156.

3. Akhmedzhanov R. A., Krivorudchenko V. F. *Tekhnicheskaiia diagnostika vagonov* (Technical diagnostics of cars). Moscow: Training Center on Education for iron-nodorozhnom transport, 2013, pp. 67 – 80.

УДК 629

Ю. И. Матяш, Ю. М. Сосновский, А. Г. Петракова

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА УЗЛОВ И ДЕТАЛЕЙ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Показано, что в процессе эксплуатации под воздействием повышенных знакопеременных нагрузок происходит изменение физико-механических свойств металлов, которое приводит к снижению ударной вязкости. Предлагается новый подход для оценки остаточного ресурса тяжело нагруженных деталей и узлов грузовых вагонов железнодорожного транспорта на основе изучения структурных изменений металлов в процессе их

эксплуатации. На основе контроля структурных изменений металлов в процессе их эксплуатации может быть создана эффективная система оценки остаточного ресурса.



Рисунок 1 – Следствие излома боковой рамы тележки

Проблема обеспечения безопасности движения на железнодорожном транспорте является одной из приоритетных задач не только в России, но и в других странах, для которых железная дорога играет ключевую роль в развитии экономики. Одной из наиболее часто встречающихся видов аварий на железной дороге является сход подвижного состава с рельсов, являющийся следствием излома боковой рамы тележки грузового вагона. В качестве примера на рисунке 1 показаны последствия излома правой боковой рамы второй тележки в зоне внутреннего радиуса R-55 буксового проема, произошедшего 27 февраля 2010 г. на пе-

регоне Балезино – Глазов Горьковской железной дороги. Данный вагон был построен Алтайским вагоностроительным заводом (ВСЗ) и введен в эксплуатацию 9 июля 2008 г.

Согласно статистике общее количество изломов боковых рам с 2006 г. по сентябрь 2014 г. составило 142 случая. При этом если в 2006 г. произошло семь случаев изломов, то за 2013 г. – 23. Тенденция при этом продолжает оставаться негативной.

По данным пресс-службы ОАО «РЖД» наиболее частой причиной изломов боковых рам в эксплуатации является образование и развитие усталостных трещин в наиболее нагруженных местах и наличие металлургических дефектов.

К наиболее распространенным практическим методам выявления дефектов относятся визуальный осмотр, ультразвуковой и магнитопопорошковый методы. При этом оценка механических свойств металла на ремонтных предприятиях ОАО «РЖД» не производится. Это связано с отсутствием оборудования, позволяющего обнаружить изменение структуры металла, механических свойств и возможности прогнозирования поведения детали в процессе эксплуатации [1].

Прогнозирование остаточного ресурса в основном базируется на построении качественных и количественных интерполяционных зависимостей каких-либо измеряемых параметров, изменение которых связано с условиями эксплуатации. Так, например, в работе [2] используется модель циклической деградации свойств материала, не учитывающая структурных изменений. При этом разработка методов оценки влияния различных факторов на средний ресурс остается актуальной задачей [3]. Не всегда удается установить точные значения параметров детали или узла, при которых их состояние можно считать критическим. Участвовавшие случаи крупномасштабных происшествий в последние годы говорят об отсутствии достоверных методик диагностики и контроля остаточного ресурса основных деталей и узлов грузовых вагонов железнодорожного транспорта.

Большая часть деталей и узлов грузовых вагонов работает в условиях знакопеременных или циклических нагрузений в области упругой деформации при нормальных условиях. К основным закономерностям процесса усталостного разрушения металлов при циклических нагружениях можно отнести следующие.

1. Циклическая нагрузка вызывает разрушение металлов при напряжении не только меньшем предела прочности, но и меньшем пределов текучести и упругости. Чем ниже напряжение, тем больше нужно приложить смен (циклов) напряжений, чтобы вызвать разрушение образца. Зависимость между напряжением и числом циклов, вызывающим разрушение образца, изображается в виде усталостной кривой (кривая Велера) [4].

2. Разрушение металла под действием циклической нагрузки носит локальный характер. Чаще всего очаги разрушения образуются на поверхности, если же поверхность подвергнута

упрочнению, то очаги усталостного разрушения могут образовываться и под поверхностью.

3. Способность металла сопротивляться повторным знакопеременным нагрузкам характеризуется циклической вязкостью металла, т. е. способностью металлов поглощать энергию в необратимой форме. Кривые деформации при нагружении и разгрузении не совпадают между собой, а образуют петлю гистерезиса. Площадь петли гистерезиса характеризует ту работу, которую металл способен поглотить в необратимой форме за один цикл.

4. Согласно теории кинетической прочности [5] процесс разрушения на начальной стадии следует рассматривать как процесс, в котором вследствие тепловых флуктуаций преодолевается энергетический барьер U_0 , значение которого может быть уменьшено в результате действия внешних напряжений σ :

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}\right), \quad (1)$$

здесь τ – время между двумя последовательными флуктуациями; τ_0 – период собственных тепловых колебаний атома; γ – структурный фактор; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; σ – внешнее напряжение. Как видно из формулы (1), внешняя нагрузка σ и повышение температуры приводят к повышению вероятности флуктуационного перехода.

5. Период зарождения усталостных трещин, согласно источнику [4], можно разделить на три основные стадии: циклической микротекучести, циклической текучести и циклического упрочнения (разупрочнения). Склонность металлов к циклическому упрочнению или разупрочнению определяется отношением предела прочности σ_B к условному пределу текучести $\sigma_{0,2}$. Если отношение $\sigma_B / \sigma_{0,2} \leq 1,2$, то происходит разупрочнение, при $\sigma_B / \sigma_{0,2} \geq 1,4$ происходит упрочнение, при $1,2 \leq \sigma_B / \sigma_{0,2} \leq 1,4$ может происходить как упрочнение, так и разупрочнение. На первых двух стадиях, хотя и происходят изменения в структурном состоянии, механические свойства металлов практически не меняются. На стадии же циклического упрочнения или разупрочнения происходит интенсивное изменение механических свойств.

В настоящее время для производства боковых рам тележек грузовых вагонов используется сталь марки 20ГЛ. Согласно ГОСТ 21357-87 основной химический состав стали (в %) приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав стали 20ГЛ

C	Si	Mn	S	P
0,15 – 0,25	0,2 – 0,4	1,2 – 1,6	До 0,04	До 0,04

Режимы термической обработки стали при производстве включают в себя нормализацию (880 – 900 °С, отпуск 600 – 650 °С) или закалку (870 – 890 °С, отпуск 620 – 650 °С).

При нормальных условиях углерод находится в состоянии твердого раствора с железом и в виде химического соединения – цементита (Fe_3C). Увеличение процентного содержания С в стали приводит к росту карбидной фазы, следовательно, к увеличению твердости, прочности и к снижению пластичности и вязкости стали.

С физической точки зрения увеличение доли углерода приводит к повышению электросопротивления и коэрцитивной силы, снижению магнитной проницаемости.

Согласно учебному пособию [6] количественная мера упрочнения феррита при легировании различными химическими элементами может быть найдена по выражению:

$$\sigma_{TP} = \sum_{i=1}^n k_i \cdot C_i, \quad (2)$$

здесь σ_{TP} – вклад легирующих элементов; k_i – коэффициент упрочнения феррита при растворении в нем i -легирующего элемента; C_i – концентрация i -легирующего элемента, растворенного в феррите. Значения коэффициентов упрочнения k_i приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения коэффициентов упрочнения феррита различными растворенными в нем элементами

Элемент	C	P	Si	Mn	Cr	Mo
k_i , МПа/%	4670	690	86	33	31	11

Как видно из данных таблицы 2, наибольший упрочняющий эффект связан с углеродом.

С точки зрения физики растворенные в феррите элементы в исходном состоянии приводят к тому, что образуется неравновесная термодинамическая система, которая постепенно стремится перейти в равновесное состояние. Основным механизмом такого перехода является диффузия легированных элементов. Скорость диффузии в этом случае будет определяться выражением (1) и будет существенно зависеть от внешнего напряжения, понижающего потенциальный барьер температуры.

Возможны два механизма выхода углерода:

- диффузия атомов углерода к дислокациям и границам зерен;
- образование и рост карбидов.

Диффузия атомов углерода к дислокациям приводит к разупрочнению феррита, он становится «мягче», сталь становится пластичнее. Рост карбидов, напротив, приводит к тому, что доля «жесткой» фазы в стали увеличивается, повышается суммарная твердость, происходит охрупчивание. Именно это состояние является наиболее опасным и критическим. Вероятность хрупкого разрушения становится наибольшей.

Дополнительным фактором, влияющим на диффузионный процесс, является размер зерна. Чем меньше размер зерна, тем быстрее идет процесс диффузии. Углероду надо пройти меньший путь для выхода на границу зерен. Соответственно концентрация углерода также оказывает определенное влияние. Чем больше углерода, тем быстрее идет процесс диффузии.

Косвенным подтверждением высказанного предположения являются результаты диссертационного исследования, приведенные в источнике [7]. Автор исследовал и проанализировал разрушение более 300 деталей автосцепных устройств вагонов железнодорожного транспорта. В частности, было установлено,

что процесс деградации (охрупчивания) прочностных свойств материала деталей (та же сталь марки 20ГЛ) весьма стабилен и устойчив;

степень деградации (охрупчивания) прочностных свойств материала детали можно оценивать по изменению его твердости.

Дополнительным подтверждением высказанного предположения являются результаты, приведенные в работе [8]. Объектом исследования в этой работе являлась реакционная колонна одного из нефтехимических заводов, изготовленная из углеродистой стали 20 с антикоррозийным медным покрытием. Рабочие параметры эксплуатации колонны составили давление 8 МПа и температура 300 °С. В частности, было отмечено, что под воздействием эксплуатационных факторов происходит изменение структуры и механических свойств материала (охрупчивание). Приведенный пример показывает, что изменение структуры и механических свойств материала (охрупчивание) происходит не только при знакопеременных нагрузках, но и при воздействии статических нагрузок.

Создание объективного контроля за техническим состоянием тяжело нагруженных деталей и узлов грузового вагона железнодорожного транспорта предполагает разработку методики оперативного и достоверного диагностирования. Одним из вариантов такого контроля может быть метод, основанный на изменении физико-химических свойств металлов, в частности, на характере изменения структурной рыхлости стали, являющейся показателем ее термодинамической стабильности.

В научной литературе и, в частности, в работе [9] представлено достаточно большое количество корреляционных зависимостей физических параметров от структурной рыхлости.

Формула структурной рыхлости ω кристаллического вещества имеет вид [9]:

$$\omega = \frac{M}{n \cdot \rho}, \quad (3)$$

где M – молекулярная масса; n – число структурных узлов (атомов, ионов, комплексов) в формульной единице соединения; ρ – плотность вещества.

Рыхлость косвенно характеризует энергию межатомного взаимодействия. Чем прочнее химические межатомные связи и больше их энергия, тем более отчетливо проявляется эффект «стягивания» атомов в компактную кристаллическую решетку (структуру) и тем меньше будет соответствующая величина ее структурной рыхлости [9]. Слабые химические связи соединения говорят о меньшей энергии их соединения и, следовательно, о большей структурной рыхлости.

В качестве примера приведем расчет структурной рыхлости карбида железа Fe_3C :

$$\omega_1 = \frac{55,849 \cdot 3 + 12,011}{4 \cdot 7,82} = 5,74 \frac{\text{см}^3}{\text{г} \cdot \text{атом}}.$$

Для феррита, у которого в ОЦК-решетке находится, например, один атом углерода, рыхлость можно рассчитать так:

$$\omega_2 = \frac{55,849 + 12,011}{2 \cdot 7,86} = 4,32 \frac{\text{см}^3}{\text{г} \cdot \text{атом}}.$$

Если в ОЦК-решетке феррита находятся два атома углерода, то

$$\omega_3 = \frac{55,849 + 2 \cdot 12,011}{3 \cdot 7,86} = 3,39 \frac{\text{см}^3}{\text{г} \cdot \text{атом}}.$$

Интегрированная рыхлость стали в общем случае может быть найдена по формуле:

$$\omega = x_1 \omega_1 + x_2 \omega_2 + \dots, \quad (4)$$

где x_1 – доля карбида железа в стали; x_2 – доля феррита с растворенным в решетке одним атомом углерода; ω_1 и ω_2 рыхлость соответствующей фазы. В принципе сумма (4) может быть дополнена другими включениями.

При диффузии углерода доля карбида x_1 может меняться в сторону увеличения, а доля x_2 легированного феррита – в сторону уменьшения. В зависимости от того, какое слагаемое в выражении (4) растет быстрее, будет изменяться и общая структурная рыхлость. При охрупчивании стали рыхлость уменьшается.

Выбор параметра рыхлости был обусловлен прежде всего тем, что в научной литературе и, в частности, в работе [9] представлено достаточно большое количество корреляционных зависимостей физических параметров от структурной рыхлости: 1) температуры плавления, 2) относительной твердости, 3) абсолютной твердости по Викерсу, 4) поверхностной энергии, 5) модуля Юнга, 6) модуля сдвига, 7) модуля всестороннего объемного сжатия, 8) коэффициентов теплового линейного и объемного расширения, 9) объемной сжимаемости, 10) скорости распространения звука, 11) показателя преломления, 12) трещиностойкости, 13) эффективной энергии разрушения, 14) пограничной межатомной электронной плотности, 15) кристаллических электроотрицательностей, 16) работы выхода электрона, 17) теплопроводности, 18) максимальной частоты колебания атомов, 19) теплоемкости. Не исключено, что приведенный список физических параметров может быть расширен с выводом соответствующей зависимости.

В качестве примера на рисунке 2 приведен график зависимости модуля Юнга от структурной рыхлости, построенный по корреляционной зависимости:

$$E = 6692,3 \cdot \omega^{-1,86}. \quad (5)$$

Из рисунка 2 видно, что при уменьшении рыхлости модуль Юнга увеличивается (хрупкость увеличивается).

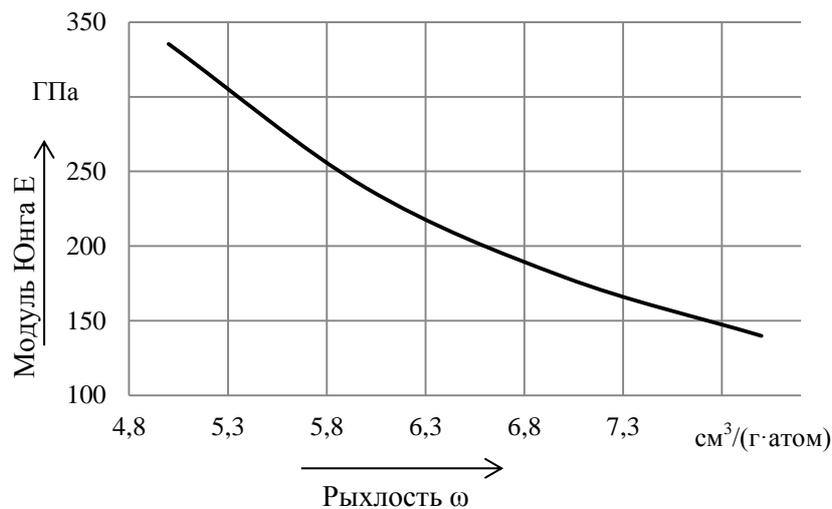


Рисунок 2 – Зависимость модуля Юнга кристаллического вещества от структурной рыхлости.

Кроме этого при уменьшении рыхлости увеличиваются относительная и абсолютная твердость, поверхностная энергия, модуль сдвига, скорость звука, уменьшается коэффициент теплового линейного расширения и теплоемкость и т. д.

На базе таких изменений мы имеем возможность оперативно производить оценку остаточного ресурса, сравнивая текущие показатели с показателями контрольных деталей. Для выбора предельных критических значений физических параметров и соответствующих им критических значений рыхлости необходимо провести дополнительные теоретические и экспериментальные исследования для каждой детали.

В заключение можно сделать следующие выводы.

1. Теоретически показано, что рыхлость может быть положена в основу разработки способа оценки остаточного ресурса.

2. С практической точки зрения существует принципиальная возможность разработки приборов, основанных на той или иной зависимости от физических свойств металлов, которые наиболее оптимально подходят для изготовления реальных узлов железнодорожных вагонов и деталей и условий их эксплуатации.

На основе изложенного можно утвердить, что возможно создание эффективной методики контроля и диагностики остаточного ресурса узлов и деталей железнодорожных вагонов, которая позволит существенно повысить эффективность работы железнодорожного транспорта и избежать аварий и крупномасштабных катастроф.

Список литературы

1. Петракова, А. Г. Повышение эксплуатационного ресурса цельнокатаных колес грузовых вагонов путем выбора рационального интервала их твердости: Автореф. дис... канд. техн. наук [Текст] / А. Г. Петракова. – Омск, 2008. – 18 с.

2. Якушев, А. В. Прогнозирование усталостного ресурса литых деталей тележки грузового вагона: Автореф. дис... канд. техн. наук [Текст] / А. В. Якушев. – Екатеринбург, 2007. – 16 с.

3. Болотин, В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций [Текст] / В. В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.

4. Терентьев, В. Ф. Циклическая прочность металлических материалов: Учебное пособие [Текст] / В. Ф. Терентьев, А. А. Оксогоев / Новосибирская гос. техн. ун-т. – Новосибирск, 2001. – 61 с.

5. Регель, В. Р. Кинетическая природа прочности твёрдых тел: Монография [Текст] / В. Р. Регель, А. И. Слуцкер, Э. Е. Томашевский. – М.: Наука, 1974. – 560 с.

6. Чувильдеев, В. Н. Деформация и разрушение конструкционных материалов: проблемы старения и ресурса: Учебное пособие [Текст] / В. Н. Чувильдеев, Н. Н. Вирясова / Нижегородский гос. ун-т. – Нижний Новгород, 2010. – 67 с.
7. Левкович, Т. И. Прогнозирование вероятности опасных хрупких разрушений корпусов автосцепок вагонов: Автореф. дис... канд. техн. наук [Текст] / Т. И. Левкович / Брянский гос. техн. ун-т. – Брянск, 2000. – 22 с.
8. Охрупчивание стали 20 в процессе длительной эксплуатации [Текст] / М. М. Закирничная, И. Р. Кузеев и др. // Нефтегазовое дело. Машины и аппараты / Уфимский нефтяной техн. ун-т. – Уфа, 2006. – Т. 4. – № 1. – С. 207 – 214.
9. Зуев, В. В. Кристаллоэнергетика как основа оценки свойств твердотельных материалов (включая магнезиальные цементы) [Текст] / В. В. Зуев, Л. Н. Поцелуева, Ю. Д. Гончаров / Завод «Альфапол». – СПб., 2006. – 139 с.

References

1. Petrakova A. G. *Povyshenie ekspluatatsionnogo resursa tsel'nokatanykh koles gruzo-vykh vagonov putem vybora ratsional'nogo intervala ikh tverdosti* (Increase the service life of solid wheels O-cargo carriages by selecting a rational range of hardness). Ph. D. thesis, Omsk, OSTU, 2008, 18 p.
2. Iakushev A. V. *Prognozirovaniye ustalostnogo resursa litykh detalei teleshki gruzovogo vagona* (Prediction of fatigue life of cast parts of freight car bogie) Ph. D. thesis, Ekaterinburg, USTU, 2007, 16 p.
3. Bolotin V. V. *Prognozirovaniye resursa mashin i konstruktсии* (Forecasting resource of machines and structures). Moscow: Mashinostroenie, 1984, 312 p.
4. Terent'ev V. F. *Tsiklicheskaia prochnost' metallicheskih materialov* (Cyclical strength metallic materials). Novosibirsk: NGTU, 2001, 61 p.
5. Regel' V. R., Slutsker A. I., Tomashevskii E. E. *Kineticheskaia priroda prochnosti tverdykh tel: Monografiia* (Kinetic nature of the strength of solids: Monograph). Moscow: Nauka, 1974, 560 p.
6. Chuvil'deev V. N., Viriasova N. N. *Deformatsiia i razrusheniye konstruktсионnykh materialov: proble-my stareniiia i resursa* (Deformation and fracture of structural materials: the problem of aging and life). Nizhnii Novgorod: NNGU, 2010, 67 p.
7. Levkovich T. I. *Prognozirovaniye veroiatnosti opasnykh khrupkikh razrushenii korpusov avtostsepek vagonov* (Predicting the probability of dangerous brittle fractures buildings autohitches cars). Ph. D. thesis, Briansk, 2000, 22 p.
8. Zakirnichnaia M. M., Kuzeev I. R., Berdin V. K., Kirillova N. Iu. The embrittlement of steel 20 in continuous operation [Okhrupchivanie stali 20 v protsesse dlitel'noi ekspluatatsii]. *Neftgazovoe delo. Mashiny i apparaty – Oil and gas business. Machines and devices*, 2006, T. 4, no. 1, pp. 207 – 214.
9. Zuev V. V., Potselueva L. N., Goncharov Iu. D. *Kristalloenergetika kak osnova otsenki svoistv tverdotel'nykh materia-lov (vključaia magnezial'nye tsementy)* (Kristalloenergetika as a basis for evaluation of properties of solid materials (including magnesia cement)). SPb., 2006, 139 p.

УДК 621.001.2:629.4.023.018

З. Г. Мухамедова

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ГЛАВНОЙ РАМЫ ЭЛЕКТРОВОЗА С УЧЕТОМ УСТАНОВКИ ДЕМПФИРУЮЩЕГО ПОГЛОЩАЮЩЕГО АППАРАТА В АВТОСЦЕПКЕ

В данной статье предлагается динамическая модель для численных исследований колебаний главной рамы электровагона с учетом воздействия продольных усилий, возникающих в автосцепке.

В работе [1] было проведено исследование данной задачи для изгибных колебаний без учета воздействия продольных усилий, возникающих в автосцепке. Для более точного ис-

следования упругих колебаний рамы кузова электровоза нами разработан численно-аналитический метод, позволяющий установить общие зависимости между колебаниями всей системы (силы напряжения, деформации, возникающие в системе «электровоз – путь» с учетом конструктивных параметров и условий движения) и разработать методику их динамического расчета на прочность.

Раму кузова электровоза будем рассматривать в виде модели упругой балки на двух упругих опорах с равномерно распределенной по ее длине массой [3, 4]. При определении частоты и главных форм колебаний упругой рамы кузова электровоза примем следующие допущения.

1. Размеры рамы кузова таковы, что оболочечными формами колебаний можно пренебречь по сравнению с балочными. Кроме того, под воздействием силы тяжести $P = M_K \cdot g$ в общем случае возможен начальный статический прогиб кузова с радиусом R_0 .

2. Упругая ось рамы кузова электровоза как балки с равномерно распределенной массой деформируется при условии малой криволинейности (R_0) и проходит через центры тяжести его поперечных сечений, симметричных относительно плоскости изгиба.

3. Материал кузова электровоза испытывает деформации растяжения (сжатия) по оси $OX - U(t, l)$, по дуге радиуса R_0 , изгиб $W(t, l)$ – от дуги того же радиуса. Деформации (продольные и поперечные) зависят от двух обобщенных координат времени t и длины дуги l . Поперечные перемещения точек балки (стержня) перпендикулярны к ее продольной оси в каждый последующий момент времени.

4. Восстанавливающие силы в балке пропорциональны ее деформациям (упругая модель).

5. Каждое из сечений рамы кузова электровоза будет совершать продольные (по дуге радиуса R_0) и поперечные (по направлению дуги R_0 в плоскости, перпендикулярной оси рамы кузова) колебания. Продольные колебания могут происходить под воздействием внешних возмущающих сил: обдув воздушным потоком при движении электровоза (необходим особый расчет при входе в тоннели) и под воздействием сил тяги при движении поезда (электровоза с вагонами). Поперечные колебания возникают из-за растяжимости, упругости материала кузова (внутренний фактор), а также при движении электровоза по пути с неровностями, вызывающими периодические колебания (внешний фактор). При неравномерной загрузке кузова электровоза возможно возникновение дисбалансных перерезывающих сил Q_i и моментов M_i .

За обобщенные координаты приняты

$U(t, l)$ – упругие перемещения от деформации растяжения (сжатия) по длине упругой рамы кузова L_k . Для упрощения будем отсчитывать перемещение от точек по дуге постоянного радиуса R_0 (начальный статический прогиб кузова под весом оборудования);

$W(t, l)$ – упругие перемещения точек нейтральной оси упругой рамы кузова при изгибе, отсчитываемые от дуги постоянного радиуса R_0 . Длина кузова принята равной L_k , с консолями длиной l_l .

В общем случае для вынужденных изгибно-продольных колебаний кузова электровоза с начальным статическим прогибом U_0 и начальным радиусом нейтральной оси R_0 при движении по пути с периодической неровностью $\eta(l, t)$ можно записать систему уравнений в виде [1]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{m}_k \frac{\partial^2 U(l, t)}{\partial t^2} - E_p F_k \frac{\partial^2 U(l, t)}{\partial l^2} + \bar{m}_k \frac{V \partial W(l, t)}{R_0 \cdot \partial t} - \\ - 2E_u I \left(\frac{1}{R_0} + \frac{\partial^2 W(l, t)}{\partial l^2} \right) \cdot \frac{\partial^3 W(l, t)}{\partial l^3} = - \frac{\partial P_\Gamma}{\partial l} \pm N_{\Gamma \Delta t} + P_\Gamma; \\ \bar{m}_k \frac{\partial^2 W(l, t)}{\partial t^2} + m_{\text{пер}} \cdot V^2 \left(\frac{\partial^2 W(l, t)}{\partial l^2} + \frac{1}{R_0} \right) + 2m_{\text{пер}} \cdot V^2 \frac{\partial^2 W(l, t)}{\partial l \partial t} + \\ + E_u I \frac{\partial^4 W(l, t)}{\partial l^4} + 2E_u I \frac{\partial^3 U(l, t)}{\partial l^3} \left(\frac{1}{R_0} + \frac{\partial^2 W(l, t)}{\partial l^2} \right) = \eta_H(l, t) + P_B(l, t) \pm N_{B \Delta t}. \end{array} \right. \quad (1)$$

В системе уравнений (1) введены следующие обозначения:

P_Γ – сила тяги, действующая в продольном направлении, возникающая при движении электровоза при транспортировании n – числа вагонов;

$\frac{\partial P_\Gamma}{\partial l}$ – распределённая эквивалентная сила, возникающая в продольном направлении при неравномерном деформировании рельсов в продольном направлении;

$N_{\Gamma\Delta t}$ и $N_{B\Delta t}$ – температурные усилия, действующие в продольном и поперечном направлениях, при изменении температуры внешней окружающей среды;

$P_B(l, t)$ – сила, возникающая в вертикальном направлении под действием различного необходимого оборудования, устанавливаемого в кузове электровоза. В зависимости от схемы расположения оборудования (конкретной марки электровоза) спектр данной нагрузки по длине l_k различен.

При этом $\eta_H(l, t)$ – функция изменения неровности рельсового пути по вертикали, которая принимается в виде:

$$\eta_H(\ell, t) = (2C \frac{\eta_0}{2} (1 - \cos \omega t) + 2 \beta \cdot \dot{\eta}_H) \cdot \eta_H(\ell), \quad (2)$$

где $\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot V}{L_H}$, L , η_0 – соответственно длина и высота неровности; ω – частота изменения неровности во времени.

Для системы изгибно-продольных уравнений колебаний упругой рамы кузова электровоза (1) начальные условия приняты нулевыми. Граничные условия приняты в виде упругого закрепления по концам по аналогии с утверждением в статье [1].

В результате совместного решения системы дифференциальных уравнений (1) методом Фурье с дальнейшим применением преобразования Лапласа по времени общие решения будут иметь вид:

$$W(l, t) = \sum_{k=1}^{\infty} W_k(l) \cdot W_k(t); \quad (3)$$

$$U(l, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \{U_k(l) \cdot U_k(t)\}, \quad (4)$$

где $k = 1, 2, \dots, N$ – число гармоник для изгибно-продольных колебаний упругой рамы кузова (при численных исследованиях было принято $k = 1, 2, \dots, 5$);

$U_k(l)$, $W_k(l)$ – собственные функции, вычисляются по формулам:

$$U_k(l) = A_{1k} \sin \phi_k X + A_{2k} \cos \phi_k X; \quad (5)$$

$$W_k(l) = \frac{\aleph_1 \cdot (1 + \omega_k^2 / \omega_B^2) + \omega_B^2}{\omega_k^3} sh \omega_k X + ch \omega_k X + \sin \omega_B X + \omega_k^2 / \omega_B^2 \cdot \cos \omega_B X, \quad (6)$$

где $U_k(l)$, $W_k(l)$ – динамические перемещения, представляющие собой динамический прогиб (соответственно поперечный и продольный) главной рамы кузова электровоза во времени, вычисляются по формулам:

$$U_k(t) = R_1 \cdot \sin \omega \cdot t + R_2 \cdot \cos \omega \cdot t + R_3 \cdot \sin \alpha_k \cdot t + R_4 \cdot \cos \alpha_k \cdot t + R_5 \cdot sh \cdot \lambda_k \cdot t + R_6 \cdot ch \cdot \lambda_k \cdot t, \quad (7)$$

где введены обозначения:

$$R_1 = -\frac{1}{U(l) \cdot \bar{m}_k} D_1 \frac{1}{\alpha_k^2 - \omega^2};$$

$$R_2 = \frac{1}{U(l) \cdot \bar{m}_k} D_2 \frac{1}{\alpha_k^2 - \omega^2};$$

$$R_3 = \frac{1}{U(l) \cdot \bar{m}_k} \left[(-D_1) \frac{\omega}{(\alpha_k^2 - \omega^2) \alpha_k} + \frac{D_3}{\alpha_k^2 + \lambda_k^2} \right];$$

$$R_4 = \frac{1}{U(l) \cdot \bar{m}_k} \left[D_2 \frac{1}{\alpha_k^2 - \omega^2} + \frac{D_4}{\alpha_k^2 + \lambda_k^2} \right];$$

$$R_5 = -\frac{1}{U(l) \cdot \bar{m}_k} \frac{\alpha_k \cdot D_3}{(\alpha_k^2 - \lambda_k^2) \cdot \lambda_k};$$

$$R_6 = -\frac{1}{U(l) \cdot \bar{m}_k} \frac{D_4}{\alpha_k^2 + \lambda_k^2}.$$

$$W_k(t) = M_1 + M_2 \cdot \cos \omega \cdot t + M_3 \cdot \sin \omega \cdot t - M_4 \cdot ch \lambda_k \cdot t + M_5 \cdot sh \lambda_k \cdot t, \quad (8)$$

где введены обозначения: $M_1 = -\frac{K_1}{\lambda_k^2}$; $M_2 = \frac{K_2}{\lambda_k^2 + \omega^2}$; $M_3 = \frac{K_3}{\lambda_k^2 + \omega^2}$; $M_4 = \frac{K_2}{\lambda_k^2 + \omega^2}$;

$$M_5 = -\frac{K_1}{\lambda_k^2} - \frac{K_3 \cdot \omega}{(\lambda_k^2 + \omega^2) \cdot \lambda_k^2} + \frac{d_k^2}{\lambda_k}.$$

Численные исследования были проведены в среде программирования MathCad 14. Для расчетов была принята главная рама электровоза ВЛ-60к.

На графике рисунка 1 показано изменение собственных функций главной рамы электровоза для продольных колебаний $U_k(l)$ (см) для пяти гармоник.

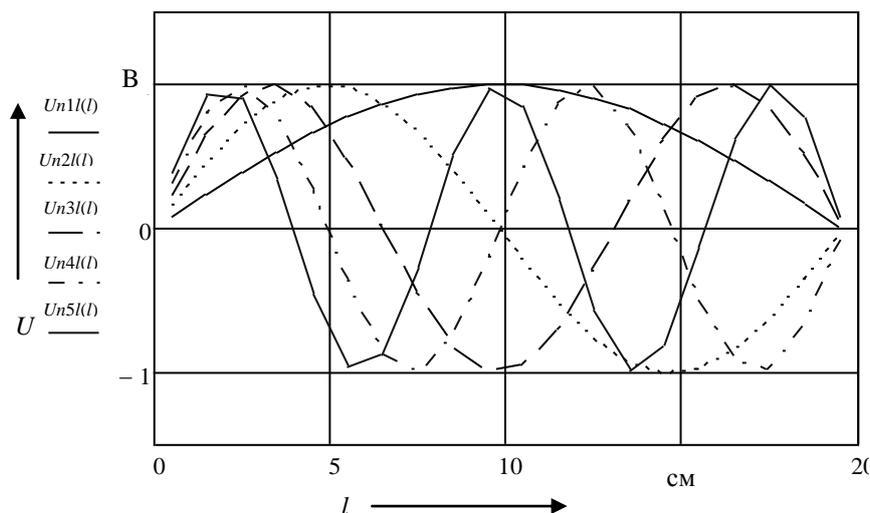


Рисунок 1 – Изменение собственных функций главной рамы электровоза для продольных колебаний $U_k(l)$ (см) для пяти гармоник

На графиках рисунка 2 показано изменение продольных напряжений на главной раме электровоза ВЛ-60к по гармоникам в зависимости от различного веса поезда (соответственно 1000 и 2000 т).

Из графиков рисунка 2 видно, что максимальные продольные напряжения не превышают 60 МПа.

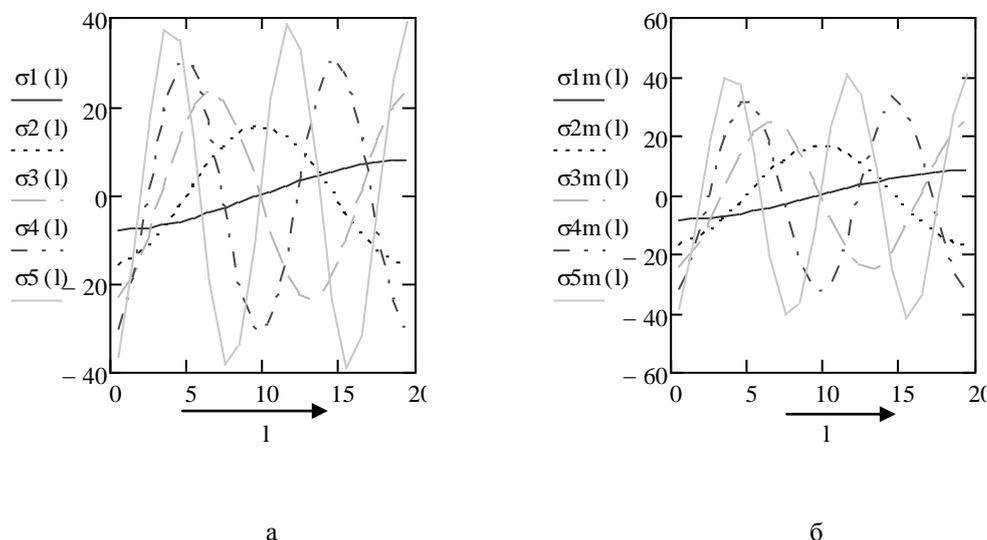


Рисунок 2 – Изменение продольных напряжений на главной раме электровоза ВЛ-60к по гармоникам в зависимости от различного веса поезда: а – 1000 т; б – 2000 т

На основании численных исследований можно сделать следующие обобщающие выводы:

1. Проведено численное исследование напряженно-деформированного состояния рамы кузова электровоза серии ВЛ-60к с целью подбора решений по модернизации (усилению несущего каркаса) с продлением срока службы. Установлено, что причиной возникновения усталостных трещин является конструктивная необеспеченность совместной работы вертикальных шкворневых балок коробчатого сечения рамы кузова в месте крепления с рамами тележек при воздействии продольных сил, действующих в автосцепке.

2. При модернизации необходимо повысить надежность благодаря усилению опасных сечений рамы тележки и кузова, тем самым принципиально изменить конструкцию шкворневых балок рам кузова и рамы тележки и узлов крепления в центральной опоре.

3. Для повышения демпфирующих способностей в продольном направлении необходимо создать новые конструкции поглощающих аппаратов с улучшенными характеристиками по гашению колебаний бокового отбоя и виляния. Нами создана одна из модернизированных конструкций, на нее получен патент Республики Узбекистан на изобретение [2]. Применение данной конструкции поглощающего аппарата позволит снизить продольные напряжения в автосцепке на 10 – 12,5 % в зависимости от различных режимов динамического нагружения.

Список литературы

1. Хромова, Г. А. Исследование колебаний упругой рамы электровоза при движении по пути с периодической неровностью [Текст] / Г. А. Хромова, Ю. О. Хайдаров, З. Х. Шерматов // Проблемы механики / Институт механики и сейсмостойкости сооружений. – Ташкент. – 2002. – № 1. – С. 25 – 29.

2. Пат. IAP 04632. Республика Узбекистан. Поглощающий аппарат автосцепки электровозов [Текст] / Г. А. Хромова, Ю. О. Хайдаров (Республика Узбекистан). Оpubл. 31.01.2013, Бюл. № 1.

3. Автосцепное устройство железнодорожного подвижного состава [Текст] / В. В. Коломийченко, Н. А. Костина и др. – М.: Транспорт, 1991. – 232 с

4. Трофименко, А. Ф. Механизация и автоматизация технического обслуживания и ремонта подвижного состава [Текст] / А. Ф. Трофименко. – М.: Транспорт, 2001. – 200 с.

References

1. Hromova G. A., Haydarov Y. O., Shermatov Z. H. The study of oscillations of elastic frame of a locomotive while moving on the road with a periodic roughness [Issledovanie kolebaniy uprugoi ramy elektrovoza pri dvizhenii po puti s periodicheskoi nerovnost'iu]. *Problemy mekhaniki – Problems of mechanics*, 2002, no.1, pp.25 – 29

2. Hromova G. A., Haydarov Y. O., Shermatov Z. H., Gusarov A. A. *Patent of the Republic of Uzbekistan IAP 04632*, 31.01.2013.

3. Kolomyichenko V. V., Kostina N. A., Prohorenkov V. D., Belyayev V. I. *Avtostsepnoe ustroystvo zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava* (Automatic couplers of railway rolling stock). Moscow: Transport, 1991, 232 p.

4. Trofimenko A. F. *Mekhanizatsiia i avtomatizatsiia tekhnicheskogo obsluzhivaniia i remonta podvizhnogo sostava* (Mechanization and automation of maintenance and repair of rolling stock). Moscow: Transport, 2001, 200 p.

УДК 629.4

В. А. Нехаев, В. А. Николаев, Е. П. Челтыгмашев, М. Х. Минжасаров

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ЭКИПАЖ ОТ СТЫКОВ РЕЛЬСОВ

Сформирована методика исследования оценки влияния импульсного воздействия со стороны стыков рельсового пути на показатели динамических качеств железнодорожного экипажа. Получена зависимость коэффициента влияния повторности импульса от уровня диссипации энергии в системе и скорости движения экипажа.

Если пренебречь продольной неравноупругостью железнодорожного пути (это обычно принимаемое в динамике подвижного состава допущение, позволяющее упростить интегрирование систем дифференциальных уравнений экипажа), то вполне можно воспользоваться дискретной инерционной моделью железнодорожного пути, ибо она является достаточно простой, но обеспечивает, как доказано, достаточную точность. Рассмотрим обобщенный экипаж, расчетную схему которого, представленную в виде системы твердых тел, пружин и демпферов сухого или вязкого трения (рисунок 1), можно считать вполне обоснованной.

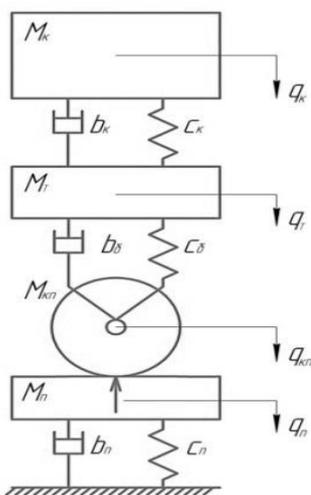


Рисунок 1 – Расчетная схема обобщенного железнодорожного экипажа

Здесь приняты следующие обозначения: M_k , M_r , M_{kp} , M_p – масса кузова, тележки, колесной пары и «приведенная» масса железнодорожного пути соответственно, тс·с²/м; C_k , C_b , C_p – жесткость центрального, буксового подвешивания и жесткость пути, которую исходя из условий нашего исследования будем считать постоянной, тс/м; b_k , b_b , b_p – коэффициенты эквивалентного вязкого трения кузовного, буксового подве-

шивания и пути, тс·с/м. Все величины, указанные выше, рассчитываются либо на одну колесную пару, либо на одно колесо.

Таким образом, очевидно, что динамическое поведение нашего условного одноосного «обобщенного» локомотива описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, записанной в векторно-матричной форме:

$$A\ddot{\vec{q}} + B\dot{\vec{q}} + C\vec{q} = 0, \quad (1)$$

где $A = \begin{pmatrix} M_k & 0 & 0 \\ 0 & M_T & 0 \\ 0 & 0 & M_{kp} + M_p \end{pmatrix}$ – матрица инерционных коэффициентов;

$B = \begin{pmatrix} b_k & -b_k & 0 \\ -b_k & b_k + b_b & -b_b \\ 0 & -b_b & b_b + b_p \end{pmatrix}$ – матрица диссипативных коэффициентов;

$C = \begin{pmatrix} C_k & -C_k & 0 \\ -C_k & C_k + C_b & -C_b \\ 0 & -C_b & C_b + C_p \end{pmatrix}$ – матрица жесткостных коэффициентов;

$\vec{q} = (q_k, q_T, q_{kp})^T$ – вектор обобщенных координат;

q_k – подпрыгивание кузова локомотива; q_T – подпрыгивание тележки экипажа; q_{kp} – подпрыгивание колесной пары локомотива.

Следует отметить, что в правой части системы дифференциальных уравнений стоит ноль, следовательно, можно подумать, что авторы собираются изучать известные уже вещи – собственные колебания рассматриваемой механической системы, представленной в виде условного одноосного экипажа, но это не так, что будет показано ниже.

В некоторых технических вопросах приходится иметь дело с кратковременными силами, действие которых повторяется через относительно большие промежутки времени. В этих случаях часто пользуются представлением о мгновенных импульсах и сводят задачу к исследованию действия периодически прикладываемых, равных друг другу мгновенных импульсов I (размерность – тс·с). Из курса механики известно, что импульс определяется выражением:

$$I = \int_0^{t_{yo}} F_{yo}(t) dt = m(V_+ - V_-), \quad (2)$$

где $F_{yd}(t)$ – ударная сила, имеющая в действительности различную форму, тс; t_{yd} – время удара, с; m – масса механической системы, на которую воздействует импульс, тс·с²/м; V_+ – скорость подпрыгивания груза после удара, м/с; V_- – скорость, которую имел груз перед ударом, м/с. Если же время удара (согласно исследованиям профессора М. П. Пахомова среднее значение времени удара в стыке $t_{yd} = 0,54/V$ [1], причем скорость движения экипажа измеряется в км/ч) значительно меньше периода собственных колебаний консервативной механической системы, то тогда критерий академика А. Н. Крылова [2, 3] позволяет такой удар с достаточной для практических расчетов степенью точности считать мгновенным. Это утверждение дает авторам возможность отказаться от учета формы ударного импульса и воспользоваться известными методами интегрирования дифференциального уравнения при мгновенном периодическом импульсном воздействии. Действительно, из выражения (2) следует, что скорость тела после удара определяется по формуле:

$$V_+ = V_- + \frac{I}{m}. \quad (3)$$

Более того, примем обычные для теории удара допущения о том, что перемещение твердого тела мгновенно измениться не может, ибо оно обладает инерцией, а его скорость может возрасти на величину импульса, деленного на массу. Для подвижного состава, движущегося по стыковому рельсовому пути, выражение для импульса было предложено в работе [4] для летних и зимних условий эксплуатации:

$$I(V) = \frac{aq + bq^{1/3}V}{\omega_0(1 + \delta^2)}, \quad (4)$$

здесь V – скорость движения экипажа, км/ч, а регрессионные коэффициенты выражения (4) приведены в таблице ниже; q – неподрессоренный вес колесной пары, тс, $\omega_0 = \sqrt{(j_{сб} + j_{сп}) / (m_{кп} + m_{п})}$ – собственная частота подпрыгивания колесной пары на упругом пути; $\delta = (\beta_б + \beta_{п}) / \left(2\sqrt{(j_{сб} + j_{сп})(m_{кп} + m_{п})} \right)$ – безразмерный коэффициент, характеризующий вязкое трение в механической системе, $j_{сб}$, $j_{сп}$ – жесткости буксового подвешивания экипажа и железнодорожного пути, тс/м; $\beta_б$, $\beta_{п}$ – коэффициенты вязкого трения в буксовом подвешивании экипажа и железнодорожного пути, тс·с/м, $m_{кп}$, $m_{п}$ – масса колесной пары и «приведенная масса» железнодорожного пути, тс·с²/м.

Значения регрессионных коэффициентов для периодов года

Коэффициент	Лето	Зима
a	1,654	11,47
b	0,56	0,138

Авторам настоящей статьи известно шесть способов решения задачи о действии мгновенных импульсов на механическую систему [2, 5]. Все эти способы основаны либо на построении соответствующих рядов, либо на применении дискретных решетчатых импульсных функции, предложенных Я. З. Цыпкиным, а предпоследний способ – это численное интегрирование исходной системы дифференциальных уравнений. Мы же хотим распространить шестой способ [2, 5], носящий название метода периодизации решения, на механические системы с несколькими степенями свободы. Суть этого метода состоит в том, что периодическое действие импульсов на колесную пару при прохождении стыков навязывает колебательной механической системе свою частоту $2\pi/T$, здесь $T = 3,6L_p/V$ (L_p – длина рельса).

Как известно, метод хорошо работает для одностепенных консервативных механических систем. В работе [6] он был распространен на диссипативные системы. Далее мы покажем, что нужно делать в случае, когда система многостепенная.

Известно, что если в фазовом пространстве необходимо выделить одну единственную траекторию, то следует задаться начальными условиями: $t = 0$, $q_k(0) = q_{k0}$, $\dot{q}_k(0) = \dot{q}_{k0}$, $q_T(0) = q_{T0}$, $\dot{q}_T(0) = \dot{q}_{T0}$, $q_{kp}(0) = q_{kp0}$, $\dot{q}_{kp}(0) = \dot{q}_{kp0}$.

Отличие используемого нами математического метода от других заключается в том, что эти начальные условия нужно найти из условия периодичности решения исследуемой механической системы, которая навязывается ей периодичностью ударного воздействия.

Итак, приведем систему (1) к нормальным координатам, которые дают диагональные матрицы, другими словами, система распадается на несвязанные отдельные дифференциальные уравнения, что, как доказывает высшая математика, возможно только в случае двух матриц. Сегодня это легко сделать, если воспользоваться любым математическим пакетом, например, Mathcad. Собственные числа матрицы $A^{-1}C$ являются квадратами парциальных частот колебаний механической системы. Вводя матрицу преобразования $\vec{q} = U\vec{x}$, где \vec{x} – вектор нормальных координат, в нашем случае получим:

$$\vec{x} = (x_1, x_2, x_3)^T. \quad (5)$$

Здесь символ T означает транспонирование вектора и матрицы. Далее, вычисляя матрицу $\tilde{C} = U^{-1}A^{-1}CU = \text{diag}(k_{01}^2, k_{02}^2, \dots, k_{0n}^2)$, видим, что это всегда диагональная матрица (в этом собственно и состоит преимущество введения нормальных координат). Все было бы прекрасно, если бы механическая система относилась бы к консервативному типу, но мы имеем дело с диссипативной механической системой, следовательно, имеем такую матрицу $B_* = U^{-1}A^{-1}BU$, в которой диагональные элементы значительно больше недиагональных элементов, значит, последними можно пренебречь. Из высшей математики известно, что если матриц больше двух, то они не могут быть приведены к нормальным координатам.

Другими словами, примем, что матрица диссипативных коэффициентов тоже является диагональной: $\tilde{B} \approx \text{diag}(2n_1, 2n_2, \dots, 2n_n)$. Это единственное допущение, нуждающееся в дальнейшем в проверке, принимаемое авторами, тогда исходная система дифференциальных уравнений распадется на отдельные подсистемы и примет вид:

$$E\ddot{x} + \tilde{B}\dot{x} + Cx = 0, \quad (6)$$

здесь $E = \text{diag}(1, 1, \dots, 1)$ – единичная матрица. В рассматриваемом нами случае имеем:

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 + 2n_1\dot{x}_1 + k_{01}^2x_1 = 0; \\ \ddot{x}_2 + 2n_2\dot{x}_2 + k_{02}^2x_2 = 0; \\ \ddot{x}_3 + 2n_3\dot{x}_3 + k_{03}^2x_3 = 0, \end{cases} \quad (7)$$

каждое из уравнений системы (7) легко интегрируется, и, следовательно, решение можно записать так:

$$x_j(t) = e^{-n_j t} (A_j \cos k_{0j} t + B_j \sin k_{0j} t), \quad (8)$$

где коэффициенты A_j и B_j зависят от начальных условий. Запишем решение исходной системы дифференциальных уравнений (1) через нормальные координаты:

$$\begin{cases} q_1(t) = \sum_{j=1}^3 u_{1,j} e^{-n_j t} (A_j \cos k_{0j} t + B_j \sin k_{0j} t); \\ q_2(t) = \sum_{j=1}^3 u_{2,j} e^{-n_j t} (A_j \cos k_{0j} t + B_j \sin k_{0j} t); \\ q_3(t) = \sum_{j=1}^3 u_{3,j} e^{-n_j t} (A_j \cos k_{0j} t + B_j \sin k_{0j} t), \end{cases} \quad (9)$$

и представим этот результат в векторно-матричной форме:

$$\vec{q}(t) = \Omega_c(t)\vec{A} + \Omega_s(t)\vec{B}, \quad (10)$$

где $\vec{A} = (A_1, A_2, A_3)^T$; $\vec{B} = (B_1, B_2, B_3)^T$ – векторы постоянных интегрирования, представляющие собой амплитуды колебаний нормальных координат;

$$\Omega_c(t) = \begin{pmatrix} U_{1,1} e^{-n_1 t} \cos k_{01} t & U_{1,2} e^{-n_2 t} \cos k_{02} t & U_{1,3} e^{-n_3 t} \cos k_{03} t \\ U_{2,1} e^{-n_1 t} \cos k_{01} t & U_{2,2} e^{-n_2 t} \cos k_{02} t & U_{2,3} e^{-n_3 t} \cos k_{03} t \\ U_{3,1} e^{-n_1 t} \cos k_{01} t & U_{3,2} e^{-n_2 t} \cos k_{02} t & U_{3,3} e^{-n_3 t} \cos k_{03} t \end{pmatrix}; \quad (11)$$

$$\Omega_s(t) = \begin{pmatrix} U_{1,1}e^{-n_1t} \sin k_{01}t & U_{1,2}e^{-n_2t} \sin k_{02}t & U_{1,3}e^{-n_3t} \sin k_{03}t \\ U_{2,1}e^{-n_1t} \sin k_{01}t & U_{2,2}e^{-n_2t} \sin k_{02}t & U_{2,3}e^{-n_3t} \sin k_{03}t \\ U_{3,1}e^{-n_1t} \sin k_{01}t & U_{3,2}e^{-n_2t} \sin k_{02}t & U_{3,3}e^{-n_3t} \sin k_{03}t \end{pmatrix}; \quad (12)$$

а так как нам нужно определить шесть постоянных интегрирования, то необходимо продифференцировать систему (9) по времени, тогда получим:

$$\begin{cases} \dot{q}_1(t) = \sum_{j=1}^3 u_{1,j} e^{-n_j t} \left[-n_j (A_j \cos k_{0j} t + B_j \sin k_{0j} t) + \right. \\ \left. + k_{0j} (-A_j \sin k_{0j} t + B_j \cos k_{0j} t) \right]; \\ \dot{q}_2(t) = \sum_{j=1}^3 u_{2,j} e^{-n_j t} \left[-n_j (A_j \cos k_{0j} t + B_j \sin k_{0j} t) + \right. \\ \left. + k_{0j} (-A_j \sin k_{0j} t + B_j \cos k_{0j} t) \right]; \\ \dot{q}_3(t) = \sum_{j=1}^3 u_{3,j} e^{-n_j t} \left[-n_j (A_j \cos k_{0j} t + B_j \sin k_{0j} t) + \right. \\ \left. + k_{0j} (-A_j \sin k_{0j} t + B_j \cos k_{0j} t) \right], \end{cases} \quad (13)$$

или аналогично приведенным выше выкладкам можем написать следующую векторно-матричную форму решения:

$$\begin{aligned} \dot{\vec{q}}(t) = U\dot{\vec{x}}(t) &= -\Omega_{nc}(t)\vec{A} - \Omega_{ns}(t)\vec{B} - \Omega_{ks}(t)\vec{A} + \Omega_{kc}(t)\vec{B} = \\ &= -[\Omega_{nc}(t) + \Omega_{ks}(t)]\vec{A} - [\Omega_{ns}(t) - \Omega_{kc}(t)]\vec{B}, \end{aligned} \quad (14)$$

здесь

$$\Omega_{nc}(t) = \begin{pmatrix} U_{1,1}n_1e^{-n_1t} \cos k_{01}t & U_{1,2}n_2e^{-n_2t} \cos k_{02}t & U_{1,3}n_3e^{-n_3t} \cos k_{03}t \\ U_{2,1}n_1e^{-n_1t} \cos k_{01}t & U_{2,2}n_2e^{-n_2t} \cos k_{02}t & U_{2,3}n_3e^{-n_3t} \cos k_{03}t \\ U_{3,1}n_1e^{-n_1t} \cos k_{01}t & U_{3,2}n_2e^{-n_2t} \cos k_{02}t & U_{3,3}n_3e^{-n_3t} \cos k_{03}t \end{pmatrix}; \quad (15)$$

$$\Omega_{ns}(t) = \begin{pmatrix} U_{1,1}n_1e^{-n_1t} \sin k_{01}t & U_{1,2}n_2e^{-n_2t} \sin k_{02}t & U_{1,3}n_3e^{-n_3t} \sin k_{03}t \\ U_{2,1}n_1e^{-n_1t} \sin k_{01}t & U_{2,2}n_2e^{-n_2t} \sin k_{02}t & U_{2,3}n_3e^{-n_3t} \sin k_{03}t \\ U_{3,1}n_1e^{-n_1t} \sin k_{01}t & U_{3,2}n_2e^{-n_2t} \sin k_{02}t & U_{3,3}n_3e^{-n_3t} \sin k_{03}t \end{pmatrix}; \quad (16)$$

$$\Omega_{kc}(t) = \begin{pmatrix} U_{1,1}k_{01}e^{-n_1t} \cos k_{01}t & U_{1,2}k_{02}e^{-n_2t} \cos k_{02}t & U_{1,3}k_{03}e^{-n_3t} \cos k_{03}t \\ U_{2,1}k_{01}e^{-n_1t} \cos k_{01}t & U_{2,2}k_{02}e^{-n_2t} \cos k_{02}t & U_{2,3}k_{03}e^{-n_3t} \cos k_{03}t \\ U_{3,1}k_{01}e^{-n_1t} \cos k_{01}t & U_{3,2}k_{02}e^{-n_2t} \cos k_{02}t & U_{3,3}k_{03}e^{-n_3t} \cos k_{03}t \end{pmatrix}; \quad (17)$$

$$\Omega_{ks}(t) = \begin{pmatrix} U_{1,1}k_{01}e^{-n_1t} \sin k_{01}t & U_{1,2}k_{02}e^{-n_2t} \sin k_{02}t & U_{1,3}k_{03}e^{-n_3t} \sin k_{03}t \\ U_{2,1}k_{01}e^{-n_1t} \sin k_{01}t & U_{2,2}k_{02}e^{-n_2t} \sin k_{02}t & U_{2,3}k_{03}e^{-n_3t} \sin k_{03}t \\ U_{3,1}k_{01}e^{-n_1t} \sin k_{01}t & U_{3,2}k_{02}e^{-n_2t} \sin k_{02}t & U_{3,3}k_{03}e^{-n_3t} \sin k_{03}t \end{pmatrix}. \quad (18)$$

Подставляя в уравнения (10) и (14) начальные условия задачи, найдем постоянные интегрирования из системы уравнений:

$$\begin{cases} \vec{q}(0) = \vec{q}_0 = \Omega_c(0)\vec{A}; \\ \dot{\vec{q}}(0) = \dot{\vec{q}}_0 = -\Omega_{nc}(0)\vec{A} + \Omega_{kc}(0)\vec{B}, \end{cases} \quad (19)$$

отсюда следует, что

$$\begin{cases} \vec{A} = U^{-1} \cdot \vec{q}_0; \\ \vec{B} = \Omega_{kc}^{-1}(0) \cdot E \cdot \dot{\vec{q}}_0 + \Omega_{kc}^{-1}(0) \cdot \Omega_c^{-1}(0) \cdot \vec{q}_0. \end{cases} \quad (20)$$

В результате выполненных выше действий мы выразили постоянные интегрирования системы дифференциальных уравнений (1) через заданные, но пока неизвестные начальные условия, которые необходимо определить, пользуясь методом периодизации решения при импульсном воздействии на механическую систему. Объединив выражения (9) и (13), (10) и (14), получим:

$$\begin{cases} \vec{q}(t) = U \cdot \vec{x}(t); \\ \dot{\vec{q}}(t) = U \cdot \dot{\vec{x}}(t); \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} \vec{q}(t) = \Omega_c(t) \cdot \vec{A} + \Omega_s(t) \cdot \vec{B}; \\ \dot{\vec{q}}(t) = -[\Omega_{nc}(t) + \Omega_{ks}(t)] \cdot \vec{A} - [\Omega_{ns}(t) - \Omega_{kc}(t)] \cdot \vec{B}. \end{cases} \quad (22)$$

Подставим в формулу (22) соответствующие выражения из (20) и после несложных преобразований имеем:

$$\begin{cases} \vec{q}(t) = [\Omega_c(t) \cdot \Omega_c^{-1}(0) + \Omega_s(t) \cdot \Omega_{kc}^{-1}(0) \cdot \Omega_c^{-1}(0)] \cdot \vec{q}_0 + \\ + \Omega_s(t) \cdot \Omega_{kc}^{-1}(0) \cdot E \cdot \dot{\vec{q}}_0; \\ \dot{\vec{q}}(t) = \{ -[\Omega_{nc}(t) + \Omega_{ks}(t)] \cdot \Omega_c^{-1}(0) - [\Omega_{ns}(t) - \Omega_{kc}(t)] \times \\ \times \Omega_{kc}^{-1}(0) \cdot \Omega_c^{-1}(0) \} \cdot \vec{q}_0 - [\Omega_{ns}(t) - \Omega_{kc}(t)] \cdot \Omega_{kc}^{-1}(0) \cdot E \cdot \dot{\vec{q}}_0. \end{cases} \quad (23)$$

Согласно первому выражению системы (21) и обычно принимаемым допущениям в теории удара перемещения не могут мгновенно измениться, так как тела обладают инерционными свойствами, а скорость подпрыгивания колесной пары увеличивается на величину, определяемую импульсом.

Итак, в конце периода колебаний колесной пары, непосредственно перед приложением очередного импульса имеем, что и вектор подпрыгиваний кузова, тележки и колесной пары

$$\vec{q}(T) = U \cdot \vec{x}(T), \quad (24)$$

но сразу после приложения очередного импульса смещение $\vec{q}(T)$ сохранит свое значение, и оно должно, согласно принятым допущениям для мгновенного удара равняться начальному значению:

$$\vec{q}(T) = \vec{q}_0, \quad (25)$$

так как этого требует метод периодизации решения, а скорость подпрыгивания колесной пары мгновенно изменится на величину $I(V)/M_{kp}$, действительно можно написать так:

$$\dot{\vec{q}}(T) = U \cdot \dot{\vec{x}}(T) + \frac{1}{M_{kp}} \vec{I}(V) = \dot{\vec{q}}_0, \quad (26)$$

где $\vec{I}(V) = (0 \ 0 \ I(V))^T$ – вектор импульсного воздействия на механическую систему. Последнее соотношение также представляет требование метода периодизации решения.

Таким образом, уравнения (25) и (26) образуют систему алгебраических уравнений (САУ) относительно пока не известных начальных условий системы дифференциальных уравнений (1), которую получим после несложных преобразований в таком виде:

$$H(T) \cdot \vec{z} = \vec{Q}(V), \quad (27)$$

здесь $\vec{z} = (q_{01}, q_{02}, q_{03}, \dot{q}_{01}, \dot{q}_{02}, \dot{q}_{03})^T$ – вектор неизвестных начальных условий системы дифференциальных уравнений (1);

$$\vec{Q}(V) = -\frac{1}{M_{kp}}(0, 0, 0, 0, 0, I(V))^T \text{ – вектор правых частей САУ;}$$

$$H(T) = \begin{pmatrix} h_{1,1}(T) & h_{1,2}(T) \\ h_{2,1}(T) & h_{2,2}(T) \end{pmatrix} \text{ – квадратная матрица размером } 6 \times 6;$$

вспомогательные матрицы размером 3×3 :

$$\begin{cases} h_{1,1}(T) = \Omega_c(T) \cdot \Omega_c^{-1}(0) + \Omega_s(T) \cdot \Omega_{kc}^{-1}(0) \cdot \Omega_c^{-1}(0) - E; \\ h_{1,2}(T) = \Omega_s(T) \cdot \Omega_{kc}^{-1}(0) \cdot E; \\ h_{2,1}(T) = -[\Omega_{nc}(T) + \Omega_{ks}(T)] \cdot \Omega_c^{-1}(0) - [\Omega_{ns}(T) - \Omega_{kc}(T)] \cdot \Omega_{kc}^{-1}(0) \cdot \Omega_c^{-1}(0); \\ h_{2,2}(T) = -\{[\Omega_{ns}(T) - \Omega_{kc}(T)] \cdot \Omega_{kc}^{-1}(0) \cdot E + E\}. \end{cases} \quad (28)$$

Таким образом, нами построена методика исследования мгновенных периодических ударных импульсов, действующих на многостепенные механические системы, методом периодизации решения. Решая САУ (27) при различных условиях, например, при изменении жесткости железнодорожного пути, скорости движения экипажа, периода года и других, определяем исходные начальные условия системы (1). Затем, используя весь математический багаж теории колебания механических систем, можем построить необходимые нам графики соответствующих переменных задачи, в том числе подпрыгиваний кузова, тележки и колесной пары, их коэффициентов повторности импульса, ускорений подпрыгиваний кузова, тележки и колесной пары, усилий, развиваемых в центральном и буксовом подвешивании и т. п.

В связи с тем, что в дальнейшем нам понадобятся для оценки ускорения подпрыгивания кузова, тележки и колесной пары, возьмем производную по времени от второго выражения (21), следовательно, имеем:

$$\ddot{\vec{q}}(t) = U \cdot \ddot{\vec{x}}(t), \quad (29)$$

где

$$\ddot{\vec{x}}(t) = \begin{pmatrix} e^{-n_1 t} \left[(n_1^2 - k_{01}^2)(A_1 \cos k_{01} t + B_1 \sin k_{01} t) - \right. \\ \left. - 2n_1 k_{01} (-A_1 \sin k_{01} t + B_1 \cos k_{01} t) \right] \\ e^{-n_2 t} \left[(n_2^2 - k_{02}^2)(A_2 \cos k_{02} t + B_2 \sin k_{02} t) - \right. \\ \left. - 2n_2 k_{02} (-A_2 \sin k_{02} t + B_2 \cos k_{02} t) \right] \\ e^{-n_3 t} \left[(n_3^2 - k_{03}^2)(A_3 \cos k_{03} t + B_3 \sin k_{03} t) - \right. \\ \left. - 2n_3 k_{03} (-A_3 \sin k_{03} t + B_3 \cos k_{03} t) \right] \end{pmatrix}. \quad (30)$$

В принципе формула (29) с учетом выражения (30) может быть приведена к виду, представленному соотношением (14). Но в этом нет особой необходимости, ибо достаточно выражений (29) и (30). И все же напишем эти соотношения:

$$\ddot{q}(t) = [L_1(t) + L_3(t)] \cdot \vec{A} + [L_2(t) - L_4(t)] \cdot \vec{B}, \quad (31)$$

$$\text{где } L_1(t) = \begin{pmatrix} U_{1,1}e^{-n_1t} (n_1^2 - k_{01}^2) \cos k_{01}t & U_{1,2}e^{-n_2t} (n_2^2 - k_{02}^2) \cos k_{02}t & U_{1,3}e^{-n_3t} (n_3^2 - k_{03}^2) \cos k_{03}t \\ U_{2,1}e^{-n_1t} (n_1^2 - k_{01}^2) \cos k_{01}t & U_{2,2}e^{-n_2t} (n_2^2 - k_{02}^2) \cos k_{02}t & U_{2,3}e^{-n_3t} (n_3^2 - k_{03}^2) \cos k_{03}t \\ U_{3,1}e^{-n_1t} (n_1^2 - k_{01}^2) \cos k_{01}t & U_{3,2}e^{-n_2t} (n_2^2 - k_{02}^2) \cos k_{02}t & U_{3,3}e^{-n_3t} (n_3^2 - k_{03}^2) \cos k_{03}t \end{pmatrix};$$

$$L_2(t) = \begin{pmatrix} U_{1,1}e^{-n_1t} (n_1^2 - k_{01}^2) \sin k_{01}t & U_{1,2}e^{-n_2t} (n_2^2 - k_{02}^2) \sin k_{02}t & U_{1,3}e^{-n_3t} (n_3^2 - k_{03}^2) \sin k_{03}t \\ U_{2,1}e^{-n_1t} (n_1^2 - k_{01}^2) \sin k_{01}t & U_{2,2}e^{-n_2t} (n_2^2 - k_{02}^2) \sin k_{02}t & U_{2,3}e^{-n_3t} (n_3^2 - k_{03}^2) \sin k_{03}t \\ U_{3,1}e^{-n_1t} (n_1^2 - k_{01}^2) \sin k_{01}t & U_{3,2}e^{-n_2t} (n_2^2 - k_{02}^2) \sin k_{02}t & U_{3,3}e^{-n_3t} (n_3^2 - k_{03}^2) \sin k_{03}t \end{pmatrix};$$

$$L_3(t) = \begin{pmatrix} 2U_{1,1}e^{-n_1t} n_1 k_{01} \sin k_{01}t & 2U_{1,2}e^{-n_2t} n_2 k_{02} \sin k_{02}t & 2U_{1,3}e^{-n_3t} n_3 k_{03} \sin k_{03}t \\ 2U_{2,1}e^{-n_1t} n_1 k_{01} \sin k_{01}t & 2U_{2,2}e^{-n_2t} n_2 k_{02} \sin k_{02}t & 2U_{2,3}e^{-n_3t} n_3 k_{03} \sin k_{03}t \\ 2U_{3,1}e^{-n_1t} n_1 k_{01} \sin k_{01}t & 2U_{3,2}e^{-n_2t} n_2 k_{02} \sin k_{02}t & 2U_{3,3}e^{-n_3t} n_3 k_{03} \sin k_{03}t \end{pmatrix};$$

$$L_4(t) = \begin{pmatrix} 2U_{1,1}e^{-n_1t} n_1 k_{01} \cos k_{01}t & 2U_{1,2}e^{-n_2t} n_2 k_{02} \cos k_{02}t & 2U_{1,3}e^{-n_3t} n_3 k_{03} \cos k_{03}t \\ 2U_{2,1}e^{-n_1t} n_1 k_{01} \cos k_{01}t & 2U_{2,2}e^{-n_2t} n_2 k_{02} \cos k_{02}t & 2U_{2,3}e^{-n_3t} n_3 k_{03} \cos k_{03}t \\ 2U_{3,1}e^{-n_1t} n_1 k_{01} \cos k_{01}t & 2U_{3,2}e^{-n_2t} n_2 k_{02} \cos k_{02}t & 2U_{3,3}e^{-n_3t} n_3 k_{03} \cos k_{03}t \end{pmatrix}.$$

Как известно [2, 5], важной характеристикой ударных процессов является коэффициент влияния повторности импульса, который был найден Я. Г. Пановко [2] для консервативной системы, т. е. когда $b = 0$, $n = 0$, $\delta = 0$. В этом случае для коэффициента влияния повторности импульса, приведенного на рисунке 2, имеем

$$\beta = \frac{1}{2 \left| \sin \frac{k_0 T}{2} \right|}. \quad (32)$$

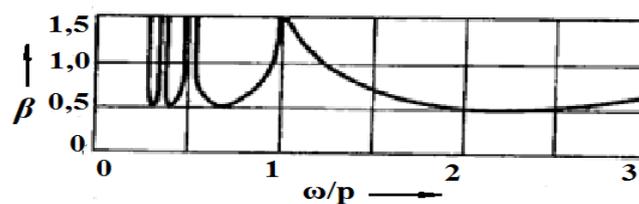


Рисунок 2 – Коэффициент влияния повторности импульса консервативной системы

Как видно из рисунка 2, здесь возможно неограниченно большое число ударных резонансов. Наименьшее возможное значение β равно $1/2$. Под угловой частотой приложения импульсов понимается выражение: $\omega = 2\pi/T$.

В работе [6] для диссипативной системы была выведена формула коэффициента влияния повторности импульса:

$$\beta = \sqrt{\frac{e^{2\pi\delta\lambda}}{2(ch2\pi\delta\lambda - \cos 2\pi\lambda)}}, \quad (33)$$

где $\lambda = T/T_0$ – расстройка системы по частоте; $T_0 = 2\pi/k_0$ – период собственных колебаний системы; $\delta = n/k_0$ – безразмерный коэффициент вязкого трения, исследование которой позво-

ляет установить, что в диссипативной системе также могут развиваться ударные резонансы. Это явление возможно тогда, когда знаменатель коэффициента влияния повторности импульса обращается в нуль, т. е.

$$ch2\pi\delta\lambda - \cos 2\pi\lambda = 0. \quad (34)$$

График изменения коэффициента влияния повторности импульса (33) для диссипативной системы приведен на рисунке 3. Из него следует, во-первых, что ударные резонансы могут возникать при λ , равном 0, 1, 2, 3 и т. д., во-вторых, благодаря наличию трения в системе максимальные значения β ограничены, в-третьих, что наименьшее значение параметра β равно $\frac{1}{2}$, но рост трения приводит к возрастанию минимума. Однако в настоящей статье мы имеем дело с многостепенными механическими системами, для которых очень сложно, а иногда и невозможно, получить коэффициент, стоящий перед амплитудой подпрыгивания узлов железнодорожного экипажа. Тем не менее определим алгоритм вычисления коэффициентов повторности для узлов подвижного состава.

Сделаем эти выкладки для условного одноосного экипажа (вагона или локомотива), которые нетрудно будет распространить на механические системы с большим числом степеней свободы. Итак, имеем:

$$\begin{cases} q_{10} = U_{1,1}x_1(0) + U_{1,2}x_2(0); \\ q_{20} = U_{2,1}x_1(0) + U_{2,2}x_2(0), \end{cases} \quad (35)$$

здесь $x_1(0) = A_1$; $x_2(0) = A_2$. Если принять, что до удара в стыке колесная пара спокойно катилась, т. е. $q_{10} = q_{20} = 0$, то несложно установить, что система алгебраических уравнений (35) удовлетворяется тривиальным решением, следовательно, $A_1 = A_2 = 0$.

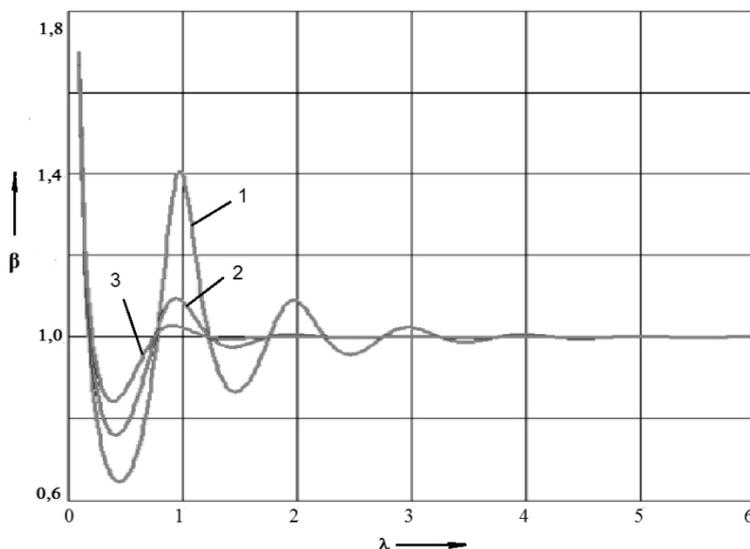


Рисунок 3 – Коэффициент влияния повторности импульса для рассматриваемого экипажа с диссипацией энергии: 1 – $\delta = 0,2$; 2 – $\delta = 0,4$; 3 – $\delta = 0,6$

Для скоростей подпрыгивания запишем:

$$\begin{cases} \dot{q}_1(t) = U_{1,1}\dot{x}_1(t) + U_{1,2}\dot{x}_2(t); \\ \dot{q}_2(t) = U_{2,1}\dot{x}_1(t) + U_{2,2}\dot{x}_2(t), \end{cases} \quad (36)$$

или

$$\begin{cases} \dot{q}_{10} = U_{1,1}\dot{x}_1(0) + U_{1,2}\dot{x}_2(0); \\ \dot{q}_{20} = U_{2,1}\dot{x}_1(0) + U_{2,2}\dot{x}_2(0), \end{cases} \quad (37)$$

где

$$\begin{cases} \dot{x}_1(0) = -n_1 A_1 + k_{01} B_1; \\ \dot{x}_2(0) = -n_2 A_2 + k_{02} B_2. \end{cases} \quad (38)$$

Подстановка системы (38) в (37) дает нам систему алгебраических уравнений относительно переменных B_1 и B_2 , корни которой равны:

$$\begin{cases} B_1 = -\frac{U_{1,2}}{\Delta} \frac{I(V)}{m_{kn} k_{01}}; \\ B_2 = \frac{U_{1,1}}{\Delta} \frac{I(V)}{m_{kn} k_{02}}; \\ \Delta = k_{01} k_{02} \begin{vmatrix} U_{1,1} & U_{1,2} \\ U_{2,1} & U_{2,2} \end{vmatrix}. \end{cases} \quad (39)$$

Отметим, что в данном случае было учтено равенство нулю амплитуд A_1 и A_2 и условие удара по колесной паре, откуда следует, что $\dot{q}_{10} \equiv 0$ и $\dot{q}_{20} = I(V)/m_{kn}$.

С учетом изложенного имеем:

$$\bar{x} = \begin{pmatrix} B_1 e^{-n_1 t} \sin k_{01} t \\ B_2 e^{-n_2 t} \sin k_{02} t \end{pmatrix}; \quad (40)$$

$$\dot{\bar{x}}(t) = \begin{pmatrix} B_1 e^{-n_1 t} (-n_1 \sin k_{01} t + k_{01} \cos k_{01} t) \\ B_2 e^{-n_2 t} (-n_2 \sin k_{02} t + k_{02} \cos k_{02} t) \end{pmatrix}; \quad (41)$$

$$\ddot{\bar{x}}(t) = \begin{pmatrix} B_1 e^{-n_1 t} \left[(n_1^2 - k_{01}^2) \sin k_{01} t - 2n_1 k_{01} \cos k_{01} t \right] \\ B_2 e^{-n_2 t} \left[(n_2^2 - k_{02}^2) \sin k_{02} t - 2n_2 k_{02} \cos k_{02} t \right] \end{pmatrix}; \quad (42)$$

и

$$\begin{cases} \vec{q}(t) = U \cdot \bar{x}(t); \\ \dot{\vec{q}}(t) = U \cdot \dot{\bar{x}}(t); \\ \ddot{\vec{q}}(t) = U \cdot \ddot{\bar{x}}(t). \end{cases} \quad (43)$$

Таким образом, рассматривая сначала периодическое действие импульсов на колесную пару экипажа, а затем одиночные его воздействия на подвижной состав, находим максимальные значения в этих двух массивах, их отношение и дает нам коэффициент влияния повторности импульса, который можно представить на графике в зависимости от скорости движения экипажа.

Разработанный в данной статье алгоритм исследования стыкового ударного возмущения на железнодорожный подвижной состав может использоваться для исследования динамического поведения различных экипажей.

Список литературы

1. Пахомов, М. П. Исследование вертикальных колебаний и воздействие электровозов на путь [Текст]: Дис... докт. техн. наук / М. П. Пахомов. – М., 1958. – 311 с.
2. Пановко, Я. Г. Устойчивость и колебания упругих систем: Современные концепции, парадоксы и ошибки [Текст] / Я. Г. Пановко., И. И. Губанова. – М.: Наука, 1987. – 352 с.

3. Крылов, А. Н. О некоторых дифференциальных уравнениях математической физики [Текст] / А. Н. Крылов. – М.-Л.: ГИТТЛ, 1950. – 359 с.
4. Шевченко, В. Я. Виброзащита локомотива от случайного ударного воздействия комбинированным подвешиванием с использованием пневматических рессор [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / В. Я. Шевченко. – Омск, 1987. – 164 с.
5. Цыпкин, Я. З. Основы теории автоматических систем [Текст] / Я. З. Цыпкин. – М.: Наука, 1977. – 560 с.
6. Нехаев, В. А. Особенности поведения диссипативной механической системы при действии импульсного возмущения [Текст] / В. А. Нехаев, Н. В. Закерничная // Сборник рефератов депонированных рукописей / Центр военно-научной информации МО РФ. – М., 2008. – Вып. 83.

References

1. Pakhomov M. P. *Issledovanie vertikal'nykh kolebaniy i vozdeistvie elektrovozov na put'* (Research of vertical fluctuations and the impact on the electric path): Doctor's thesis, Moscow, 1958, 311 p.
2. Panovko Ia. G., Gubanova I. I. *Ustoichivost' i kolebaniia uprugikh sistem: Sovremennye kontseptsii, paradoksy i oshibki* (Stability and oscillations of elastic systems: Modern concepts, paradoxes and errors). Moscow: Nauka, 1987, 352 p.
3. Krylov A. N. *O nekotorykh differentsial'nykh uravneniiakh matematicheskoi fiziki* (On some differential equations of mathematical physics). Moscow: GITTL, 1950, 359 p.
4. Shevchenko V. Ia. *Vibrozhachita lokomotiva ot sluchainogo udarnogo vozdeistviia kombinirovannym podveshivaniem s ispol'zovaniem pnevmaticheskikh reszor* (Locomotive vibration protection from accidental impact combined with suspending use of air springs). Ph. D. thesis, Omsk, 1987, 164 p.
5. Tsyppin Ia. Z. *Osnovy teorii avtomaticheskikh sistem* (Fundamentals of the theory of automatic systems). Moscow: Nauka, 1977, 560 p.
6. Nekhaev V. A., Zakernichnaia N. V. Features dissipative behavior of the mechanical system under the action-Wii pulse disturbance [Osobennosti povedeniia dissipativnoi mekhanicheskoi sistemy pri deist-vii impul'snogo vozmushcheniia]. *Sbornik referatov deponirovannykh rukopisei* – Collection of abstracts of manuscripts deposited, 2008, no. 83.

УДК 629.424:621.001.5

С. М. Овчаренко, И. Н. Денисов, В. А. Минаков

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ФИЛЬТРА МАСЛЯНОЙ СИСТЕМЫ ДИЗЕЛЯ

Надежность работы тепловозного дизеля в основном определяется надежностью работы деталей цилиндрико-поршневой группы и кривошипно-шатунного механизма. Качественная очистка моторного масла в процессе эксплуатации от механических примесей, обеспечиваемая фильтрами грубой и тонкой очистки и центробежными фильтрами, снижает скорость износа деталей. В статье приведены результаты моделирования работы центробежного фильтра, позволяющие оценить эффективность его работы и качество отсева частиц разных размеров в процессе эксплуатации.

При работе дизеля масло загрязняется частицами пыли и износа деталей двигателя, продуктами неполного сгорания (кокс, сажа) и окисления. Продукты загрязнения разделяются на органические и неорганические. Органические состоят из термического разложения, окисления и полимеризации масла и продуктов неполного сгорания, неорганические – из

почвенной пыли и частиц износа деталей. Будучи загрязненным, масло, предназначенное для уменьшения трения, само начинает ускорять износ смазываемых им трущихся деталей, поэтому очень важно вовремя улавливать и отделять от масла посторонние примеси [1].

Для очистки масла тепловозные дизели снабжаются масляными фильтрами. В основном масляные системы тепловозных дизелей имеют три типа фильтрующих элементов: фильтр тонкой очистки (ФТО), фильтр грубой очистки (ФГО) и центробежный фильтр (ЦФ).

Наибольший эффект очистки масла достигается посредством применения ЦФ. Центробежные аппараты обеспечивают достаточную тонкость очистки масла и возможность их неоднократного применения. Под действием центробежных сил механические примеси в масле, имеющие больший удельный вес, чем само масло, отбрасываются на стенки неподвижного корпуса фильтра и откладываются на его поверхности в виде густой масляной суспензии обычно черного цвета. Центробежные фильтры имеют, как правило, производительность 3 – 10 м³/ч. Как показывают исследования [2, 3], качество очистки масла, оцениваемое по таким параметрам как тонкость отсева и коэффициент отсева, обеспечиваемое центробежным фильтром в сравнении с обычными фильтрами, примерно в 1,5 – 2 раза выше. Высокая тонкость очистки, от 3 – 5 мкм, является существенным достоинством центрифуг. Главное отличие ЦФ от других типов фильтров заключается в отсутствии фильтрующих элементов, их работу выполняет центробежное поле.

Центробежное поле, в отличие от гравитационного, не является однородным. Силовые линии центробежного поля направлены по радиусам и располагаются от ротора к противоположным стенкам центрифуги, имеющим форму концентрических цилиндров (рисунок 1). За счет этого скопление отложений равномерно распределяется на стенках ротора (рисунок 2).

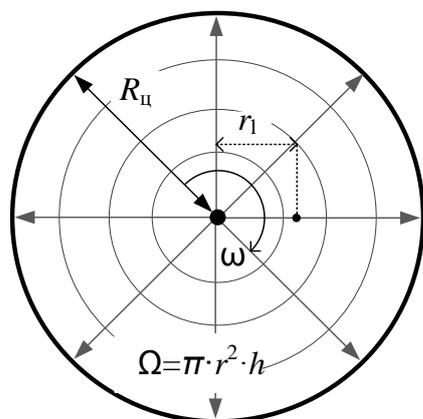


Рисунок 1 – Силовое поле центрифуги

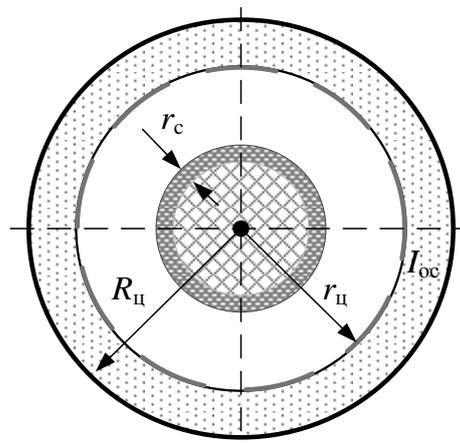


Рисунок 2 – Зона осаждения частиц в роторе

Процесс отложений характеризуется напряженностью центробежного поля, то есть силой, действующей на единичную массу в некоторой точке r_1 [2], мм/сек²:

$$E = r_1 \cdot \omega^2, \quad (1)$$

где r_1 – расстояние от данной точки от центра центробежного поля (от оси вращения), мм;

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} \text{ – угловая скорость вращения поля, Рад/сек;}$$

n – число оборотов центрифуги, мин⁻¹.

Исследования [3, 4] показывают, что для оценки эффективности работы центрифуги основным ее показателем является фактор разделения F_p , представляющий собой отношение ускорений центробежного и гравитационных полей:

$$F_p = \frac{E}{g}, \quad (2)$$

где $g = 9,8$ – ускорение силы тяжести, м/сек^2 .

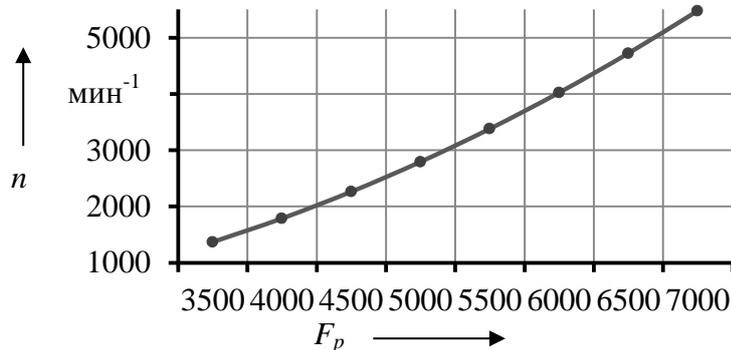


Рисунок 3 – Зависимость фактора разделения от частоты оборотов центрифуги

Чем больше значение фактора разделения, тем интенсивнее происходит процесс центрифугирования. На основании уравнений (1) и (2) построен график, на котором изображена зависимость фактора разделения от числа оборотов центрифуги (рисунок 3). Из представленной зависимости видно, что увеличение фактора разделения центрифуги напрямую зависит от ее угловой скорости.

Размеры и плотность загрязняющих примесей имеют равномерное распределение в масле, поступающем в ротор (монодисперсная система) [3]. При центрифугировании такой суспензии за время нахождения жидкости в роторе центрифуги на стенках ротора отложатся только те частицы, которые располагались в начальный момент движения жидкости вдоль ротора, в зоне потока на расстоянии от оси вращения, большем некоторого радиуса $r_{ц}$ (рисунок 2). При этом выполняется условие $r_c < r_{ц} < R_{ц}$, где $R_{ц}$ – радиус внутренней поверхности ротора; r_c – внутренний радиус слоя жидкости в роторе.

Оценкой эффективности работы ЦФ служит коэффициент отсева. Полнота отсева (коэффициент отсева) представляет собой долю загрязняющих примесей в жидкости, удерживаемых из масла фильтром. Коэффициент отсева представляет собой отношение площади сечения зоны потока к площади полного потока с учетом коэффициента разделяемости смеси [3, 4]:

$$\varphi = \frac{R_{ц}^2}{R_{ц}^2 - r_c^2} \cdot A, \quad (3)$$

где $A = 1 - e^{-\frac{1}{9} \cdot F E_c}$ – коэффициент разделяемости;

F – разделяющий фактор;

E_c – разделяемость смеси.

Разделяющий фактор выражается как:

$$F = \omega \cdot \tau, \quad (4)$$

где τ – время пребывания масла в роторе, сек.

Время пребывания масла в роторе – это время от начала поступления масла в ротор из системы до выхода масла из фильтра, который можно выразить уравнением, с:

$$\tau = \frac{\pi \cdot h_p \cdot (R_{ц}^2 \cdot r_c)}{Q}, \quad (5)$$

где h_p – высота ротора, мм;

Q – объемный расход масла в единицу времени, $\text{м}^3/\text{ч}$.

Разделяемость смеси определяется способностью выделения загрязняющих примесей от масла и выражается через отношение плотности частиц к динамической плотности масла:

$$E = \frac{d^2 \cdot (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{м}})}{\mu} \quad (6)$$

где μ – динамическая вязкость жидкости, Па·с;

$\rho_{\text{ч}}$ – плотность частицы, кг/см³;

$\rho_{\text{м}}$ – плотностей масла, кг/см³.

Динамическая вязкость (абсолютная вязкость) является произведением кинематической вязкости и плотности масла, где кинематическая вязкость принимается как постоянная, определяемая опытным путем (Па·с):

$$\mu = \rho^t \cdot \nu, \quad (7)$$

где ρ^t – плотность при температуре испытания, г/см³;

ν – кинематическая вязкость, мм²/сек.

Зависимость величины коэффициента разделяемости смеси от изменения величины FE_c , представлена на рисунке 4.

Из описанных ниже уравнений можно заключить, что величина A характеризуется главным образом от параметров плотности масла, плотности примесей масла и технических характеристик центрифуги.

Таким образом, учитывая все ниже описанные уравнения, коэффициент очистки центробежного фильтра рассчитывается как:

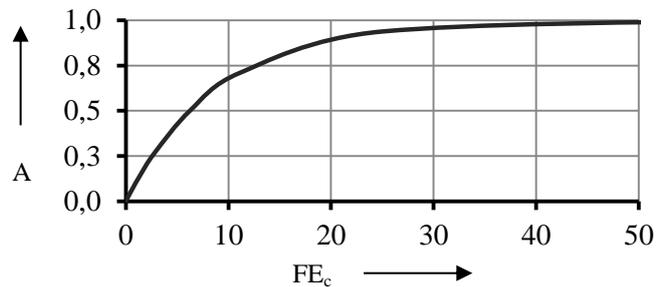


Рисунок 4 – Зависимость величины A от изменения величины FE_c

$$\varphi = \frac{R_{\text{ц}}^2}{R_{\text{ц}}^2 - r_{\text{с}}^2} \cdot \left[1 - e^{-\frac{(\omega \cdot \pi \cdot h_p \cdot (R_{\text{ц}}^2 - r_{\text{с}}^2)) \cdot (d^2 \cdot (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{м}}))}{9 \mu \cdot Q_p}} \right]. \quad (8)$$

Изменяя частоту оборотов центрифуги и динамическую вязкость масла, получаем изменения коэффициента отсева в зависимости от диаметра частиц (рисунок 5, 6).

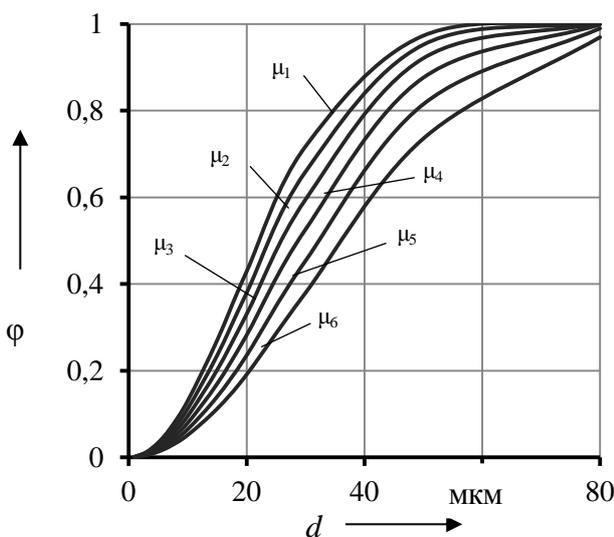


Рисунок 5 – Изменение коэффициента отсева относительно диаметра частиц: μ_1 – 9 Па·с; μ_2 – 10 Па·с; μ_3 – 11 Па·с; μ_4 – 12 Па·с; μ_5 – 13 Па·с; μ_6 – 14 Па·с

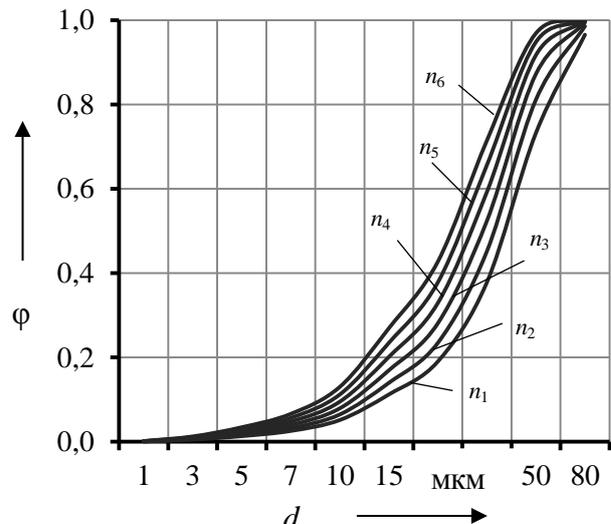


Рисунок 6 – Изменение коэффициента отсева относительно частоты оборотов ЦФ: n_1 – 4000 мин⁻¹; n_2 – 4500 мин⁻¹; n_3 – 5000 мин⁻¹; n_4 – 5500 мин⁻¹; n_5 – 6000 мин⁻¹; n_6 – 6500 мин⁻¹

Эффективную работоспособность центрифуги можно оценить числом осветления. Число осветления характеризует способность центрифуги полностью очищать (осветлять) жидкость за определенный момент времени [3], см/с;

$$B = \frac{2Q_p g}{\pi \cdot h_p \cdot (R_{\text{ц}}^2 - r_{\text{с}}^2) \cdot \omega^2} \cdot \frac{R_{\text{ц}} - r_{\text{с}}}{R_{\text{ц}} + r_{\text{с}}}, \quad (9)$$

где Q_p – производительность центрифуги, м³/ч;
 g – ускорение силы тяжести, м/с².

Производительность центрифуги для полной очистки в ней жидкости от частиц загрязнения [3], м³/ч:

$$Q_p = \frac{d^2 \cdot (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{м}}) \cdot \omega^2 \cdot \pi h_p \cdot (R_{\text{ц}}^2 - r_{\text{с}}^2)}{18\mu \cdot \ln \frac{R_{\text{ц}}}{r_{\text{с}}}}. \quad (10)$$

Зная значения числа осветления B , при котором масло полностью очищается от загрязняющих примесей (рисунок 7) и средние размеры частиц этих примесей, находящихся в масле, определяем оптимальное количество оборотов ротора центрифуги для получения большего эффекта при очистке, мин⁻¹:

$$n = \sqrt{\frac{1800 \cdot g}{B \cdot \pi^2} \cdot \frac{Q_p (R_{\text{ц}} - r_{\text{с}})}{\Omega \cdot (R_{\text{ц}} + r_{\text{с}})}}, \quad (11)$$

где Ω – рабочий объем ротора, выражается как $\Omega = \pi \cdot h_p (R_{\text{ц}}^2 - r_{\text{с}}^2)$, мм³.

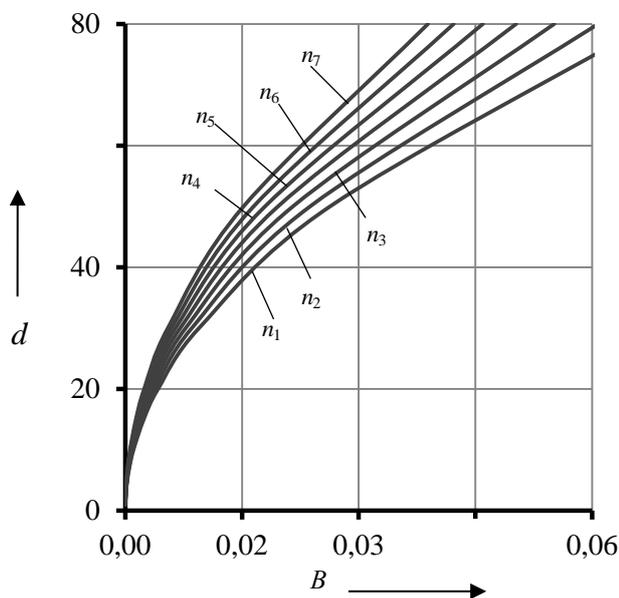


Рисунок 7 – Отношение диаметра частиц к числу осветления масла: n_1 – 4750 мин⁻¹; n_2 – 5000 мин⁻¹; n_3 – 5250 мин⁻¹; n_4 – 5500 мин⁻¹; n_5 – 5750 мин⁻¹; n_6 – 6000 мин⁻¹; n_7 – 6250 мин⁻¹

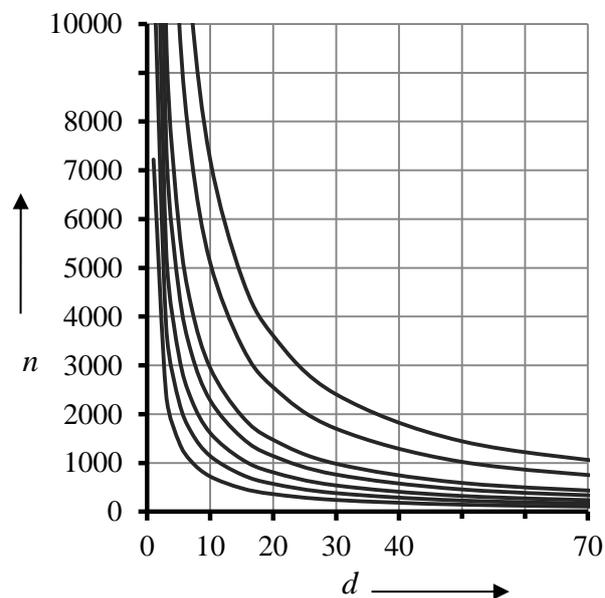


Рисунок 8 – Отношение числа оборотов центрифуги к диаметру частиц в масле: τ_1 – 50с; τ_2 – 20с; τ_3 – 10с; τ_4 – 5с; τ_5 – 3с; τ_6 – 1с; τ_7 – 0,5с

Полученная в результате расчета номограмма оптимального числа оборотов ротора центрифуги в зависимости от диаметра частиц в моторном масле при различных значениях τ (рисунок 8) показывает, что увеличение времени пребывания жидкости в роторе положительно влияет на качество очистки.

На тепловозном дизеле 1–ПД4 в полнопоточных реактивных центрифугах время нахождения потока жидкости в роторе τ составляет 1 – 3 сек ($5500 – 6000 \text{ мин}^{-1}$). Как показывают результаты расчета (рисунок 8) этого времени вполне достаточно для того, чтобы осадить частички размером 7 – 9 мкм.

Нерастворимые органические загрязняющие инородные примеси в работающем моторном масле составляют до 90 % всех примесей, из которых около 80 % имеют диаметры до 3 – 5 мкм [2]. Таким образом, для того, что бы повысить качество очистки мелкодисперсных частичек и коэффициент очистки ЦФ в целом, необходимо учитывать: частоту оборотов ротора центрифуги, вязкость масла время пребывания масла в роторе.

Таблица 1 – Коэффициент отсева ЦФ дизеля типа 1–ПД4

$n \text{ (мин}^{-1}\text{)}$ $d \text{ (мкм)}$	5000	5250	5500	5750	6000	6250	$n \text{ (мин}^{-1}\text{)}$ $\tau \text{ (с)}$
менее 1	0,000022	0,000024	0,000027	0,000029	0,000032	0,000035	0,5
	0,000044	0,000049	0,000054	0,000059	0,000064	0,000069	1
	0,000133	0,000147	0,000161	0,000176	0,000192	0,000208	3
1 – 5	0,000956	0,001054	0,001157	0,001264	0,001377	0,001494	0,5
	0,001911	0,002107	0,002312	0,002527	0,002751	0,002985	1
	0,005721	0,006306	0,006918	0,007559	0,008227	0,008924	3
5 – 10	0,003916	0,004317	0,004736	0,005175	0,005634	0,006111	0,5
	0,007815	0,008612	0,009448	0,010321	0,011232	0,012181	1
	0,023243	0,025592	0,028048	0,030611	0,033280	0,036054	3
10 – 20	0,012503	0,013775	0,015106	0,016498	0,017949	0,019459	0,5
	0,024830	0,027336	0,029956	0,032689	0,035534	0,038491	1
	0,072431	0,079514	0,086877	0,094512	0,102408	0,110559	3
более 20	0,235789	0,254793	0,273892	0,293014	0,312092	0,331066	0,5
	0,391984	0,417272	0,441849	0,465640	0,488590	0,510660	1
	0,678151	0,700499	0,720945	0,739676	0,756864	0,772671	3

В результате расчета получены зависимости коэффициентов отсева для ЦФ дизеля типа 1–ПД4 от частоты оборотов, времени нахождения потока жидкости в роторе и размера загрязняющих примесей (см. таблицу 1). Таким образом, приведенные зависимости позволяют повысить достоверность метода безразборной оценки степени износа деталей дизеля по результатам спектрального анализа моторного масла, а именно, повысить точность расчетов по определению количества продуктов износа, задержанных фильтрующими элементами в процессе их работы.

Список литературы

1. Овчаренко, С. М. Моделирование работы и оценка эффективности систем очистки моторного масла различных серий тепловозов [Текст] / С. М. Овчаренко // Вестник РГУПС / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. – Ростов-на-Дону, 2006. – № 1. – С. 21 – 27.
2. Качанова, Л. С. Совершенствование очистки отработанного моторного масла центробежными аппаратами [Текст]: Дис... канд. тех. наук: 05.20.03. – зерноград, 2004. – 152 с.
3. Григорьев, М. А. Очистка масел и топлива в автотракторных двигателях [Текст] / М. А. Григорьев. – М.: Машиностроение, 1970. – 271 с.
4. Стребков, С. В. Применение топлива, смазочных материалов и технических жидкостей в агропромышленном комплексе: Учебное пособие [Текст] / С. В. Стребков, В. В. Стрельцов. – Белгород: Белгородская ГСХА, 1999. – 404 с.

References

1. Ovcharenko S. M. Modeling and evaluation of the effectiveness of cleaning systems of motor oil different series of diesel locomotives [Modelirovanie raboti i ocenka effektivnosti systemi ochistki motornogo masla razlychnih seriy teplovozov]. *Vestnik RGUPS – Bulletin of RSTU*, 2006, no. 1, pp. 21 – 27.
2. Kachanova L. S. *Sovershenstvovanie ochistki otrabotannogo motornogo masla tsentrobeznyimi apparatami* (Improvement of purification of used engine oil centrifugal machines). Ph. D. thesis, Zernograd, ACHGAI, 2004, 120 p.
3. Grigorev M. A. *Ochistka masel i topliva v avtotraktornykh dvigateliakh* (Oils and fuels in automotive engines). – Moscow: Mashinostroenie, 1970, 271 p.
4. Strebkov S. V. *Primenenie topliva, smazochnykh materialov i tekhnicheskikh zhidkosti v agropromyshlennom komplekse* (The use of fuels, lubricants and technical liquids in agriculture). Belgorod: Belgorodskaya GSHA, 1999, 404 p.

УДК 620.192.63

В. В. Харламов, П. К. Шкодун, И. В. Шестаков

ТЕСТИРОВАНИЕ МЕЖВИТКОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ЯКОРНОЙ ОБМОТКИ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПО МЕТОДУ ВОЛНОВОГО ОТКЛИКА

Целью работы, результаты которой приведены в данной статье, является установление пригодности метода волнового отклика для диагностирования межвитковой изоляции якорной обмотки тягового электродвигателя постоянного тока, а также разработка адекватной модели тестируемой обмотки для последующего исследования сложных физических процессов, происходящих в процессе диагностирования. В статье приведена методика фиксации волновой затухающей характеристики (отклика) в якорной обмотке электродвигателя постоянного тока. Предложена схема замещения якорной обмотки применительно к рассматриваемому методу диагностирования. Приведен волновой отклик, полученный экспериментально при испытаниях на физической модели. Представлен волновой отклик, полученный при моделировании эксперимента в программной среде MatLab. Выполнен анализ результатов реального и имитационного моделирования, который позволяет судить об адекватности предложенной схемы замещения якорной обмотки. Впоследствии данная схема замещения будет использована для имитационного моделирования повреждений изоляции тягового электродвигателя применительно к методу волнового отклика.

Тяговый электродвигатель (ТЭД) является важнейшей частью подвижного состава железных дорог. Критическим элементом, а также источником наибольшего числа отказов ТЭД является система изоляции. По статистике около 30 % отказов электродвигателей связано с нарушением изоляции. Скрытые процессы деградации в изоляции могут вызывать повреждения, затраты на исправление которых по стоимости могут быть сравнимы с созданием новой машины [1].

Изоляция в процессе эксплуатации подвергается комплексному воздействию многих факторов, что в конечном итоге приводит к ее деградации [2]. Однако это не означает, что ТЭД немедленно выходит из строя. Проблемы с изоляцией могут вызывать существенное снижение КПД электрической машины, появление локальных нагревов (которые, в свою очередь, существенно ускоряют процессы деградации), нарушение герметичности конструкции и структуры изоляции с повышением степени ее увлажненности.

Повсеместный переход от планово-предупредительного обслуживания к обслуживанию по техническому состоянию предъявляет новые требования к методикам исследования изоляции. Так, современные методы должны не только устанавливать факт несоответствия изоляции требованиям, но и указывать на причину несоответствия. Именно поэтому формированию современных комплексных методов диагностирования уделяется сейчас большое внимание.

Применение комплексного метода диагностирования подразумевает анализ сложных процессов, происходящих в изоляции при наличии определенных диагностических воздействий. Отсюда следует, что схема замещения диагностируемого объекта (в нашем случае это система «обмотка – межвитковая изоляция») должна быть не только адаптированной к определенному методу, но и должна обладать достаточной избыточностью для возможности моделирования сложных процессов.

Одним из наиболее перспективных методов диагностирования состояния межвитковой изоляции электрических машин в настоящее время является метод волнового отклика. Принцип метода заключается в том, что на обмотку подается постоянное напряжение, обеспечивающее ток в обмотке порядка 10 % от номинального значения [3]. Затем цепь разрывается, а переходный процесс, происходящий в обмотке, фиксируется осциллографом.

Данный переходный процесс в большинстве случаев имеет форму волновых затухающих колебаний. Параметры отклика зависят от сопротивления межвитковой изоляции, межвитковой емкости и общего состояния изоляции. Таким образом, определив значения параметров затухающих колебаний, можно судить о качестве изоляции электродвигателя [4].

Метод волнового отклика нашел применение в диагностировании межвитковой изоляции обмоток асинхронных двигателей [5, 6] и силовых трансформаторов [7].

Для успешного формирования схемы замещения физического объекта необходима предварительная фиксация его реакции на диагностические воздействия, которая в дальнейшем будет служить критерием адекватности построенной модели. Испытания на реальной машине необходимы также для определения наличия или отсутствия соответствующих реакций. Для проведения испытаний в качестве физической модели была выбрана коллекторная машина постоянного тока ПБ90МГ, схема фиксации волнового отклика в якорной обмотке данной электрической машины приведена на рисунке 1.

Испытания проводились в соответствии с приведенной выше методикой. Подключение коммутационных проводов осуществлялось непосредственно к щеткам, фиксация отклика производилась при помощи цифрового осциллографа *Rigol DS1052e*, работающего в ждущем режиме. Данный осциллограф имеет сертификат соответствия и нормированные метрологические характеристики.

Полученный волновой отклик приведен на рисунке 2.

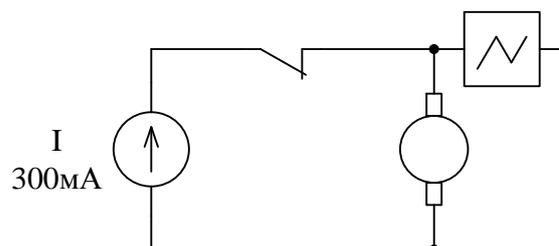


Рисунок 1 – Схема фиксации электрического волнового отклика

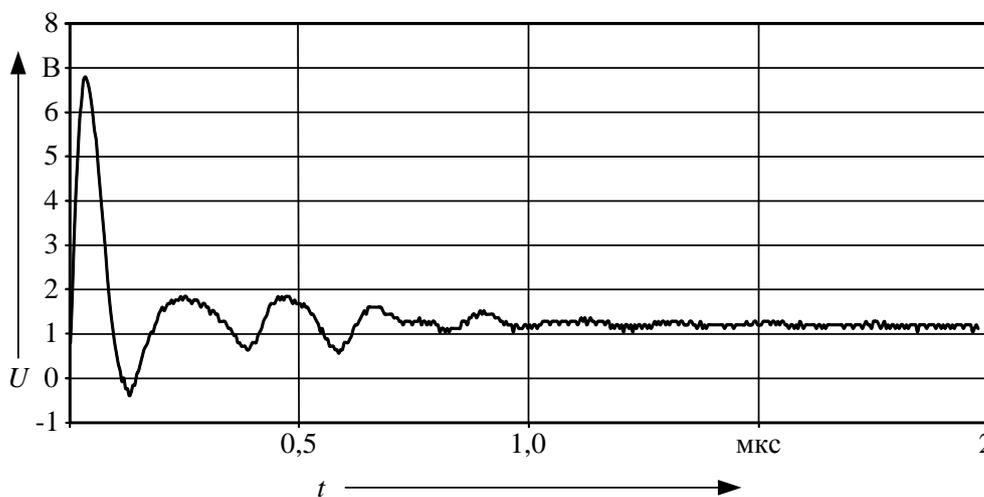


Рисунок 2 – Волновой отклик, снятый на якорной обмотке машины 2ПБ90МГ

Сигнал представляет собой волновую затухающую характеристику с частотой порядка 0,5 МГц.

Форма сигнала позволяет судить о том, что внутри обмотки происходит сложный переходный процесс. Соответственно схема замещения должна обладать достаточной избыточностью. При разработке схемы замещения учитывались следующие требования:

- модель должна учитывать существующие наработки в данной области;
- схема должна быть адаптирована к моделированию различного рода повреждений изоляции;
- схема должна быть адаптирована к применению метода волнового отклика.

Основой для составления схемы замещения якорной обмотки ТЭД послужили известные схемы замещения обмоток асинхронных двигателей и силовых трансформаторов для исследования по методу волнового отклика [8, 9].

На рисунке 3 представлена полученная схема замещения якорной обмотки применительно к описанному методу.

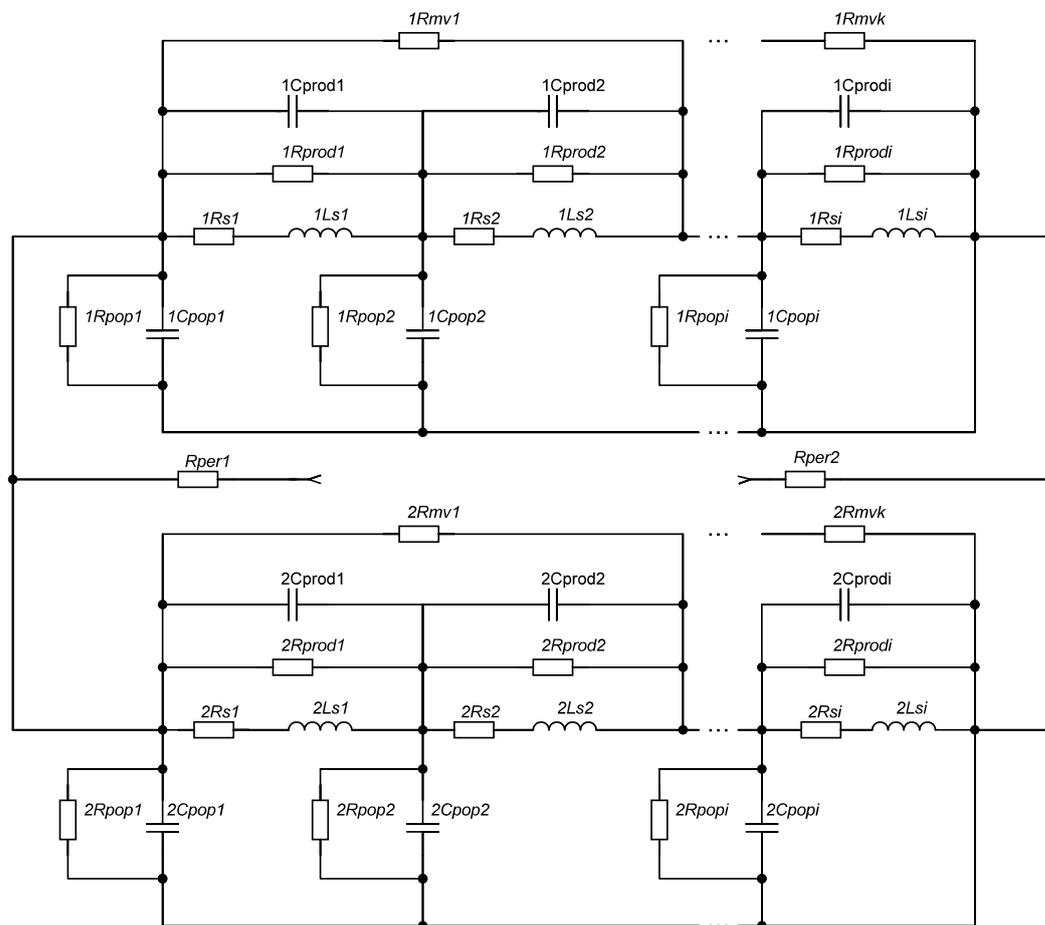


Рисунок 3 – Предлагаемая схема замещения якорной обмотки

Схема представляет собой масштабируемую развернутую модель якорной обмотки с учетом сопротивления щеточных контактов. Межвитковая емкость представлена равномерно распределенной по секции системой параллельных контуров из конденсаторов (емкость) и резисторов (потери в емкости). Сопротивление изоляция представлено резистором R_{mv} , включенным параллельно условно определенной границе витка или секции (в зависимости от глубины моделирования).

Преимуществом схемы является ее масштабируемость, что позволяет моделировать как локальные повреждения (межвитковое замыкание), так и глобальные (нарушение изоляции секции, локальные увлажнения и др.).

На приведенной схеме обозначены следующие элементы:

R_{per1} и R_{per2} – переходные сопротивления щеточных контактов;

R_{pop} и C_{pop} – поперечные составляющие распределенной модели межвитковой емкости;

R_{prod} и C_{prod} – продольные составляющие распределенной модели межвитковой емкости.

Обозначения элементов содержат префиксы «1» и «2», обозначающие принадлежность к соответствующей параллельной ветви.

Значения R_s и L_s соответствуют паспортным значениям сопротивления и индуктивности якорной цепи машины, равномерно распределенным по обеим параллельным ветвям. Так, для физической модели (машины 2ПБ90МГ) паспортные значения сопротивления и индуктивности якорной цепи составляют 1,46 Ом и 34 мкГн соответственно [10].

С использованием составленной схемы замещения было проведено имитационное моделирование переходных процессов в якорной обмотки с помощью программной среды MatLab (пакет Simulink), заданы необходимые начальные условия моделирования, параметры элементов и выбрано время моделирования. На рисунке 4 приведен соответствующий фрагмент рабочей области MatLab.

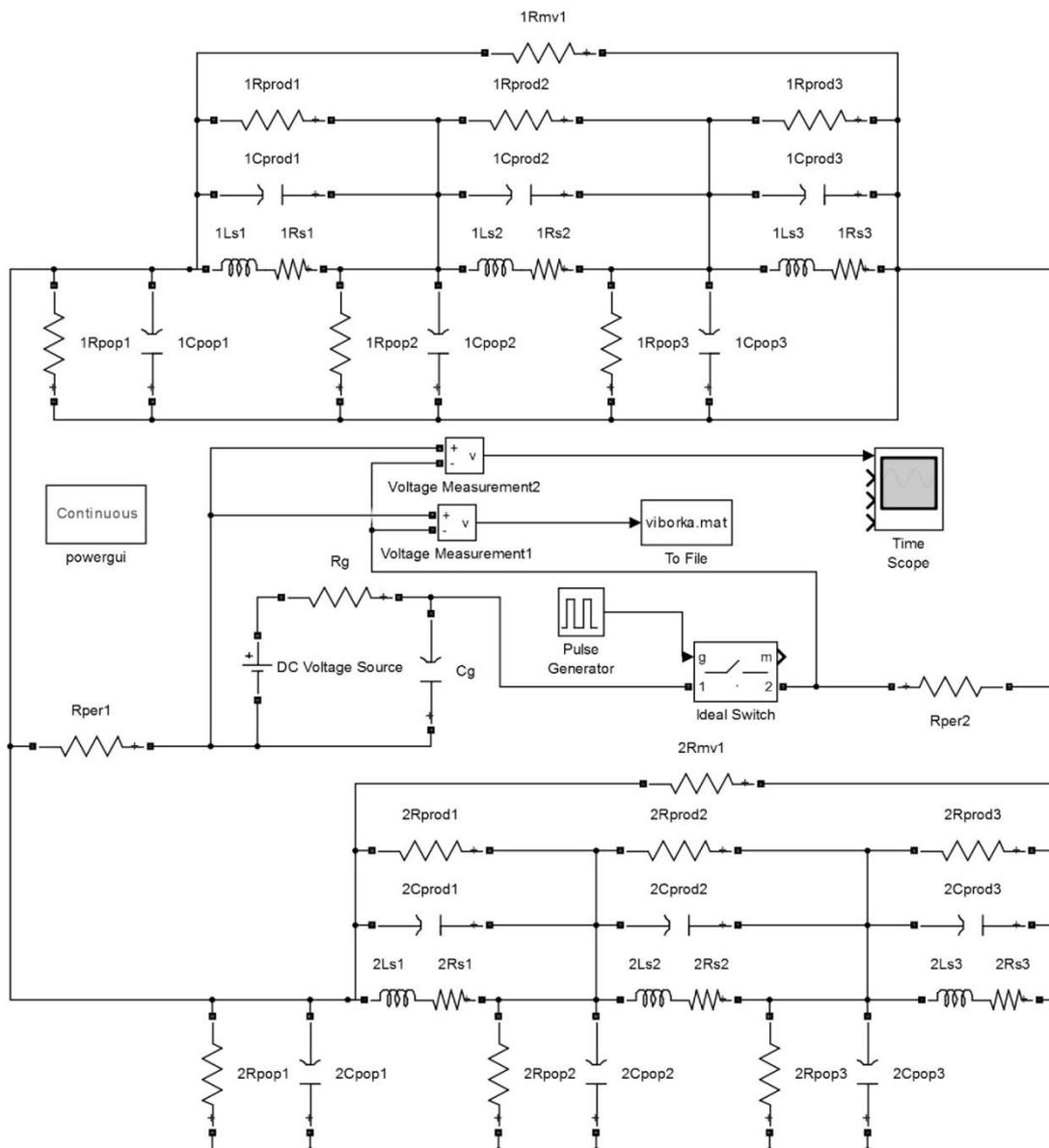


Рисунок 4 – Имитационная модель якорной обмотки в MatLab

На рисунке 5 приведен волновой отклик, полученный при имитационном моделировании переходного процесса в якорной обмотке с использованием среды MatLab.

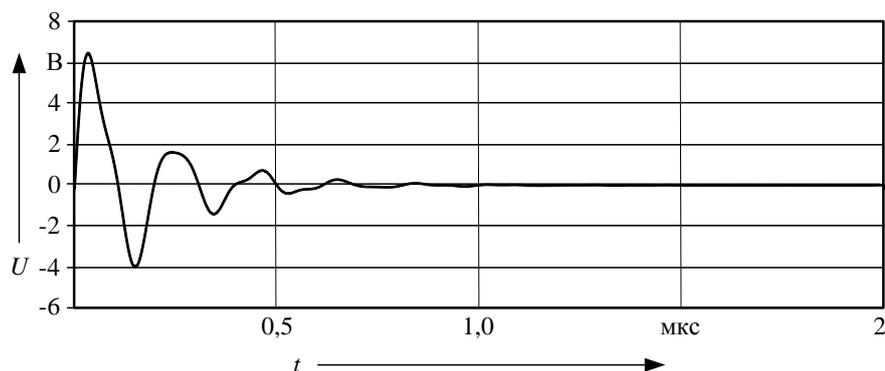


Рисунок 5 – Волновой отклик, полученный при имитационном моделировании

При первом рассмотрении можно отметить сходство в смоделированных и полученных экспериментально формах сигнала. Частота затухающих колебаний в смоделированной модели отличается от реальной не более чем на 10 кГц (по итогам серии из десяти измерений на реальной модели).

Для более детального сравнения полученные отклики были приведены к нулю, масштабированы, подогнаны по фазе и построены на одном графике. Полученный график приведен на рисунке 6, где смоделированный отклик показан штриховой линией.

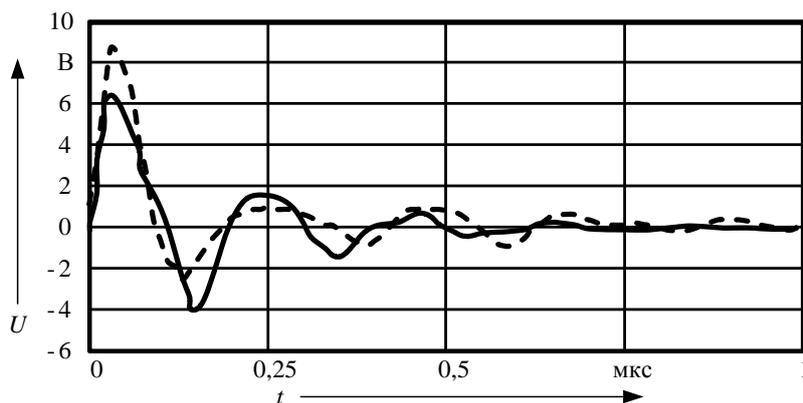


Рисунок 6 – Сравнение экспериментального и смоделированного откликов

При помощи пакета статистического анализа *Microsoft Excel* произведен анализ остатков (разностей значений сигнала, реального и смоделированного откликов в каждом шаге дискретизации). Анализ показал, что отклонения имеют нормальное распределение с математическим ожиданием, близким к нулю.

Таким образом, проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволяют сделать вывод о том, что метод волнового отклика может быть использован для оценки технического состояния межвитковой изоляции якорной обмотки тягового электродвигателя.

Сформированная схема замещения и имитационная модель якорной обмотки тягового электродвигателя дают возможность определить диагностические параметры волнового отклика для оценки состояния изоляции.

Список литературы

1. Grubic S., Aller J. M., Lu B., Habetler T. G. A Survey on Testing and Monitoring Methods for Stator Insulation Systems of Low-Voltage Induction Machines Focusing on Turn Insulation Problems IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, № 12, pp. 4127 – 4136.

2. Jones D. O., Jowett J. R., Thomson S. G., Danner D. S. – Megger: Guide to Diagnostic Insulation Testing Above 1 kV, Second Edition. – 2002. – 47 p.

3. Харламов, В. В. Оценка технического состояния изоляции тяговых электродвигателей подвижного состава [Текст] / В. В. Харламов, П. К. Шкодун, И. В. Шестаков // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: материалы всерос. техн. конф. с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2014. – С. 211 – 222.

4. Методы и приборы диагностирования изоляции асинхронных двигателей [Текст] / Н. П. Воробьев, С. Н. Воробьева и др. // Ползуновский вестник. – 2011. – № 2/2. – С. 261 – 269.

5. Pollak A. The use of DC current to testing condition of the insulation of electrical machines. – *Przegląd elektrotechniczny*, 2013, № 1, pp. 123 – 131.

6. Сташко, В. И. Моделирование состояния изоляции обмоток асинхронных двигателей сезонно эксплуатируемого электрооборудования на основе использования показателей волнового переходного процесса [Текст] / В. И. Сташко, И. Б. Губин // Ползуновский вестник. – 2002. – № 1. – С. 51 – 56.

7. Грибанов, А. А. Повышение достоверности диагностики силовых трансформаторов на основе спектрального анализа параметров переходного процесса в обмотках фаз одного напряжения [Текст] / А. А. Грибанов // Ползуновский вестник. – 2009. – № 4. – С. 54 – 61.

8. Decner A., Glinka T., Polak A. Diagnostic Tests Method of Turn to Turn Insulation. – *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, 2008, № 79, pp. 103 – 106.

9. Грибанов, А. А. Математическое моделирование диагностического сигнала при оценке состояния силовых трансформаторов по методу низковольтных импульсов [Текст] / А. А. Грибанов, С. О. Хомутов // Ползуновский вестник. – 2010. – № 2. – С. 232 – 238.

10. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. [Текст] / Под ред. И. П. Копылова, Б. К. Клокова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – Т.1. – 456 с.

References

1. Grubic S., Aller J. M., Lu B., Habetler T. G. A Survey on Testing and Monitoring Methods for Stator Insulation Systems of Low-Voltage Induction Machines Focusing on Turn Insulation Problems *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, no. 12, pp. 4127 – 4136.

2. Jones D. O., Jowett J. R., Thomson S. G., Danner D. S. – Megger: Guide to Diagnostic Insulation Testing Above 1kV, Second Edition. – 2002, 47 p.

3. Harlamov V. V., Shkodun P. K., Shestakov I. V. Evaluation of traction motors insulation technical condition on rolling stock [Ekspluatatsionnaya nadezhnost lokomotivnogo parka i povyshenie effektivnosti tyagi poezdov]. *Materialyi vtoroy vserossiyskoy tehnicheckoy konferentsii s mezhdunarodnyim uchastiem «Ekspluatatsionnaya nadezhnost' lokomotivnogo parka i povyshenie effektivnosti tyagi poezdov»* (Materials all-russian technical conference with international participation «The operational reliability of the locomotive fleet and improving the efficiency of traction trains»). Omsk, 2014, pp. 211 – 222.

4. Vorobev N. P., Vorobjeva S. N., Suhankin G. V., Gertsen N. T. Methods and devices for testing of induction machines insulation [Metody i pribory diagnostirovaniia izoliatsii asinkhronnykh dvigatelei]. *Polzunovskiy vestnik – Polzunovskiy Gazette*, 2011, no. 2/2, pp. 261 – 269.

5. Pollak A. The use of DC current to testing condition of the insulation of electrical machines. – *Przegląd elektrotechniczny*, 2013, № 1, pp. 123 – 131.

6. Stashko V. I., Gubin I. B. Simulation of seasonal operating induction machines insulation condition using wave transient process parameters [Modelirovanie sostoianiia izoliatsii obmotok asinkhronnykh dvigatelei sezonno ekspluatiruemogo elektrooborudovaniia na osnove ispol'zovaniia pokazatelei vol-novogo perekhodnogo protsesssa]. *Polzunovskiy vestnik – Polzunovskiy Gazette*, 2002, no. 1, pp. 51 – 56.

7. Griбанov A. A., Homutov S. O. Improving reliability of supply transformers insulation testing using spectral analysis of transient process parameters in same voltage phase windings [Pov-

yshenie dostovernosti diagnostiki silovykh transformatorov na osnove spektral'nogo analiza parametrov perekhodnogo protsessa v obmotkakh faz odnogo napriazheniia]. *Polzunovskiy vestnik – Polzunovsky Gazette*, 2009, no. 4, pp. 54 – 61.

8. Decner A., Glinka T., Polak A. Diagnostic Tests Method of Turn to Turn Insulation. – *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, 2008, №79, pp. 103 – 106.

9. Gribanov A. A., Homutov S. O. Mathematical simulation of testing signal in state assessment process by low-voltage impulses [Matematicheskoe modelirovanie diagnosticheskogo signala pri otsenke sostoianiia silovykh transformatorov po metodu nizkovol'tnykh impul'sov]. *Polzunovskiy vestnik – Polzunovsky Gazette*, 2010, no. 2, pp. 232 – 238.

10. Kopilov I. P. Klokov B. K. *Spravochnik po elektricheskim mashinam* (Electrical machines guide). Moscow: Energoatomizdat, 1988, T. 1, 456 p.

УДК 621.313

А. С. Хлопцов, А. В. Долгова, Д. А. Ахунов

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛОВИЗИОННОГО МЕТОДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЗОНЕ КОЛЛЕКТОРНО-ЩЕТОЧНОГО УЗЛА ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Целью работы, результаты которой приведены в данной статье, является выявление эффективного диагностического параметра процесса нагрева в зоне коллекторно-щеточного узла тягового электродвигателя подвижного состава. В статье предложена развернутая эквивалентная тепловая схема замещения коллекторно-щеточного узла тягового электродвигателя. Проведен эксперимент на лабораторной установке согласно теории планирования эксперимента при центральном ротатбельном плане второго порядка с анализом полученных результатов. Предложена методика обработки результатов термографического исследования машины. Составлены уравнения регрессии, отражающие степень влияния параметров режимов работы машины на интенсивность нагрева в зоне коллекторно-щеточного узла тягового электродвигателя. Корректность использования математического аппарата подтверждается количественным расчетом t -критерия Стьюдента при оценке значимости коэффициентов уравнений и F -критерия Фишера для 5 % уровня значимости. Результаты исследования могут быть использованы для дополнения методики диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла тягового электродвигателя.

Работа тягового электродвигателя (ТЭД), составляющего основу тягового электропривода подвижного состава железнодорожного транспорта, сопровождается нагревом его частей и элементов вследствие действия факторов электрической и механической природы [1]. В настоящее время значительное внимание уделяется исследованиям тепловых процессов в ТЭД, в том числе изучаются вопросы нагрева обмотки якоря. При анализе распределения температуры в коллекторно-щеточном узле (КЩУ) ТЭД, как правило, рассматриваются только потери при протекании тока в щеточном контакте. Однако при подробном рассмотрении процессов нагрева в зоне КЩУ можно выделить несколько источников тепловых потерь различной природы. Характер нагрева в зоне КЩУ ТЭД зависит от действия нескольких факторов, влияющих также на качество коммутации машины: температура в зоне контакта «щетка – коллектор» влияет на величину падения напряжения в щеточном контакте $\Delta U_{щ}$ и, соответственно, на процесс коммутации секций якорной обмотки [2].

Тепловые процессы в ТЭД принято описывать с использованием эквивалентных тепловых схем замещения [3]. Такие схемы строятся по аналогии с принципиальной электрической схемой, где потери представлены в виде источников ЭДС, а тепловые сопротивления между источниками тепла или узлами схемы, – как резистивные элементы. Эквивалентная тепловая схема замещения исследуемого КЩУ ТЭД представлена на рисунке 1, на котором можно выделить следующие источники тепла: $P_{щ}$ – потери в щетке, представляющие собой тепло, выделяемое при протекании электрического тока; $P_{конт}$ – потери в контакте «щетка –

коллектор», обусловленные механическим трением в контакте, протеканием тока через контакт и электродуговым искрением на сбегающем крае щетки; P_k – потери в меди пластин коллектора. В представленной схеме замещения приняты следующие обозначения тепловых сопротивлений: $R1$ – «графит щетки – воздух»; $R2$ – «графит щетки – щеточный контакт»; $R3$ – «щеточный контакт – воздух»; $R4$ – «щеточный контакт – пластина коллектора»; $R5$ – «пластина коллектора – воздух». Здесь под щеточным контактом понимается переходный слой между щеткой и коллекторной пластиной, обуславливающий поверхностное контактирование взаимоподвижных неразмыкающихся тел.

С целью определения комплексного влияния основных факторов, воздействующих на интенсивность нагрева контакта «щетка – коллектор» при работе электродвигателя, проведены экспериментальные исследования, в процессе которых варьировались следующие факторы электрической и механической природы: ток якоря, уровень искрения, нажатие на щетку, частота вращения якоря электродвигателя.

Экспериментальная модельная установка создана на основе теории подобия, с учетом физической идентичности процессов, происходящих в КЩУ ТЭД железнодорожного подвижного состава и машинах средней мощности при проведении прямо-сдаточных испытаний в стационарных режимах работы в условиях локомотивного депо [4]. В данном случае достигается идентичность условий испытаний различных машин, кроме того, на результаты исследования не оказывает влияние динамическое воздействие щеток и коллектора, что наблюдается в реальных условиях эксплуатации ТЭД на локомотиве в условиях повышенной вибрации. Такое допущение позволяет сократить количество варьируемых факторов и исключить вибрационную составляющую.

Установка выполнена на основе двух модельных машин серии ПЗ1М и позволяет независимо варьировать параметры исследуемой электромеханической системы (схема экспериментальной установки приведена на рисунке 2). Уровни и интервалы варьирования факторов представлены в таблице 1.

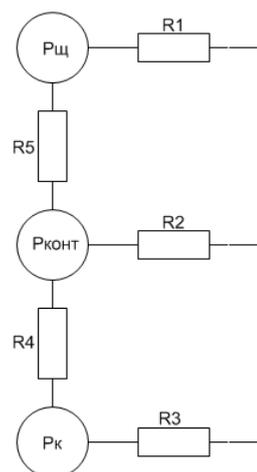


Рисунок 1 – Уточненная тепловая схема замещения КЩУ ТЭД

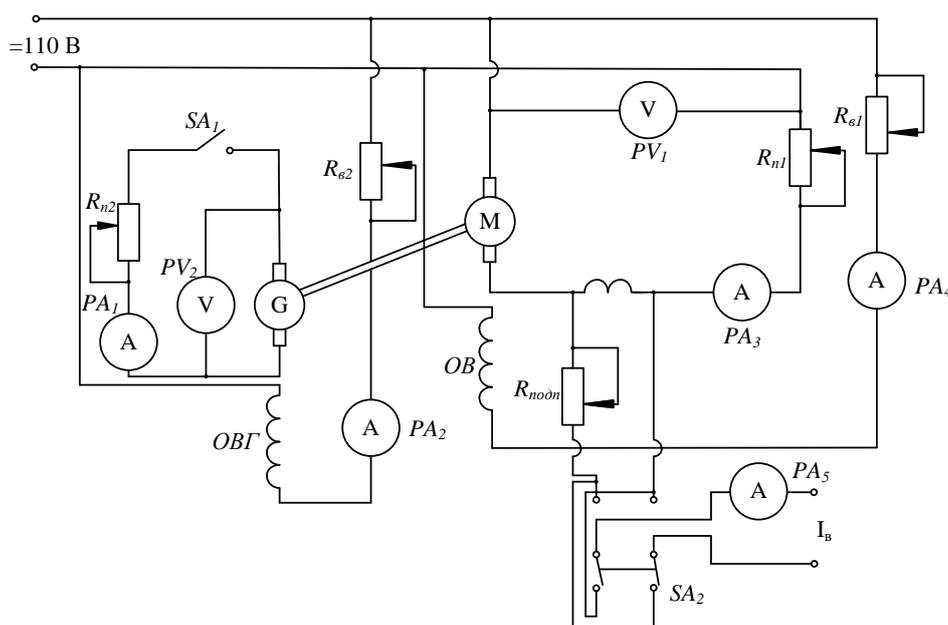


Рисунок 2 – Электрическая схема экспериментальной установки

Факторы варьировались независимо друг от друга [5]: уровень искрения щеток испытуемой машины М задавался изменением величины тока подпитки и отпитки I_n добавочных полюсов; частота вращения электродвигателя регулировалась изменением тока возбуждения; нажатие на щетку увеличивалось и уменьшалось путем замены пружины; ток якоря испытуемой машины М варьировался изменением значения тока нагрузки генератора G .

Таблица 1 – Уровни и интервалы варьирования факторов

Параметр	Кодовое обозначение	Натуральные значения уровней факторов, соответствующие кодированным				
		+ 2	+ 1	0	- 1	- 2
Ток якоря I_a , А	x_1	33	27	21	15	9
Уровень искрения А, баллы по ГОСТ 183-74	x_2	3	2	1 $\frac{1}{2}$	1 $\frac{1}{4}$	1
Частота вращения n , об/мин	x_3	3300	3150	3000	2850	2700
Нажатие на щетку $N_{щ}$, кг/см 2	x_4	0,36	0,3	0,24	0,18	0,12

Термограммы КЩУ регистрировались тепловизором марки TESTO 875-2 после запуска испытуемой машины при продолжительности ее работы 20 – 30 мин. и с шагом измерения в 30 с. Термограмма КЩУ после 15 мин. работы машины приведена на рисунке 3, из которого видно, что максимальная температура 75,9 °С достигается в точках М1, М2, М3 контакта «щетка – коллектор». В точке М4 на поверхности щетки с неконтактирующей стороны температура составила 56,3 °С, что ниже максимальной температуры.

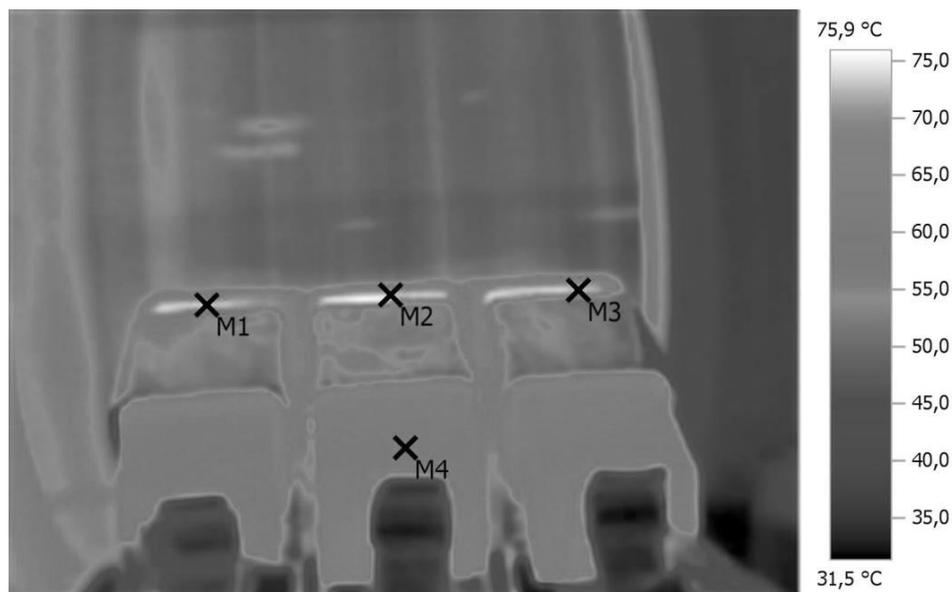


Рисунок 3 – Термограмма КЩУ, зафиксированная при длительности контроля 15 минут работы машины и $I_a = 30$ А

Как установлено ранее, в ТЭД щетки могут нагреваться неравномерно вследствие влияния различных факторов: не все щетки притерты одинаково; имеется различное нажатие на щетки; оказывает влияние профиль коллектора [6, 7].

Термограмма, приведенная на рисунке 4, фиксировалась при длительности контроля 20 мин. Температура на поверхности обмоток якоря и стального сердечника якоря постепенно возрастает, как и температура на поверхности «петушков». В точке М6, расположенной непосредственно в контакте «щетка – коллектор», температура составила 49,3 °С, а в точке М5, расположенной на поверхности «петушков» – 48,3 °С.

Для оценки интенсивности нагрева КЩУ предложено использовать величину среднего приращения температуры Θ_{cp} на заданном интервале, при этом для расчета использовался

шаг фиксации температуры в 30 с. Точки на кривой нагрева (рисунок 5) обрабатывались согласно следующему выражению:

$$\Theta_{\text{cp}} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \Delta\Theta_i, \quad (1)$$

где $\Delta\Theta_i$ – приращение температуры в i -ой точке;

n – количество точек на интервале.

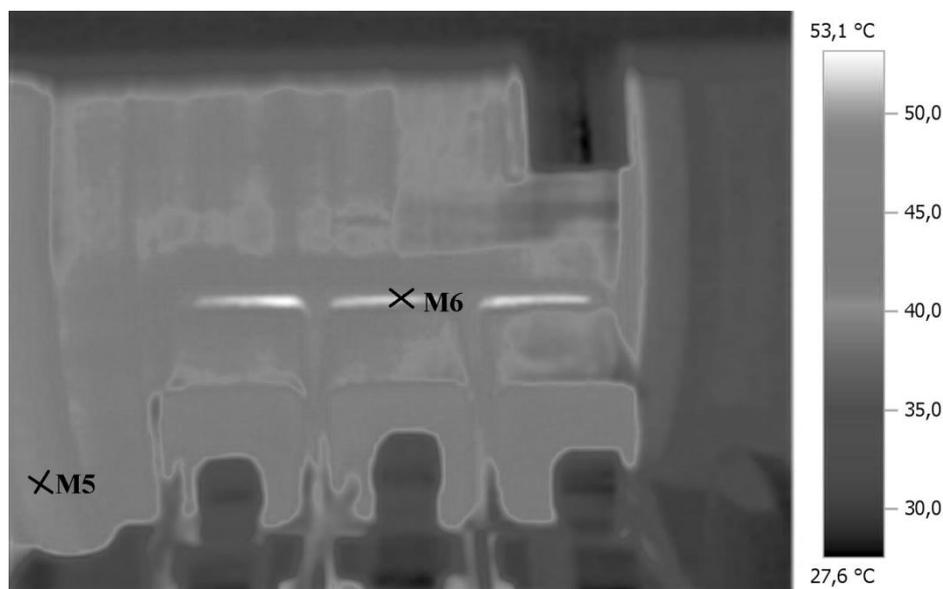


Рисунок 4 – Термограмма КЩУ, зафиксированная при длительности контроля 20 минут в номинальном режиме

Для оценки интенсивности нагрева КЩУ предложено использовать величину среднего приращения температуры Θ_{cp} на заданном интервале, при этом для расчета использовался шаг фиксации температуры в 30 с. Точки на кривой нагрева (рисунок 5) обрабатывались согласно следующему выражению:

$$\Theta_{\text{cp}} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \Delta\Theta_i, \quad (1)$$

где $\Delta\Theta_i$ – приращение температуры в i -ой точке;

n – количество точек на интервале.

Определение коэффициентов уравнения регрессии осуществлялось с помощью математического аппарата теории планирования эксперимента [4]. Для четырех входных факторов сформирована матрица ротатабельного униформ-планирования для полного факторного эксперимента с четырьмя функциями отклика среднего приращения температуры Θ_{cp} для длительности контроля 2, 3, 4 и 10 мин.

Для аппроксимации функции отклика $\Theta_{\text{cp}} = f(I_a, A, n, N_{\text{щ}})$ применен полином второй степени вида:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + \dots + b_{14} \cdot x_1 \cdot x_4 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{24} \cdot x_2 \cdot x_4 + b_{34} \cdot x_3 \cdot x_4 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2 + b_{44} \cdot x_4^2. \quad (2)$$

С использованием центрального ротатабельного планирования второго порядка подготовлен и проведен эксперимент. Используемый план позволяет получить модель, которая

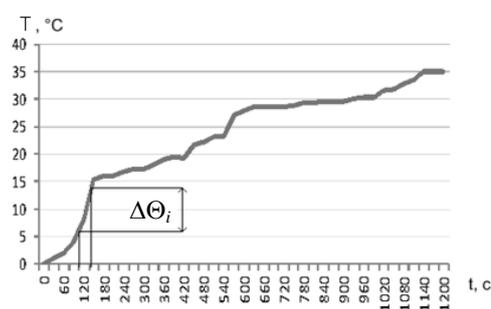


Рисунок 5 – Диаграмма нагрева контакта «коллектор – щетка»

предсказывает значение оцениваемого параметра с одинаковой точностью в любом направлении и на разных расстояниях от центра плана. Центральный композиционный ротатабельный план второго порядка состоит из плана полного факторного эксперимента типа 2^4 , шести опытов в «звездных точках» и семи опытов в центре плана.

Для оценки воспроизводимости результатов эксперимента выполнены семь параллельных опытов в нулевой точке. В центре плана четыре влияющих фактора находились в пределах нулевых уровней (таблица 2).

Таблица 2 – Матрица ротатабельного равномерного планирования эксперимента типа 2^k

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	$\Theta_{cp}, ^\circ C$			
						$\Theta_{cp}^{<2>}$	$\Theta_{cp}^{<3>}$	$\Theta_{cp}^{<4>}$	$\Theta_{cp}^{<10>}$
1	+	+	+	+	+	20,52	5	5,48	1,98
2	+	-	+	+	+	17,94	3,33	3,68	1,39
3	+	+	-	+	+	18,16	2,62	2,75	1,36
4	+	-	-	+	+	17,08	2,06	2,13	1,06
5	+	+	+	-	+	19,36	3,42	3,63	1,56
6	+	-	+	-	+	15,92	3,3	3,82	1,46
7	+	+	-	-	+	15,64	1,5	1,87	0,8
8	+	-	-	-	+	10,48	2,72	3,4	1,31
9	+	+	+	+	-	18,95	2,47	2,67	1,06
10	+	-	+	+	-	15,52	2,95	3,37	1,12
11	+	+	-	+	-	14,64	4,77	5,5	2,2
12	+	-	-	+	-	12,98	0,89	1,08	0,47
13	+	+	+	-	-	11,14	4,77	5,5	2,2
14	+	-	+	-	-	10,98	3,63	3,83	1,34
15	+	+	-	-	-	10,06	1,5	1,87	0,8
16	+	-	-	-	-	10,21	2,72	3,4	1,31
17	+2	+2	0	0	0	17,94	5,68	5,68	1,9
18	+2	-2	0	0	0	18,16	1,5	1,5	0,78
19	+2	0	+2	0	0	17,08	4	2,04	2,04
20	+	0	-2	0	0	19,36	3,3	3,5	1,31
21	+	0	0	+2	0	15,92	1,72	1,97	0,78
22	+	0	0	-2	0	15,64	3,2	3,5	1,31
23	+	0	0	0	+2	10,48	2,68	2,8	1,39
24	+	0	0	0	-2	18,95	7,68	8,17	2,72
25	+	0	0	0	0	15,52	4	4,48	1,34
26	+	0	0	0	0	14,64	4,4	4,18	1,7
27	+	0	0	0	0	12,98	4,1	2	1,4
28	+	0	0	0	0	11,14	2,4	3	2,4
29	+	0	0	0	0	10,98	3,6	5	1,8
30	+	0	0	0	0	10,06	2,1	2,5	1,24
31	+	0	0	0	0	10,21	2	3	1,18

Вычислена дисперсия воспроизводимости эксперимента по результатам этих опытов:

$$s_y^2 = \frac{1}{n_0 - 1} \left[\sum_{u=1}^{n_0} (y_u - \bar{y})^2 \right], \quad (3)$$

где n_0 – число параллельных опытов в нулевой точке;

y_u – значение отклика в u -ом опыте;

\bar{y} – среднее арифметическое значение отклика в n_0 параллельных опытах.

Дисперсия воспроизводимости эксперимента составила $s_y^2 = 1,055$.

По результатам эксперимента, выполненного в соответствии с принятым планом, рассчитаны значения коэффициентов уравнения регрессии по выражениям:

$$b_0 = \frac{A}{N} \left[2\lambda^2(k+2) \sum_{j=1}^N y_j - 2\lambda c \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^N x_{ij}^2 y_j \right]; \quad (4)$$

$$b_i = \frac{c}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} y_j; \quad (5)$$

$$b_{il} = \frac{c^2}{N\lambda} \sum_{j=1}^N x_{ij} x_{lj} y_j; \quad (6)$$

$$b_{ii} = \frac{A}{N} \left\{ c^2 [(k+2)\lambda - k] \sum_{j=1}^N x_{ij}^2 y_j + c^2 (1-\lambda) \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^N x_{ij}^2 y_j - 2\lambda c \sum_{j=1}^N y_j \right\}, \quad (7)$$

где j – номер опыта ($j = 0, 1, \dots, N$);

N – общее количество опытов;

i, l – номер фактора ($i = 0, 1, \dots, k; l = 0, 1, \dots, k$);

k – количество факторов;

x_{ij} – элементы X -матрицы условий эксперимента;

y_j – элементы Y -матрицы наблюдений.

Коэффициенты λ, A_1 и c уравнений (4) – (7) определены по выражениям:

$$\lambda = \frac{k(n_c + n_0)}{(k+2)n_c}; \quad (8)$$

$$A_1 = \frac{1}{2\lambda [(k+2)\lambda - k]}; \quad (9)$$

$$c = \frac{N}{\sum_{j=1}^N x_{ij}^2}; \quad (10)$$

$$n_c = N - n_0. \quad (11)$$

Используя приведенные выше формулы, найдены коэффициенты уравнения регрессии, результаты расчета представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Значения коэффициентов b_{il} уравнений регрессии

Длительность, мин	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_{13}
2	2,843	0,433	0,435	-0,144	-0,555	0,213
3	3,229	0,534	0,479	-0,101	-0,406	0,426
4	3,451	0,538	0,294	-0,155	-0,467	0,483
10	1,580	0,198	0,178	-0,05	-0,093	0,164

Дисперсия для каждого коэффициента уравнения регрессии определена по формуле:

$$s^2 \{b_i\} = \frac{1}{N} s_y^2. \quad (12)$$

Для проверки значимости коэффициентов уравнения регрессии использован t -критерий Стьюдента:

$$t_{pil} = \frac{|b_{il}|}{s\{b_i\}}. \quad (13)$$

Заданное значение критерия Стьюдента при 5 % уровне значимости и числе степеней свободы $f = 16$ составляет 2,12. Результаты расчета коэффициентов t -критерия Стьюдента приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты расчета коэффициентов t -критерия Стьюдента

Длительность, мин	t_{p0}	t_{p1}	t_{p2}	t_{p3}	t_{p4}
2	15,912	2,42	2,43	0,8	3,1
3	17,5	2,89	2,59	0,55	2,2
4	17,296	2,7	1,47	0,77	2,34
10	20,54	2,56	2,3	0,65	1,21

На рисунке 6 показана графическая интерпретация значимости коэффициентов уравнения, соответствующих влияющим факторам (силе тока, уровню искрения, частоте вращения, нажатию на щетку) в зависимости от длительности работы машины.

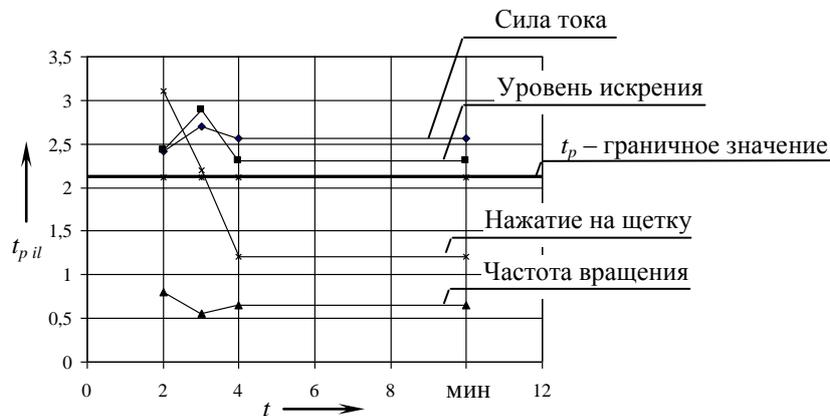


Рисунок 6 – Графическая интерпретация расчетных значений t -критерия Стьюдента

Адекватность полученной модели была проверена с помощью расчетного критерия Фишера:

$$F_p = \frac{s_{ад}^2}{s_y^2}, \quad (14)$$

где $s_{ад}^2$ – дисперсия адекватности.

$$s_{ад}^2 = \frac{s_R - s_E}{f}, \quad (15)$$

где f – число степеней свободы, $f = N - k' - (n_0 - 1)$;

k' – число статистически значимых коэффициентов регрессии.

$$s_R = \sum_{j=1}^N (y_j - \bar{y}_j)^2, \quad s_E = \sum_{u=1}^{n_0} (y_u - \bar{y})^2, \quad (16)$$

где y_j – экспериментальные значения функции отклика;

\bar{y}_j – расчетные значения функции отклика.

Расчетное значение F -критерия Фишера $F_p = 3,397$ меньше табличного $F_T = 4,74$ при 5%-ном уровне значимости. Следовательно, полученную математическую модель можно считать адекватной. В результате математических преобразований получены окончательные уравнения регрессии для длительности контроля в натуральных единицах:

$$2 \text{ мин} - \Theta_{\text{cp}}^{<2>} = 2,403 + 0,433 \cdot I_a + 0,435 \cdot A - 0,555 \cdot N_{\text{щ}};$$

$$3 \text{ мин} - \Theta_{\text{cp}}^{<3>} = 3,229 + 0,534 \cdot I_a + 0,479 \cdot A - 0,406 \cdot N_{\text{щ}} + 0,292 \cdot I_a \cdot n;$$

$$4 \text{ мин} - \Theta_{\text{cp}}^{<4>} = 3,451 + 0,538 \cdot I_a + 0,294 \cdot A - 0,467 \cdot N_{\text{щ}} + 0,483 \cdot I_a \cdot n;$$

$$10 \text{ мин} - \Theta_{\text{cp}}^{<10>} = 1,58 + 0,198 \cdot I_a + 0,178 \cdot A + 0,164 \cdot I_a \cdot n.$$

Анализ полученных регрессионных уравнений показывает, что уменьшение нажатия на щетку $N_{\text{щ}}$ приводит к увеличению температуры в контакте в связи с увеличением падения напряжения в электрическом контакте, следовательно к увеличению электрических потерь в нем. Кроме того, в этом случае возрастает интенсивность искрения под щеткой, что также приводит к росту температуры.

Проведенное экспериментальное исследование позволяет сделать вывод о том, что нагрев в зоне КЩУ электродвигателя происходит в два этапа: вначале происходит интенсивное повышение температуры щеточного контакта в течение 2 – 4 мин в результате воздействия потерь непосредственно в контакте $P_{\text{конт}}$, обусловленных механическим трением в контакте, протеканием тока через контакт, а также электродуговым искрением на сбегавшем крае щетки. Дальнейшее повышение температуры контакта, вплоть до установившейся через 10 – 15 мин, происходит в результате нагрева при протекании тока в меди коллектора и обмотке якоря.

Установлено, что на первых минутах работы электродвигателя тепловые процессы нагрева в зоне КЩУ ТЭД определяются действием факторов как механической, так и электрической природы. Уровень искрения щеток в КЩУ имеет значительное влияние на интенсивность нагрева в первые минуты работы машины, в последующем влияние данного фактора ослабевает. Влияние значения тока якоря на интенсивность нагрева контакта «щетка – коллектор» с увеличением временного интервала измерения также уменьшается. Нажатие на щетку имеет значительное влияние на интенсивность нагрева на первых минутах работы электродвигателя, с приближением к десятиминутному интервалу данный фактор перестает влиять полностью.

Таким образом, полученные регрессионные уравнения интенсивности нагрева контакта «щетка – коллектор» позволяют оценивать влияние факторов электрической и механической природы на параметр Θ_{cp} и могут использоваться для анализа тепловых процессов в КЩУ ТЭД железнодорожного подвижного состава в процессе диагностирования технического состояния электродвигателей.

Список литературы

1. Хольм, Р. Электрические контакты [Текст] / Р. Хольм. – М.: Иностранная литература, 1961. – 464 с.
2. Харламов, В. В. Методы и средства диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей и других коллекторных машин постоянного тока: монография [Текст] / В. В. Харламов // Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2002. – 233 с.
3. Щербатов, В. В. Моделирование теплового состояния тягового электродвигателя для прогнозирования ресурса [Текст] / В. В. Щербатов, О. Л. Рапопорт, А. Б. Цукублин // Известия ТПУ / Томский политехн. ун-т. – Томск, 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 156.
4. Харламов, В. В. Применение теории подобия при моделировании износа коллекторно-щеточного узла тягового электродвигателя [Текст] / В. В. Харламов, П. К. Шкодун, А. В. Долгова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2011. – № 4 (8). – С. 57 – 62.

5. Хикс, Ч. Основные принципы планирования эксперимента [Текст] / Под ред. В. В. Налимова / Ч. Хикс. – М.: Мир, 1967. – 406 с.

6. Харламов, В. В. Совершенствование процесса диагностирования профиля коллектора тяговых электродвигателей с помощью прибора ПКП-4М [Текст] / В. В. Харламов, П. К. Шкодун, Д. А. Ахунов, А. С. Хлопцов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2013. – № 1 (13). – С. 42 – 48.

7. Харламов, В. В. Термографические исследования коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей подвижного состава [Текст] / В. В. Харламов, А. В. Долгова, П. К. Шкодун, А. С. Хлопцов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2014. – №3 (19). – С. 44 – 50.

References

1. Holm R. *Elektricheskie kontakty* (Electric Contacts). Moscow: Foreign Literature, 1961, 464 p.

2. Kharlamov V. V. *Metody i sredstva diagnostirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya kollektorno-shchetchnogo uzla tyagovykh elektrodvigateley i drugikh kollektornykh mashin postoyannogo toka: monografiya* (Methods and means for diagnosing the technical condition of the traction motors collector-brush assembly and other collector DC machines: monograph). Omsk: OSTU, 2002, 233 p.

3. Sherbatov V. V., Rapoport O. L., Tzukublin A. B. *Modeling of a thermal condition of the traction electric motor for forecasting of a resource*. [Modelirovanie teplovogo sostoyaniya tyagovogo elektrodvigateleya dlya prognozirovaniya resursa]. *Izvestiia TPU – Bulletin of TPU*, 2005, vol. 308, no. 7, pp. 156.

4. Kharlamov V. V., Shkodun P. K., Dolgova A. V. *Application of similarity theory in modeling of wear traction motor commutator-brush assembly* [Primenenie teorii podobiya pri modelirovani iznosa kollektorno-shchetchnogo uzla tyagovogo elektrodvigateleya]. *Izvestia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2011, no. 4 (8), pp. 57 – 62.

5. Hicks C. *Osnovnye printsipy planirovaniya eksperimenta* (Basic Principles of Experiment Planning). Moscow: Mir, 1967, 406 p.

6. Kharlamov V. V., Shkodun P. K., Ahunov D. A., Khloptsov A. S. *Improvement of diagnosing process of commutator profile of traction electric motors with PKP-4M device* [Sovershenstvovanie protsessa diagnostirovaniya profilya kollektora tyagovykh elektrodvigateley s pomoshch'yu pribora PKP-4M]. *Izvestia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2013, no. 1 (13), pp. 42 – 48.

7. Kharlamov V. V., Dolgova A. V., Shkodun P. K., Khloptsov A. S. *Thermographic study of collector-brush assembly traction motors of rolling stock* [Termograficheskie issledovaniya kollektorno-shchetchnogo uzla tyagovykh elektrodvigateley podvizhnogo sostava]. *Izvestia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2014, no. 3 (19), pp. 44 – 50.

УДК 629.4.02

С. Г. Шантаренко, В. Ф. Кузнецов, О. Д. Юрасов

ОСОБЕННОСТИ ТОКОСЪЕМА В КОЛЛЕКТОРНО-ЩЕТОЧНОМ УЗЛЕ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВЗОВ 2ЭС6

Работа коллекторно-щеточного узла во многом влияет на эксплуатационную надежность тяговых электродвигателей постоянного тока. В статье приведены результаты моделирования контактного взаимодействия «щетка – коллектор» в тяговом электродвигателе электровоза 2ЭС6. Рассмотрено влияние конструктивных особенностей щеткодержателя, условий и режимов эксплуатации на качество коммутации ТЭД. На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований предложены рекомендации по повышению качества контакта «щетка – коллектор» и обеспечению к эксплуатационной надежности тяговых электродвигателей.

Устойчивая работа тяговых электродвигателей (ТЭД) является важнейшим фактором, определяющим эксплуатационную надежность электровоза. Одной из основных причин отказов ТЭД является неудовлетворительная работа коллекторно-щеточного узла (КЩУ), приводящая к нарушениям процесса токосъема.

На условия токосъема существенное влияние оказывают геометрические параметры поверхностей щеток и пластин коллектора (площадь контакта). Так как щетка является активным элементом коммутационного процесса, то уменьшение площади ее фактического контакта с коллектором приводит к увеличению плотности тока и, как следствие, к повышенному искрообразованию в коммутируемом контуре обмотки якоря.

Конструкция щеткодержателей ТЭД электровозов 2ЭС6 (рисунок 1) выполнена таким образом, что прижатие щеток к коллектору обеспечивается спиральными пружинами, плоские хвостовики которых давят на щетки. По мере износа щетки изменяется место приложения силы давления пружины, что приводит к неравномерному распределению давления по поверхности щетки и ее перекоосу в щеткодержателе. Следствием этого являются «клиновидный» износ щеток и уменьшение фактической площади контакта «щетка – коллектор». Величина «клиновидного» износа определяется размерами фактической площадки контакта между щеткой и коллектором, которая в основном зависит от двух факторов: характера неровностей (высоты и количества неровностей) в области контакта щетки и коллектора и от значения и направления прижимающей силы хвостовиков спиральных пружин щеткодержателя.

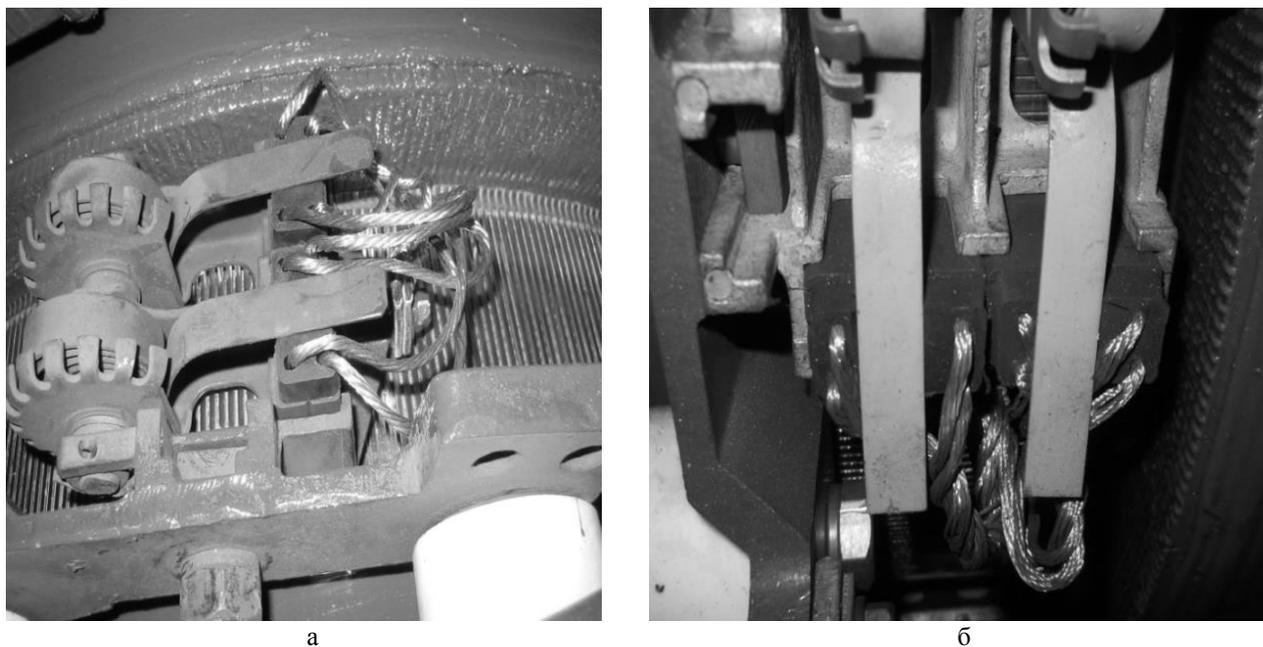


Рисунок 1 – Конструкция щеткодержателей ТЭД электровоза 2ЭС6

На одну неровность на коллекторной пластине приходится нагрузка [1]

$$P = \frac{Nb_{пл}}{nb_{щ}}, \quad (1)$$

где N – прижимающая сила хвостовика рулонной пружины щеткодержателя;

$b_{пл}$ – ширина коллекторной пластины;

n – количество неровностей на коллекторной пластине (зависит от шага обточки коллектора при ремонте ТЭД);

$b_{щ}$ – ширина щетки.

Схема для расчета величины «клиновидного» износа щетки приведена на рисунке 2.

Нагрузка P распределяется по площади контакта щетки (плоскость) и неровности коллекторной пластины (цилиндр), которая является прямоугольной с шириной

$$b = 4\sqrt{\frac{P}{\pi d}(k_1 + k_2)R}, \quad (2)$$

где l – длина площадки контакта;

R – высота неровности;

k_i – коэффициент, зависящий от упругости материала (щеткой и коллекторной пластины), рассчитываемый по формуле:

$$k_i = \frac{1 - \mu_i^2}{E_i}, \quad (3)$$

где μ_i – коэффициент Пуассона;

E_i – модуль упругости материала (щеткой и коллекторной пластины).

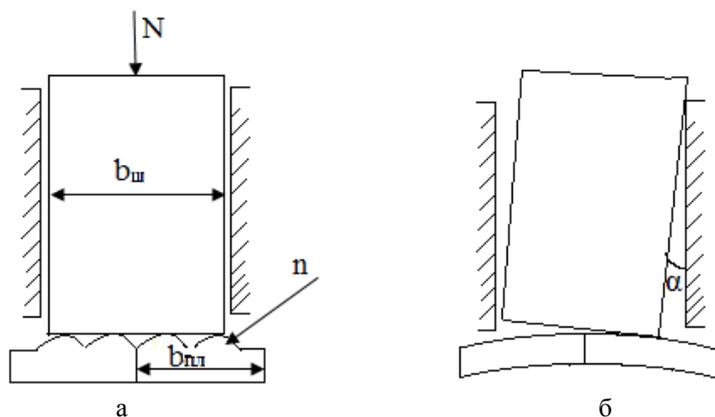


Рисунок 2 – Схема для расчета величины «клиновидного» износа щетки

Для определения величины износа контактирующих поверхностей необходимо найти длину l площадки контакта между щеткой и коллекторной пластиной.

Износ материала прекратится при условии

$$\tau_k \leq \tau_{пр}, \quad (4)$$

где τ_k – касательное напряжение на площадке контакта;

$\tau_{пр}$ – предельное касательное напряжение разрушения более мягкого контактирующего материала.

Касательное напряжение на площадке контакта

$$\tau_k = \frac{P f_{ск}}{S_k}, \quad (5)$$

где $f_{ск}$ – коэффициент трения скольжения щетки по коллекторной пластине;

$S_k = b \cdot l$ – площадь контакта между щеткой и коллекторной пластиной.

При условии $\tau_k = \tau_{пр}$, получим равенство:

$$P f_{ск} = 4l \sqrt{\frac{P}{\pi l}(k_1 + k_2)R} \cdot \tau_{пр}. \quad (6)$$

Из уравнения (6) найдем максимальное значение длины площадки контакта

$$l = \frac{P f_{ск}^2 \pi}{16R(k_1 + k_2)\tau_{пр}^2} \quad (7)$$

или

$$l = \frac{Nb_{\text{щ}} f_{\text{ск}}^2 \pi}{16nb_{\text{щ}} R(k_1 + k_2) \tau_{\text{пр}}^2}. \quad (8)$$

При этом площадь щетки, через которую фактически будет происходить токосъем,

$$S_{\text{эф}} = \frac{l}{b_{\text{щ}}} = \frac{Nb_{\text{щ}} f_{\text{ск}}^2 \pi}{16nR(k_1 + k_2) \tau_{\text{пр}}^2}. \quad (9)$$

Длина площадки контакта между щеткой и коллектором достигнет максимального значения при условии:

$$l = \frac{a_{\text{щ}}}{\sin \alpha}, \quad (10)$$

где α – угол зазора между щеткой и щеткодержателем.

Приведенная модель площади контакта «щетка – коллектор» показывает, что при работе коллекторно-щеточного узла ТЭД электровоза 2ЭС6 влияние на величину «клиновидного» износа щетки оказывают указанные выше конструктивная особенность щеткодержателя, приводящая к неравномерному распределению давления прижимной пружины по поверхности щетки и ее перекосу в щеткодержателе, а также физико-механические свойства щетки и качество обработки коллектора при ремонте.

Тяговые электродвигатели электровозов работают в реверсивном режиме. В технологической документации по техническому обслуживанию и ремонту ТЭД для коллекторно-щеточного аппарата устанавливаются допуски на размеры окон щеткодержателей как по ширине, так и по длине (Руководство по техническому обслуживанию и текущему ремонту тяговых электродвигателей локомотивов). В связи с этим имеет место зазор между щеткодержателем и щеткой, в результате чего щетка может быть установлена на коллекторе с перекосом. Для тяговых электродвигателей электровозов 2ЭС6 дополнительное негативное воздействие на расположение щетки в окне щеткодержателя оказывает неравномерное распределение давления прижимной пружины по поверхности щетки, обусловленное конструктивной особенностью щеткодержателя. Все это приводит к тому, что набегающий край щетки изнашивается быстрее сбегающего и сбегающий край принимает остроугольную форму. После реверсирования тягового двигателя край щетки, который был сбегающим, становится набегающим и образовавшаяся ранее остроугольная кромка начинает скалываться. Происходит засорение межламельных канавок угольными частицами (замыкание соседних коллекторных пластин между собой), на коллекторе возникает искрение, которое может повлечь за собой отказ ТЭД в эксплуатации.

Немаловажным фактором, влияющим на неравномерный износ щеток, является удлинение тяговых плеч электровозов 2ЭС6. В данном случае даже при отсутствии зазоров в окне щеткодержателя происходит неравномерный износ набегающего и сбегающего краев щеток вследствие длительного вращения электродвигателя в одну сторону, в результате чего после изменения направления движения локомотива происходят явления, подобные описанным выше.

На испытательной станции сервисного локомотивного депо Московка был проведен ряд экспериментов по изучению влияния длительного вращения якоря ТЭД в одном направлении и изменения направления вращения на работу коллекторно-щеточного узла (наработку «зеркала» щеточного контакта) [2]. Суть экспериментов заключалась в том, что производилась длительная притирка щеток к коллектору при одном направлении вращения. После полной притирки щеток производился реверс ТЭД и задавался один из режимов, имитирующих рабочую схему соединения электродвигателей электровоза постоянного тока (последовательное (С) – I режим, последовательно-параллельное (СП) – II режим, параллельное соединение (П) – III режим), при номинальном токе якоря без ослабления поля обмотки возбуждения. Эксперимент проводился до полной притирки щеток после реверса с образованием нового

«зеркала». При каждом режиме работы ТЭД через определенные промежутки времени замерялись степень притирки (ширина «зеркала») и качество коммутации (динамика искрения) – посредством прибора контроля коммутации ПКК-2М, работа которого основана на измерении импульсов искрения под сбегавшем краем щетки.

Проведенные эксперименты показали, что сразу после реверса происходит «опрокидывание зеркала» щеток – поверх старого «зеркала» начинает нарабатываться новое (рисунок 3). В начальный момент наработки нового «зеркала» возникает «пиковое» искрение, величина которого зависит от режима работы ТЭД. Наиболее неблагоприятным условием сразу после реверса ТЭД является его перевод в III режим работы («П»-соединение). При данном соединении тяговых электродвигателей уровень искрения может достигать 3600 условных единиц по шкале прибора (порядка 2 баллов по ГОСТ 183-74).

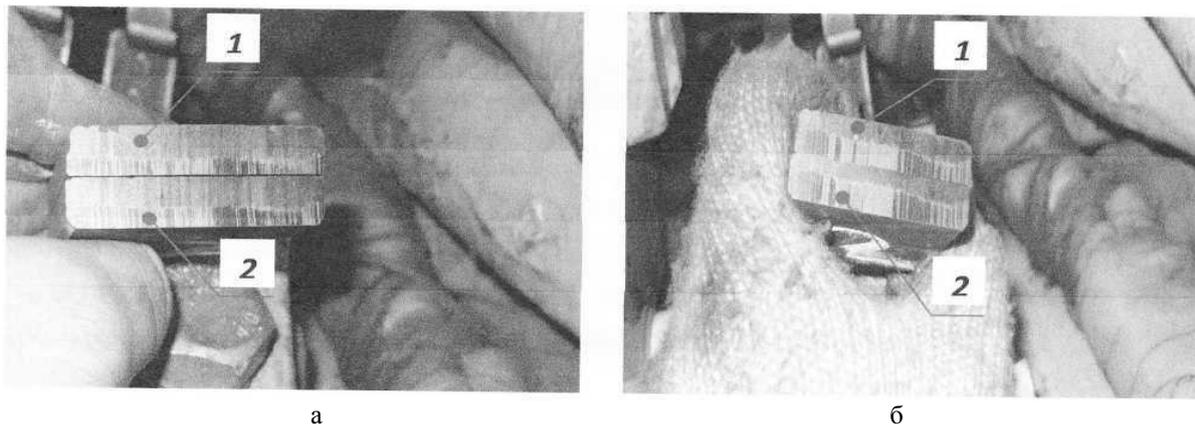


Рисунок 3 – Нароботка «зеркала» после реверса: 1 – «зеркало» до реверса; 2 – «зеркало» после реверса

По результатам проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы.

В результате неблагоприятных явлений, связанных с перекосом щеток в окнах щеткодержателей тяговых электродвигателей электровозов 2ЭС6, необходимо повышать качество ремонта коллекторно-щеточного узла, в том числе за счет минимизации допусков и износов по геометрическим параметрам щеткодержателей. В качестве рекомендации в эксплуатации предлагается сразу после изменения направления движения давать время на притирку щеток к коллектору, установив I режим («С»-соединение) работы электровоза в течение порядка 30 минут, пока уровень искрения не достигнет допустимого в эксплуатации (1,25).

Одним из вариантов обеспечения равномерной приработки щеток к коллектору в обоих направлениях вращения якоря ТЭД является оптимизация (уменьшение) длины тягового плеча, что исключит вероятность «клиновидного» износа щеток со всеми вытекающими неблагоприятными последствиями.

Кроме того, необходимо усовершенствовать конструкцию щеткодержателя ТЭД электровозов 2ЭС6 для обеспечения равномерного распределения давления щеток на коллектор и устранения их перекосов в окнах щеткодержателей.

Данные изменения приведут к улучшению работы тяговых электродвигателей, что в конечном счете скажется на повышении эксплуатационной надежности электровозов 2ЭС6.

Список литературы

1. Шантаренко, С. Г. Контактное взаимодействие на коллекторе и теплоэнергетические процессы в цепи якоря тягового электродвигателя [Текст] / С. Г. Шантаренко, Д. Ю. Белан, А. А. Лаптев // Вестник транспорта Поволжья / Самарский гос. ун-т путей сообщения. – Самара. – 2009. – № 1 (17) . – С. 55 – 62.
2. Юрасов, О. Д. Исследование коммутации тягового электродвигателя, работающего в режиме реверса [Текст] / О. Д. Юрасов, В. В. Бублик, О. В. Гателюк // Материалы всероссийской науч.-техн. конф. с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2014. – С. 189 – 194.

References

1. Shantarenko S. G., Belan D. Iu., Laptev A. A. Contact interaction of the collector and heat power processes in the anchor chain of the traction motor [Kontaktное vzaimodeistvie na kollektore i teploenergeticheskie protsessy v tsepi iakoria tiagovogo elektrodvigatel'ia]. Vestnik transporta Povolzh'ia – Bulletin of the Volga transport, 2009, no. 1 (17), pp. 55 – 62.
2. Iurasov O. D., Bublik V. V., Gateliuk O. V. Study switching the traction motor running in reverse mode [Issledovanie kommutatsii tiagovogo elektrodvigatel'ia, rabotaiushchego v rezhime reversa]. Materialy vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem (Proceedings of All-Russian-tion of scientific and technical conference with international participation). – Omsk, 2014, pp. 189 – 194.

УДК 629.424.14.004:621.436

В. Р. Ведрученко, В. В. Крайнов, Н. В. Жданов

РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ТОПЛИВОПОДАЧИ ТЕПЛОВОЗНОГО ДИЗЕЛЯ НА МАЛОВЯЗКОМ ТОПЛИВЕ

Выполнен анализ способов расчета топливоподачи в дизелях, учитывающих свойства топлива. Предложена методика, позволяющая расчетом оценить влияние физических и энергетических свойств на мощность и экономические показатели дизельного двигателя. Сформулированы условия эффективной работы дизеля на маловязких сортах и марках топлива, включающие в себя как регулировочные, так и конструктивные изменения в системах топливоподачи.

Динамика подачи топлива в дизелях достаточно полно оценивается так называемой характеристикой впрыска топлива в дифференциальной или интегральной формах [1, 2]. Первая характеризует скорость поступления топлива в камеру сгорания, а вторая – долю впрыснутого топлива (рисунок). Важным критерием впрыска является продолжительность впрыска $\varphi_{\text{впр}}$, показывающая время (в градусах поворота коленчатого вала), в течение которого топливо поступает в цилиндр [1].

Задачей расчета топливоподачи является определение суммарного количества топлива, подаваемого в цилиндр дизеля за цикл, и его распределение во времени (закон впрыска). Исходными данными являются конструктивные параметры топливной аппаратуры и физические свойства топлива. Возможно решение обратной задачи, если требуется по заданному закону впрыска определить параметры топливной аппаратуры [1 – 6].

При разработке математической модели впрыска топлива в дизелях используются обычно три вида уравнений [1].

1. Уравнение для расчета давлений в топливных системах, заполненных топливом, для чего используются уравнения нестационарного движения жидкости в частных производных [1, 2].

Для одномерного адиабатического течения невязкой жидкости эти уравнения имеют следующий вид:

уравнение неразрывности –

$$\partial p / \partial \tau + \rho \partial U / \partial x + U \partial \rho / \partial x = 0, \quad (1)$$

где p , U , ρ – соответственно давление топлива, скорость его движения и плотность;

уравнение количества движения в форме Эйлера –

$$\partial U / \partial \tau + U \partial U / \partial x + 1 / \rho \partial p / \partial x = 0. \quad (2)$$

В практике расчетов уравнения (1), (2) упрощаются путем линеаризации, полагая изменение плотности ρ малым, так что из обоих уравнений исключают нелинейные члены $U\partial U/\partial x$ и $U\partial\rho/\partial x$.

2. Уравнение для расчета объемного расхода топлива через дроссель имеет вид:

$$Q = \mu f \sqrt{(2/\rho)\Delta p}, \quad (3)$$

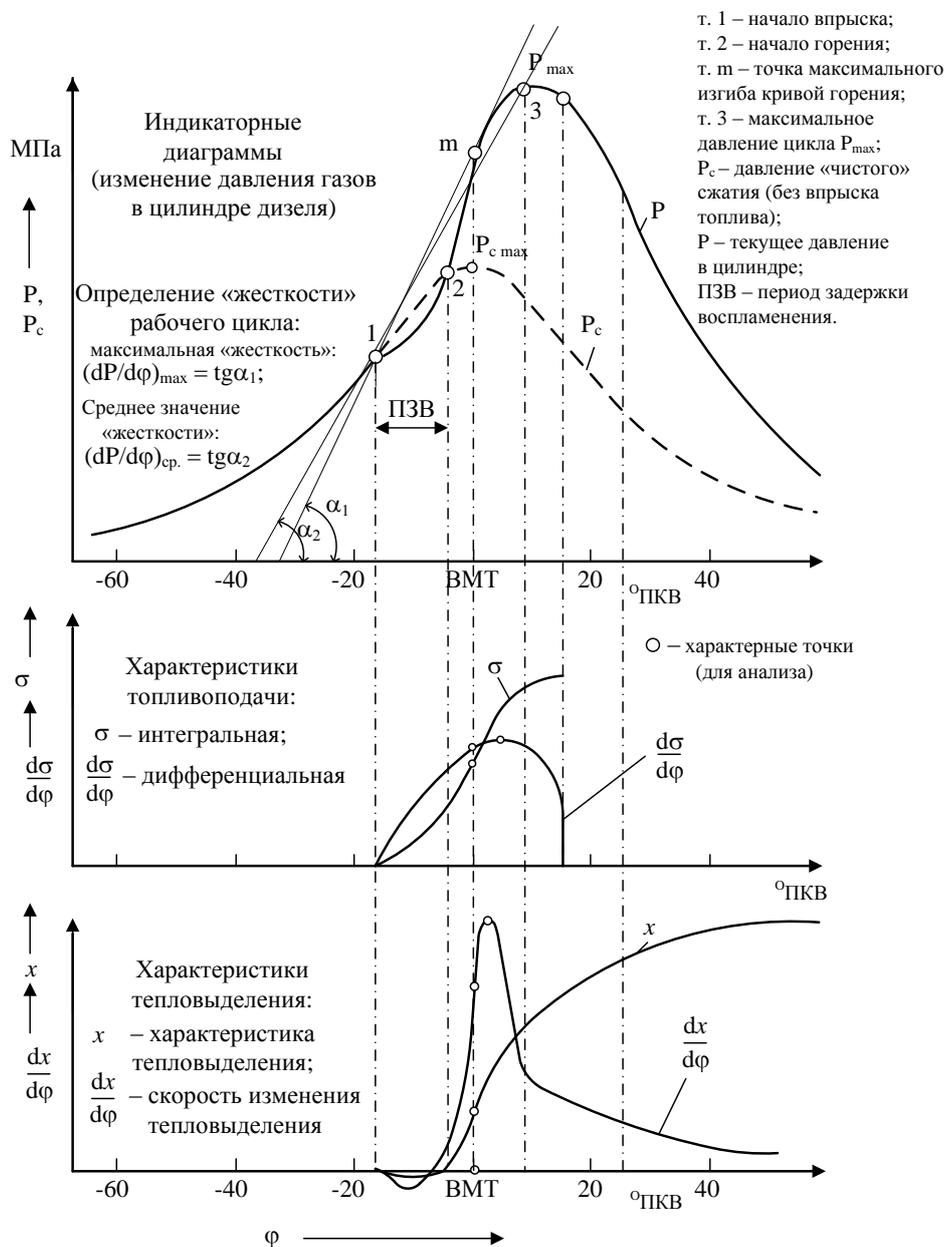
где μ – коэффициент расхода;

f – площадь проходного сечения;

Δp – перепад давления.

3. В качестве третьего уравнения используется дифференциальное уравнение движения подвижных элементов – нагнетательного клапана и иглы распылителя.

На основе этих уравнений разработаны способы расчета топливоподачи, позволяющие найти параметры впрыска, необходимые для анализа процессов смесеобразования и сгорания топлива в дизеле [1, 2, 6, 8].



Диаграммы и характеристики рабочего процесса дизеля

При переводе двигателей с самовоспламенением от сжатия на маловязкое топливо (диметилэфир (ДМЭ), спирты, сжиженный газ, легкий газовый конденсат и др., прежде всего альтернативные) по способу непосредственного впрыска рабочий цикл дизеля сохраняется неизменным, так как при использовании указанного метода одно жидкое топливо (дизельное) заменяется другим (маловязким). Поэтому типовая схема теплового расчета дизеля при некоторых уточнениях применима и для работы на маловязком топливе [1, 3].

Маловязкое и дизельное топливо отличаются друг от друга физико-химическими свойствами (вязкостью, плотностью, сжимаемостью, теплотой сгорания, фракционным составом, цетановым числом и др.). Поэтому ряд исходных расчетных данных, в частности, теплота сгорания и элементарный состав топлива, теплоемкость и энтропия продуктов сгорания, будут иметь различные значения для применяемого топлива.

При переводе дизеля на маловязкое топливо [3, 7, 8] по способу непосредственного впрыска оптимальным решением является сохранение его основных параметров: мощности и экономичности. Рассмотрим, возможно ли выполнение этих требований.

Типовые диаграммы и характеристики процессов сгорания, топливоподачи и тепловыделения, приведенные на рисунке, позволяют выполнить полный совместный анализ процессов в дизеле, полученных как теоретически, так и из эксперимента [3, 6 – 8]. Приведенный нами рисунок дополнен методом определения параметров «жесткости» рабочего цикла дизеля, работающего на разных сортах топлива.

Известно, что эффективная мощность четырехтактного дизеля при одинаковых внешних условиях на дизельном топливе [1 – 5]

$$N_{\text{ед}} = \frac{60}{632 \cdot 2} V_h n Q_d \eta_{\text{vd}} \eta_{\text{id}} \eta_{\text{м.д}} \quad (4)$$

на маловязком топливе

$$N_{\text{ем}} = \frac{60}{632 \cdot 2} V_h n Q_m \eta_{\text{vm}} \eta_{\text{im}} \eta_{\text{м.м}}, \quad (5)$$

где V_h – общий объем цилиндров, л;

n – число оборотов вала двигателя, мин⁻¹;

Q_n – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг;

η_v – коэффициент наполнения;

η_i и η_m – индикаторный и механический КПД двигателя.

Из сопоставления уравнений (4) и (5) получим:

$$N_{\text{ем}} = N_{\text{ед}} \frac{Q_m \eta_{\text{vm}} \eta_{\text{im}} \eta_{\text{м.м.}}}{Q_d \eta_{\text{vd}} \eta_{\text{id}} \eta_{\text{м.д}}} \quad (6)$$

Отсюда следует, что мощность дизеля на маловязком топливе может быть сохранена при выполнении следующего условия:

$$\frac{Q_m \eta_{\text{vm}} \eta_{\text{im}} \eta_{\text{м.м.}}}{Q_d \eta_{\text{vd}} \eta_{\text{id}} \eta_{\text{м.д}}} = 1. \quad (7)$$

В приведенном равенстве (7) наибольшее значение имеет отношение теплоты сгорания топливовоздушных смесей Q_m/Q_d .

Пример 1. Значения указанной теплоты сгорания топливовоздушной смеси, например, при $\alpha = 1$, можно определить так:

для дизельного топлива –

$$Q_d = \frac{Q_n}{L'_{0d} \alpha}; \quad (8)$$

$$Q_d = \frac{4190}{14,33 \cdot 1} = 292 \text{ кДж/кг};$$

для маловязкого топлива (например для сжиженного газа) –

$$Q_m = \frac{Q_n}{L'_{0m} \alpha}; \quad (9)$$

$$Q_m = \frac{4600}{13,2 \cdot 1} = 348,5 \text{ кДж/кг},$$

где L_0 – теоретически необходимое количество воздуха для полного сгорания 1 кг топлива, кг возд./кг топлива.

Поскольку воздух содержит кислорода по объему приблизительно 21 %, то теоретическое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива

$$L_0 = \frac{1}{0,21} \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O}{32} \right), \text{ моль/кг}, \quad (10)$$

где C, H, O – содержание углерода, водорода и кислорода в топливе в долях.

При молекулярном весе воздуха $\mu = 28,95$ теоретическое количество воздуха по весу для сгорания 1 кг жидкого топлива $L'_0 = 28,95 \cdot L_0$, кг/кг.

Теплотворность смеси маловязкого топлива с воздухом может весьма незначительно (как в примере) отличаться от теплотворности топливовоздушной смеси дизельного топлива. Поэтому сохранение мощности двигателя на маловязком топливе вполне возможно, хотя при этом может иметь место некоторое снижение α из-за увеличения L_0 в случае использования топлива малой вязкости даже при обеспечении равной экономичности на обоих сортах топлива. Последнее обстоятельство на серийных дизелях будет целиком определяться параметрами топливоподачи (главным образом величиной цикловой подачи, коэффициентом подачи) и углом опережения впрыска маловязкого топлива, который чаще всего нужно увеличить [1 – 4, 7].

Величину цикловой подачи топлива (весовое либо объемное количество), впрыскиваемого в цилиндр четырехтактного двигателя за один цикл при номинальных N_e и n , можно определить по выражениям:

$$\begin{cases} V_{ц} = \frac{b_e N_e \cdot 1000}{i n_p \rho_m \cdot 60}, \text{ мм}^3; \\ V_{ц} = \frac{b_e N_e}{30 n i}, \text{ г/цикл}; \\ V_{ц} = \frac{G_T}{60 n z i}, \text{ г/цикл}, \end{cases} \quad (11)$$

где G_T – часовой расход топлива на дизель, г/ч;

i – число цилиндров дизеля;

z – тактность дизеля;

b_e – удельный эффективный расход топлива, г/кВт·ч;

n – число оборотов валика топливного насоса, мин⁻¹.

Диаметр плунжера ТНВД определяют по выражениям [1, 2, 6], мм:

$$\begin{cases} d_{п} = \sqrt{\frac{4V_{ц}}{\pi \rho_m h_T \eta_v}}; \\ d_{п} = C \sqrt[3]{\frac{V_{ц} N_{eц}}{n_{Т.В}}}, \end{cases} \quad (12)$$

где ρ_t , h_t , C , $n_{т.в}$, η_v – соответственно плотность топлива, г/см³; активный ход плунжера, см; эмпирический коэффициент [6] – для четырехтактных дизелей, равный 4,4 – 5,0; число оборотов валика топливного насоса в минуту; коэффициент подачи (для золотниковых насосов равный 0,7 – 0,9).

Расчетная формула для η_v , полученная в работе [8], уточнена нами для легких сортов жидкого топлива.

Тогда коэффициент подачи η_v , характеризующий отношение действительного объема топлива за цикл к теоретическому геометрическому объему, описанному плунжером на полезном участке его входа,

$$\eta_v = \frac{V_a - V_n}{V_a} = 1 - \frac{V_n}{V_a} = 1 - \frac{k}{v} (p_2 - p_{\text{под}}) - \alpha_{\text{сж}} (p_2 + p_1) \frac{V_1 + V_2}{V_a}, \quad (13)$$

где $V_a, V_n, k, v, p_2, p_{\text{под}}, \alpha_{\text{сж}}, p_1, V_1, V_2$ – соответственно объем, описываемый плунжером за активный ход, см³; «потеря» объема за счет сжатия маловязкого топлива; коэффициент, зависящий от геометрических размеров прецизионной камеры; кинематическая вязкость топлива; давление в надплунжерном пространстве (в момент открытия иглы форсунки), кг/см²; давление подкачки топлива; коэффициент сжимаемости топлива, см²/кг; давление в надплунжерном пространстве в конце хода всасывания; объемы надплунжерного пространства и нагнетательного трубопровода с учетом полости форсунки, см³.

Полученная зависимость учитывает влияние вязкости топлива (и утечек соответственно), его сжимаемости и может быть использована для приближенной оценки коэффициента подачи топливной системы при ее работе на различных сортах топлива. Например, коэффициент подачи топлива системы дизеля 4Ч10,5/13, определенный экспериментально, составляет: на сжиженном газе – 0,7, бензине – 0,78 (вязкость которых сопоставима с вязкостью ДМЭ, легкого газового конденсата, метанола и др.) и дизельном топливе – 0,86, а по формуле соответственно будет 0,68; 0,76 и 0,85. Расчетное значение η_v для ДМЭ составило 0,566, а для метанола – 0,81.

Имея возможность подсчитать η_v , можно определить диаметр плунжера топливного насоса для обеспечения номинальной мощности серийного дизеля на маловязком топливе.

Тогда можно записать [6]:

$$V_{ц} = \frac{\pi d^2 n}{4} h_t \rho_m \eta_v, \text{ г/цикл.} \quad (14)$$

Пример 2. Для четырехтактного двигателя 8ЧН 12/13 мощностью 220 кВт общее количество топлива за впрыск, или цикловая подача (мм³/цикл), определится выражением:

$$V_{ц} = \frac{b_e N_e \cdot 1000}{i n_n \rho_m \cdot 60}; \quad (15)$$

$$V_{ц} = \frac{220 \cdot 220 \cdot 1000}{8 \cdot 1200 \cdot 0,82 \cdot 60} = 100, \text{ мм}^3,$$

где b_e – удельный эффективный расход топлива, 220 г/(кВт·ч); N_e – эффективная номинальная мощность, 220 кВт; i – число цилиндров, 8; n_n – частота вращения вала насоса, 1200 мин⁻¹; ρ_t – плотность топлива, 0,82 г/см³, или 820 кг/м³.

Таким образом, для устойчивой и безотказной работы дизельной топливной аппаратуры на маловязком топливе необходимо

выбирать величину давления подачи (подкачки) к насосу высокого давления с таким расчетом, чтобы исключить возможность уменьшения массы топлива во всасывающей магистрали топливной системы;

предусмотреть непрерывную циркуляцию маловязкого топлива в топливной системе дизеля;

для сохранения номинальной мощности серийного дизеля при непосредственном впрыске компенсировать возможное снижение производительности топливной системы путем перерегулировки топливного насоса (уменьшение давления затяга пружины форсунки и увеличение угла опережения впрыска) или замены серийных плунжерных пар парами большего диаметра (с целью увеличения цикловой подачи);

при отработке рабочего цикла дизеля учитывать изменение параметров впрыска при возможном снижении давления впрыска, увеличении продолжительности и запаздывании подачи.

Список литературы

1. Свиридов, Ю. Б. Топливо и топливоподача автотракторных дизелей [Текст] / Ю. Б. Свиридов, Л. В. Малявинский, М. М. Вихерт. – Л.: Машиностроение, 1979. – 248 с.
2. Фомин, Ю. Я. Топливная аппаратура дизелей [Текст] / Ю. Я. Фомин, Г. В. Никонов, В. Г. Ивановский. – Л.: Судостроение, 1989. – 344 с.
3. Ведрученко, В. Р. Альтернативные виды топлива для судовых дизелей [Текст]: Монография / В. Р. Ведрученко, И. И. Малахов / Омский ин-т водного транспорта (филиал) ФБОУ ВПО «НГАВТ». – Омск, 2012. – 172 с.
4. Ведрученко, В. Р. Разработка приближенной математической модели связи процессов впрыска и сгорания топлива в дизельных энергетических установках локомотивов [Текст] / В. Р. Ведрученко, В. В. Крайнов, Е. С. Лазарев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2014. – № 4 (20). – С.18 – 28.
5. Ведрученко, В. Р. Исследование динамики системы топливоиспользования дизельных энергетических установок [Текст] / В. Р. Ведрученко, В. В. Крайнов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2014. – № 2 (18). – С. 47 – 55.
6. Ваншейдт, В. А. Конструирование и расчеты прочности судовых дизелей [Текст] / В. А. Ваншейдт. – Л.: Судостроение, 1969. – 640 с.
7. Фофанов, Г. А. Альтернативные виды топлива на подвижном составе железнодорожного транспорта [Текст] / Г. А. Фофанов, Д. Н. Григорович, А. С. Нестрахов // Труды ВНИИЖТа / Научно-исследовательский ин-т ж.-д. трансп. – М., 2008. – 143 с.
8. Семенов, Б. Н. Применение сжиженного газа в судовых дизелях [Текст] / Б. Н. Семенов. – Л.: Судостроение, 1969. – 176 с.

References

1. Sviridov Iu. B., Maliavinskii L. V., Vikhert M. M. *Toplivo i toplivopodacha avtotraktornykh dizelei* (Fuel and fuel supply in motor-vehicle and tractor diesels). Leningrad: Mashinostroenie, 1979, 248 p.
2. Fomin Iu. Ia., Nikonov G. V., Ivanovskii V. G. *Toplivnaia apparatura dizelei* (Fuel equipment of diesels). Leningrad: Mashinostroenie, 1989, 344 p.
3. Vedruchenko V. R., Malahov I. I. *Alternative fuel sorts for ship diesels: monografiia* (Alternative fuel sorts for ship diesels: monograph). Omsk, 2012, 172 p.
4. Vedruchenko V. R., Krainov V. V., Lazarev E. S. Creating an approximate math model of relations between injection and burning in locomotive diesels [Razrabotka priblizhennoi matematicheskoi modeli svyazi processov vpryska i sgoraniia v dizel'nykh energeticheskikh ustanovkakh lokomotivov]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2014, no. 4 (20), pp. 18 – 28.
5. Vedruchenko V. R., Krainov V. V. Research of dynamics of diesels fuel supply system [Issledovanie dinamiki sistemy toplivoispol'zovaniia dizel'nykh energeticheskikh ustanovok]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2014, no. 2 (18), pp. 47 – 55.

6. Vanshteidt V. A. *Konstruivovanie i raschety prochnosti sudovyh dizelei* (Constructing and calculating of ship diesels strength). Leningrad: Sudostroenie, 1969, 640 p.
7. Fofanov G. A., Grigorovich D. N., Nestrahov A. S. Alternative fuel sorts for rolling-stock [Альтернативные виды топлива на подвижном составе железнодорожного транспорта]. *Trudy VNIIZhTa – Proceedings VNIIZhT*, 2008, 143 p.
8. Semenov B. N. *Primenenie szhizhennogo gaza v sudovyh dizeliah* (Using of liquefied gas in ship diesels). Leningrad: Sudostroenie, 1969, 176 p.

УДК 004.942

О. В. Гателюк, А. А. Комяков, В. В. Эрбес

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТРУКТУР НЕЧЕТКОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ В СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В настоящее время нечеткие нейронные сети нашли широкое применение при моделировании сложных производственных процессов. В статье рассмотрено применение нечеткой логики для формирования математической модели электропотребления на железнодорожном транспорте на примере тяговой подстанции Дорогино. Представлен алгоритм выбора структуры нечеткой нейронной сети, в том числе вида и количества функций принадлежности на входе и количества циклов обучения. Выполнен сравнительный анализ полученных структур путем оценки средней квадратической ошибки.

В настоящее время моделирование системы тягового электроснабжения широко применяется при решении различных прикладных задач, таких как расчет пропускной способности участков, оценка степени загруженности и надежности элементов системы электроснабжения, нормирование расхода электрической энергии [1 – 5] и др. Одним из наиболее эффективных инструментов для создания моделей электропотребления являются нечеткие нейронные сети (ННС) [6].

При использовании нечетких систем в исследованиях процессов электропотребления появляется возможность делать четкие выводы в условиях нечеткости, что позволяет использовать эти системы при решении конкретных задач. Нечеткие системы можно применять для анализа процессов электропотребления как с большим, так и с малым количеством влияющих факторов. В отличие от математических методов, требующих на каждом шаге моделирования точных или статистических закономерностей, нечеткие системы предлагают совершенно иной подход, благодаря которому математическая модель процесса электропотребления работает на высоком уровне абстракции и используется минимальное количество закономерностей [7].

Назначением ННС является получение знаний в виде связей между влияющими факторами и процессом электропотребления, которые предназначены для реализации нечетких правил на базе искусственных нейронных сетей. Основное преимущество ННС перед обычной нейронной сетью состоит в том, что в отличие от нейронных сетей ННС характеризуются четким представлением знаний, содержащихся в нечетких правилах. Еще одним преимуществом является возможность устанавливать полное соответствие между математическим представлением процедуры нечеткого вывода и физической структурой сети [8, 9].

Такая ННС позволяет разрабатывать и представлять математические модели в форме правил нечетких систем, которые характеризуются наглядностью и простотой объяснения. С другой стороны, для построения правил нечетких систем в математической модели используются методы искусственных нейронных сетей, что является более удобным и менее трудоемким процессом.

Основная идея, положенная в основу модели ННС, заключается в том, чтобы использовать обучающую выборку данных по влияющим факторам и процессу электропотребления

для определения параметров функций принадлежности, которые лучше всего соответствуют некоторой системе нечеткого вывода. При этом для определения параметров функции принадлежности используются известные процедуры обучения искусственных нейронных сетей.

Сформированная на основе ННС математическая модель процесса электропотребления имеет определенную структуру. Формирование структуры ННС подразумевает выбор типа и количества функций принадлежности на входе для каждого влияющего фактора и типа функции принадлежности на выходе.

На рисунке 1 представлен один из вариантов структуры ННС для формирования модели электропотребления на железнодорожном транспорте.

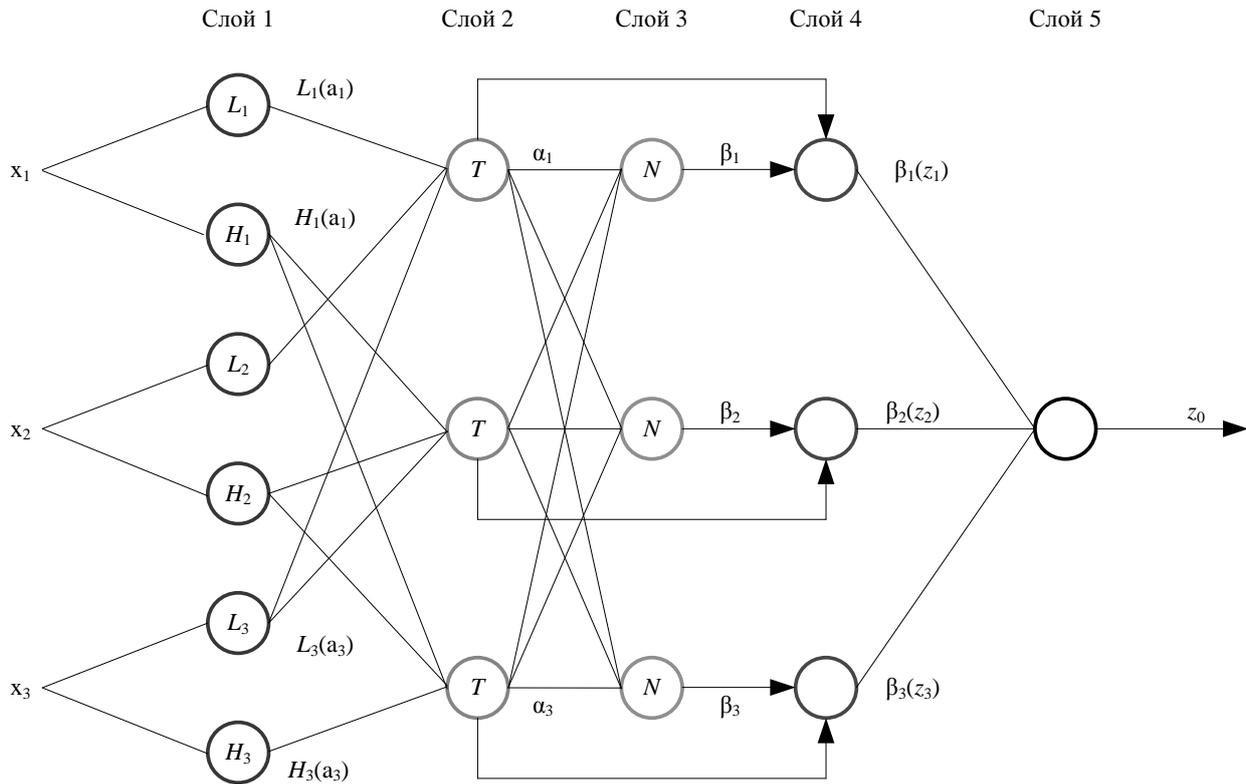


Рисунок 1 – Структура нечеткой нейронной сети для формирования модели электропотребления в системе тягового электроснабжения

Представленная модель включает в себя три фактора – x_1 , x_2 , x_3 , влияющих на процесс электропотребления, а структура ННС содержит пять слоев.

Нейроны слоя 1 рассчитывают значения функций принадлежности $L_1, L_2, L_3, H_1, H_2, H_3$ при определенных значениях входов: $x_1 = a_1, x_2 = a_2, x_3 = a_3$.

На слое 2 сравниваются значения функций принадлежности для каждого правила и находится минимальное из них по формулам:

$$\begin{aligned} \beta_1 &= L_1(a_1) \wedge L_2(a_2) \wedge L_3(a_3) = \min(L_1(a_1), L_2(a_2), L_3(a_3)); \\ \beta_2 &= H_1(a_1) \wedge H_2(a_2) \wedge L_3(a_3) = \min(H_1(a_1), H_2(a_2), L_3(a_3)); \\ \beta_3 &= H_1(a_1) \wedge H_2(a_2) \wedge H_3(a_3) = \min(H_1(a_1), H_2(a_2), H_3(a_3)). \end{aligned} \quad (1)$$

Выходами нейронов данного слоя (обозначены на рисунке 1 буквами T) являются значения степени истинности предпосылок каждого правила.

Нейроны слоя 3 (обозначены на рисунке 1 буквами N) выполняют расчет величин:

$$\begin{cases} \gamma_1 = \frac{\beta_1}{\beta_1 + \beta_2 + \beta_3}; \\ \gamma_2 = \frac{\beta_2}{\beta_1 + \beta_2 + \beta_3}; \\ \gamma_3 = \frac{\beta_3}{\beta_1 + \beta_2 + \beta_3}. \end{cases} \quad (2)$$

Нейроны слоя 4 определяют частные выходы:

$$\begin{cases} \gamma_1 z_1 = \gamma_1 H^{-1}(\beta_1); \\ \gamma_2 z_2 = \gamma_2 M^{-1}(\beta_2); \\ \gamma_3 z_3 = \gamma_3 S^{-1}(\beta_3), \end{cases} \quad (3)$$

где H, M, S – функции принадлежности на выходе; z – частный выход системы.

Единственный нейрон слоя 5 вычисляет выход сети по формуле:

$$z_0 = \gamma_1 z_1 + \gamma_2 z_2 + \gamma_3 z_3. \quad (4)$$

Исследования математических моделей процесса электропотребления проводились в редакторе гибридных систем *ANFIS Editor* и графическом интерфейсе *Fuzzy Logic Toolbox* программы *MatLab*. Для формирования математической модели процесса электропотребления на основе ННС необходимо три выборки значений. Первая выборка используется непосредственно для процесса обучения математической модели, т. е. для настройки параметров ННС. Она носит название «обучающая выборка». Вторая выборка называется проверочной и также участвует в процессе настройки параметров нечеткой нейронной сети, но основной ее задачей является контроль процесса обучения с помощью определения ситуации, когда происходит переобучение сети. Под переобучением нечеткой нейронной сети подразумевается снижение ошибки процесса обучения, а для проверочного процесса – рост ошибки. Результатом проверочного процесса является расчет ошибки по проверочной выборке, который подразумевает сравнение фактических и смоделированных значений процесса электропотребления. И последняя, третья, выборка называется тестирующей и применяется для оценки качества сформированной математической модели путем расчета средней квадратической ошибки *RMSE* (root mean squared error), определенной по фактическим $w_{\text{факт}}$ и смоделированным $w_{\text{мод}}$ значениям удельного расхода электроэнергии:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (w_{\text{факт}} - w_{\text{мод}})^2}, \quad (5)$$

где n – объем выборки.

В исследовании использовались обучающие выборки из 30, 45, 60, 75 и 90 значений влияющих факторов и соответствующего им удельного расхода электрической энергии, сформированные для тяговой подстанции Дорогино Западно-Сибирской железной дороги. В рассматриваемом случае приняты к рассмотрению три влияющих фактора: суммарная масса пройденных составов в четном направлении, суммарная масса пройденных составов в нечетном направлении и среднесуточная температура воздуха [10]. Тестирующая и проверочная выборки принимаются постоянными из 20 и 18 значений соответственно. Количество циклов обучения h принято равным 100.

Выбор структуры ННС для целей формирования модели электропотребления осуществлялся в соответствии с представленным алгоритмом (рисунок 2).

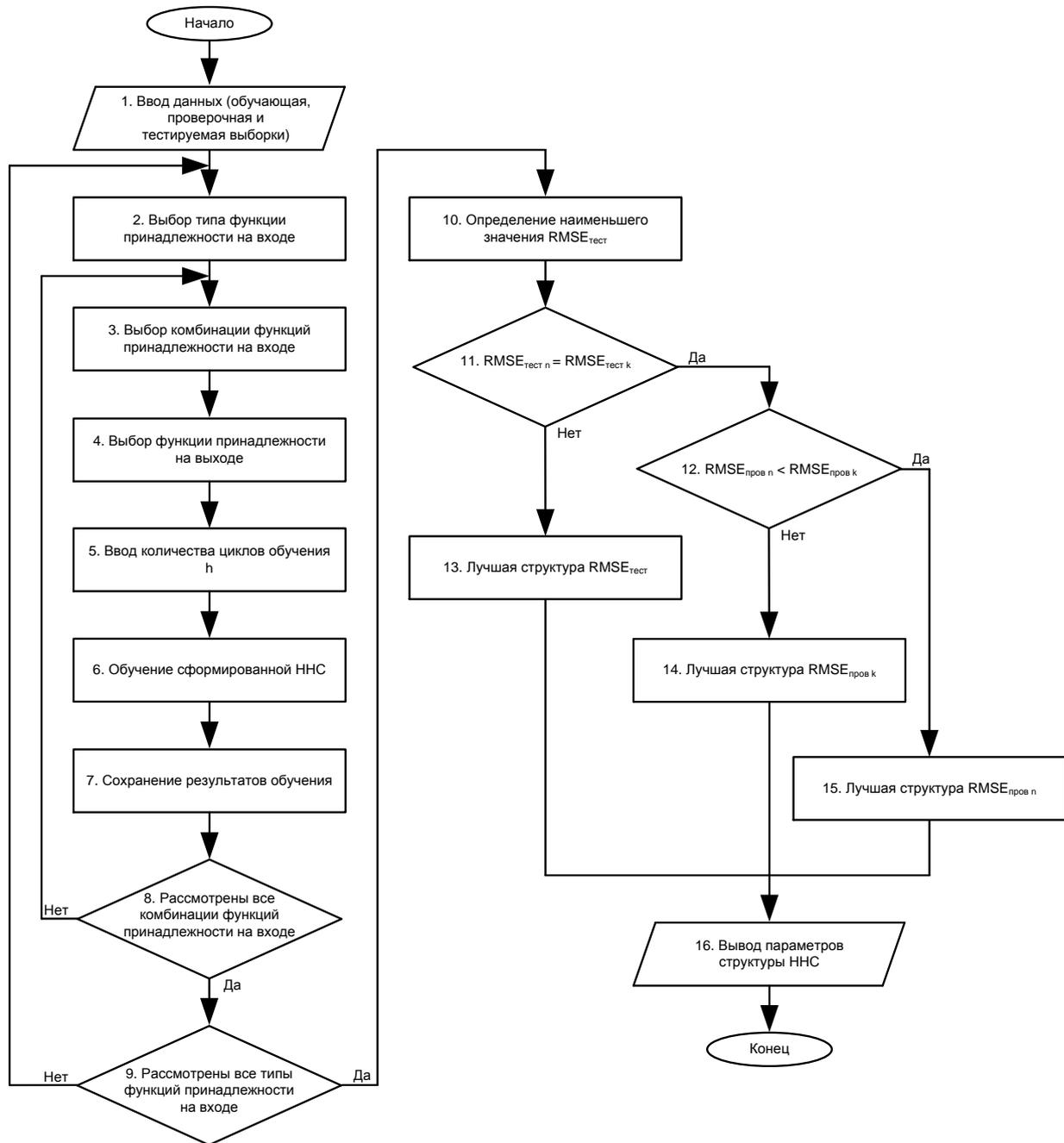


Рисунок 2 – Алгоритм выбора параметров ННС для формирования модели электропотребления на железнодорожном транспорте

На начальном этапе алгоритма выполняется выбор типа функции принадлежности на входе ННС. При этом рассматриваются типовые функции принадлежности, предлагаемые в редакторе гибридных систем *ANFIS Editor*, такие как треугольная (*trimf*), трапецидальная (*trapmf*), гауссова (*gaussmf*), двойная гауссова (*gauss2mf*), обобщенная колоколообразная (*gbellmf*), сигмоидальная (*sigmf*), pi-функция (*pimf*). Анализ производился для выборок различного объема с двумя и тремя функциями принадлежности на входе. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты тестирования различных структур ННС

Тип функции принадлежности	Количество функций принадлежности на входе	Средняя квадратическая ошибка, кВт·ч/10тыс. ткм брутто, при объеме выборки				
		30	45	60	75	90
Trimf	2 2 2	14,5	14,9	14,4	14,5	14,8
	3 3 3	167,8	15,7	14,7	18,7	13,0
Trapmf	2 2 2	17,4	18,9	18,0	16,7	20,8
	3 3 3	16,1	17,8	17,1	16,0	15,7
Gaussmf	2 2 2	15,7	16,8	16,1	15,4	16,5
	3 3 3	90,0	16,1	16,1	17,4	14,5
Gauss2mf	2 2 2	15,3	16,2	15,6	15,2	16,0
	3 3 3	154,7	19,0	16,0	16,5	14,2
Gbellmf	2 2 2	18,1	19,1	18,3	17,5	18,8
	3 3 3	61,8	17,2	16,2	18,6	15,7
Pimf	2 2 2	19,0	20,0	19,1	18,7	20,3
	3 3 3	35,4	16,1	18,9	16,2	17,2
Sigmf	2 2 2	20,1	20,1	21,1	19,0	20,1
	3 3 3	134,2	22,5	19,0	16,0	19,1
Среднее значение		55,7	17,9	17,2	16,9	16,9
Минимальное значение		14,5	14,9	14,4	14,5	13,0

В целом модели с тремя функциями принадлежности на входе показали несколько лучшие результаты, чем модели с двумя функциями принадлежности. При этом ННС с двумя функциями принадлежности демонстрировали меньшую погрешность для объема выборки в 75 значений, в то время как ННС с тремя функциями принадлежности – для выборки из 90 значений.

Лучший результат показала структура с тремя треугольными функциями принадлежности при объеме выборки в 90 значений со средней квадратической ошибкой тестирования 13,0 кВт·ч/10тыс. ткм брутто, что соответствует коэффициенту вариации 0,071. Эта структура также продемонстрировала удовлетворительные значения погрешности для обучающей (10,8 кВт·ч/10тыс. ткм брутто) и проверочной (13,6 кВт·ч/10тыс. ткм брутто) выборок.

Треугольная функция принадлежности представлена на рисунке 3 и имеет аналитический вид:

$$\text{trimf}(x; b; c; d) = \max\left(\min\left(\frac{x-b}{c-b}; \frac{d-x}{d-c}\right); 0\right), \quad (6)$$

где b, c, d – параметры функции принадлежности, которые определяются ННС во время процесса обучения.

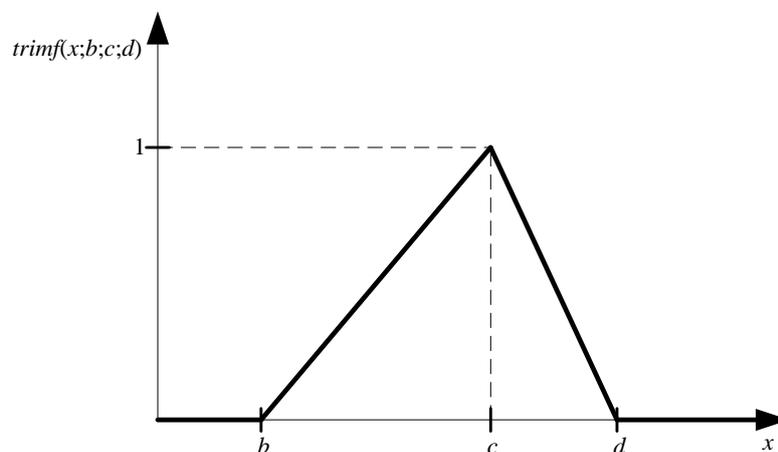


Рисунок 3 – Треугольная функция принадлежности

На следующем этапе алгоритма для выбранной структуры ННС выполнен анализ целесообразности применения неодинакового количества функций принадлежности для каждого из нейронов (таблица 2).

Таблица 2 – Результаты оценки качества структуры нечеткой нейронной сети в зависимости от количества функций принадлежности на входе

Количество функций принадлежности на входе	Средняя квадратическая ошибка, кВт·ч/10тыс. т·км брутто		
	обучение	проверка	тестирование
3 2 2	12,2	16,0	15,2
2 3 2	12,2	14,7	13,8
2 2 3	11,3	13,9	13,7
3 3 2	11,8	16,4	14,7
2 3 3	11,0	13,3	13,0
3 2 3	11,0	14,7	13,5
3 3 3	10,8	13,6	13,0
Минимальное значение	10,8	13,3	13,0

Анализ процесса обучения структур с различным количеством функций принадлежности показал, что увеличение количества функций принадлежности на входе улучшает качество процесса обучения нечеткой нейронной сети. Минимальное значение средней квадратической ошибки обучения (10,8 кВт·ч/10тыс. т·км брутто) показала структура, имеющая три функции принадлежности на входе у каждого параметра. Однако для процесса проверки и тестирования такой вывод сделать нельзя.

Наименьшее значение средней квадратической ошибки тестирования в 13,0 кВт·ч/10тыс. т·км брутто показали две структуры, имеющие комбинации количества функций принадлежности на входе 2 3 3 и 3 3 3. Так как структура 2 3 3 лучше прошла процесс проверки, показав значение средней квадратической ошибки 13,3 кВт·ч/10тыс. т·км брутто вместо 13,6 кВт·ч/10тыс. т·км брутто у структуры 3 3 3, то для дальнейших исследований принимается структура, имеющая комбинацию количества функций принадлежности на входе 2 3 3.

На следующем этапе алгоритма для выбранной структуры ННС осуществляется подбор количества циклов обучения h . С этой целью для ННС с комбинацией треугольных функций принадлежности на входе 2 3 3 изменялось количество циклов обучения в интервале от 1 до 300 (таблица 3).

При увеличении количества циклов обучения ННС качество обучения улучшается. Минимальное значение средней квадратической ошибки обучения при 300 циклах обучения составило 10,9 кВт·ч/10тыс. т·км брутто. Однако погрешность тестирования при этом незначительно растет, достигая 13,2 кВт·ч/10тыс. т·км брутто. Наименьшее значение погрешности тестирования получено на первом цикле обучения и составило 12,8 кВт·ч/10тыс. т·км брутто. Следовательно, формирование модели электропотребления на железнодорожном транспорте целесообразно начинать с малого количества циклов обучения.

Таблица 3 – Исследование погрешности ННС в зависимости от количества циклов обучения

Процесс	Средняя квадратическая ошибка, кВт·ч/10тыс. т·км брутто, для количества циклов обучения													
	1	10	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
Обучение	11,15	11,14	11,11	11,08	11,05	11,02	10,99	10,97	10,95	10,94	10,93	10,92	10,91	10,90
Проверка	13,39	13,38	13,37	13,36	13,35	13,35	13,33	13,33	13,31	13,29	13,26	13,24	13,22	13,20
Тестирование	12,81	12,83	12,86	12,93	12,98	13,04	13,09	13,14	13,17	13,17	13,18	13,18	13,19	13,19

Таким образом, на основе представленного алгоритма выбрана модель электропотребления тяговой подстанции Дорогино на основе ННС со следующими параметрами: тип функции принадлежности – треугольная, комбинация функций принадлежности – 2 3 3, количест-

во циклов обучения – 1, средняя квадратическая ошибка тестирования – 12,8 кВт·ч/10тыс. ткм брутто. Полученная ННС может быть использована при решении задач прогнозирования расхода электроэнергии, оценки энергетической эффективности системы тягового электроснабжения, разработки программ энергосбережения на объектах железнодорожного транспорта.

Список литературы

1. Крюков, А. В. Моделирование систем электроснабжения железных дорог переменного тока [Текст] / А. В. Крюков, В. П. Закарюкин, С. М. Асташин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2008. – № 3-4 . С. 134 – 139.
2. Марский, В. Е. Определение пропускной способности железнодорожных участков по устройствам тягового электроснабжения [Текст] / В. Е. Марский // ВНИИЖТа. – 2014. – № 1. – С. 40 – 46.
3. Вильгельм, А. С. Совершенствование метода расчета системы тягового электроснабжения переменного тока [Текст] / А. С. Вильгельм, А. А. Комяков, В. Л. Незевак // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2014. – № 3 (19). – С. 54 – 65.
4. Пашков, Д. В. Планирование расхода электрической энергии на технологические нужды структурных подразделений ОАО «РЖД» с использованием имитационного моделирования [Текст] / Д. В. Пашков, А. В. Пономарев // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – 2008. – № 3. – С. 87 – 91.
5. Христинич, Р. М. Прогнозирование надежности и режимов работы тяговых трансформаторов в условиях предельной нагрузки [Текст] / Р. М. Христинич, А. С. Луковенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск. – 2015. – № 2 (46). – С. 130 – 136.
6. Манусов, В. З. Краткосрочное прогнозирование электрической нагрузки на основе нечеткой нейронной сети и ее сравнение с другими методами [Текст] / В.З. Манусов, Е. В. Бирюков // Известия ТПУ / Томский политехн. ун-т. – Томск. – 2006. – Т. 309. – № 6. – С. 153 – 157.
7. Zadeh, Lotfi. Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes /IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, SMC-3(1), January 1973. – P. 28 – 44.
8. Бирюков, Е. В. Практическая реализация нечеткой нейронной сети при краткосрочном прогнозировании электрической нагрузки [Электронный ресурс] / Е. В. Бирюков, М. С. Корнев // Портал магистров ДонНТУ: сайт. URL: http://www.masters.donntu.edu.ua/2006/kita/chuuykov/library/library/article_5.htm.
9. Крысанов, В. Н. Применение методов нейронных и нейро-нечетких сетей в системах управления статическими преобразователями в электроприводе [Текст] / В. Н. Крысанов, А. Л. Руцков // Труды VIII междунар. конф. по автоматизированному электроприводе АЭП-2014 / Мордовский гос. ун-т им. Н.П. Огарева. – Саранск, 2014. – С. 104 – 107.
10. Комяков, А. А. Апробация алгоритма оценки эффективности энергосберегающих устройств и технологий в системе тягового электроснабжения [Текст] / А. А. Комяков, В. В. Эрбес, О. А. Гателюк // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2014. – № 4 (20). – С. 79 – 85.

References

1. Kriukov A. V., Zakariukin V. P., Astashin S. M. Simulation systems of AC railway power supply [Modelirovanie sistem elektrosnabzheniia zheleznnykh dorog peremennogo toka]. *Izvestiia vysshikh ucheb-nykh zavedenii. Problemy energetiki – News of higher educational institutions. Problems of energy*, 2008, no. 3 – 4, pp. 134 – 139.

2. Marskiy V. E. Determination of the capacity of railroads in the traction power supply devices [Opređenje propusnoi sposobnosti zheleznodorozhnykh uchastkov po ustroistvam tiagovogo elektrosnabzheniia]. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Bulletin of the VNIIZhT*, 2014, no. 1, pp. 40 – 46.
3. Vilgelm A. S., Komyakov A. A., Nezevak V. L. Improvement in the method of calculation of the AC traction power system [Sovershenstvovanie metoda rascheta sistemy tjagovogo jelektrosnabzhenija peremennogo toka]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*. 2014, no. 3 (19), pp. 54 – 65.
4. Pashkov D. V., Ponomarev A. V. Load forecasting in RZD using simulation [Planirovanie rashoda elektricheskoi energii na tehnologicheskie nuzhdy strukturnykh podrazdelenij RZD s ispol'zovaniem imitacionnogo modelirovanija]. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2008, no. 3, pp. 87 – 91.
5. Hristinich R. M., Lukovenko A. S. Prediction of the reliability and operation modes of traction transformers under load limit [Prognozirovanie nadezhnosti i rezhimov raboty tjagovykh transformatorov v uslovijah predelnoj nagruzki] / *Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Simulation*, 2015, no. 2 (46), pp. 130 – 136.
6. Manusov V. Z., Birjukov E. V. Short-term forecasting of electric load based on fuzzy neural network and its comparison with other methods [Kratkosrochnoe prognozirovanie elektricheskoi nagruzki na osnove nechetkoj nejronnoj seti i ee sravnenie s drugimi metodami]. *Izvestia Tomskogo politehnicheskogo universiteta – Proceedings of TPU*. 2006, t. 309, no 6, pp. 153 – 157.
7. Zadeh, Lotfi. Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes / *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-3(1), January 1973, p. 28 – 44.
8. Birjukov E.V., Kornev M. S. Practical implementation of fuzzy neural network in the short term-rated electrical load forecasting [Prakticheskaja realizacija nechetkoj nejronnoj seti pri kratkosrochnom prognozirovanii elektricheskoi nagruzki]. *Portal magistrów DonNTU*: URL: http://www.masters.donntu.edu.ua/2006/kita/chuykov/library/library/article_5.htm.
9. Krysanov, V. N., Ruckov A. L. Application of neural and neuro-fuzzy network management systems in the electric static converters [Primenenie metodov nejronnykh i nejro-nechetkiikh setej v sistemah upravlenija staticheskimi preobrazovateljami v elektroprivode]. *Trudy VIII mezhdunarodnoj konferencii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2014* (Proceedings of VIII Intern. Conf. for automated electric AEP 2014). – Saransk, 2014, pp. 104 – 107.
10. Komyakov, A. A., Erbes V. V., Gateljuk O. V. Testing of the algorithm of the effectiveness evaluation of energy-saving devices and technologies in the traction power supply [Aprobacija algoritma ocenki effektivnosti energosberegajushhih ustrojstv i tehnologij v sisteme tjagovogo elektrosnabzhenija]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2014, no. 4(20), pp. 79 – 85.

УДК 621.372.21: 681.3.068

Т. В. Ковалева, Н. В. Пашкова

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В КОНТАКТНОЙ СЕТИ И ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Контактная сеть и линии электропередачи, являющиеся составными частями системы электроснабжения железных дорог, с точки зрения электротехнических расчетов представляют собой цепи с распределенными параметрами. Волновые процессы в контактной сети оказывают отрицательное влияние на электрические линии передачи энергии, проложенные вблизи от железной дороги, увеличивают потери электроэнергии в системе тягового электроснабжения. Для исследования волновых процессов предложен способ математического моделирования прохождения несинусоидальных сигналов по однородной двухпроводной линии с распределенными параметрами. Математическая модель построена на основе известных дифференциальных уравне-

ний линии (телеграфных уравнений) с использованием рядов Фурье. Линия электропередачи представляет собой трехпроводную линию. В статье представлен алгоритм приведения уравнений линии электропередачи к виду уравнений двухпроводной линии. Для оценки корректности математической модели проведены исследования на физической модели линии. Приведены результаты исследования различных режимов работы цепей с распределенными параметрами с помощью математической модели. Предложенный способ математического моделирования прохождения сигналов различной формы по линии с распределенными параметрами адекватно отражает явления, происходящие в линии, и может применяться для анализа электромагнитных процессов в контактной сети и линиях электропередачи.

Электрические цепи с распределенными параметрами представляют собой класс цепей, особенности функционирования которых зависят от распределения сопротивлений, проводимостей, индуктивностей и емкостей по пространственным координатам. К таким цепям относятся различные воздушные и кабельные линии из области энергетики, проводной связи, радиотехники, передачи информации. Использование электрических линий различных конструкций и назначения характерно и для железнодорожного транспорта. Это контактная сеть электрифицированных участков железных дорог, питающие эти участки высоковольтные линии электропередачи, рельсовые цепи, линии автоблокировки, воздушные линии и кабели связи [1].

В качестве объекта изучения используется модель двухпроводной однородной линии как простейшего представителя рассматриваемого класса цепей. Из-за распределенного характера параметров линий электромагнитные процессы в них носят волновой характер.

Математический аппарат для исследования однородных линий известен. Основу его составляют телеграфные уравнения, которые представляют собой систему из двух дифференциальных уравнений для тока и напряжения линии [1]:

$$\begin{cases} -\frac{\partial u}{\partial x} = R_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t}; \\ -\frac{\partial i}{\partial x} = G_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t}, \end{cases} \quad (1)$$

где r_0, L_0, G_0, C_0 – первичные параметры линии.

Схема замещения элементарного участка длиной линии представлена на рисунке 1.

Одним из объектов, существенно влияющих на электромагнитную совместимость оборудования железнодорожного транспорта, является система тягового электроснабжения. Волновые процессы в контактной сети оказывают отрицательное влияние на электрические линии передачи энергии, проложенные вблизи от железной дороги: линии телефонной и телеграфной связи, рельсовые цепи автоблокировки, силовые и осветительные сети; эти волновые процессы отрицательно сказываются и на потерях энергии в системе тягового электроснабжения.

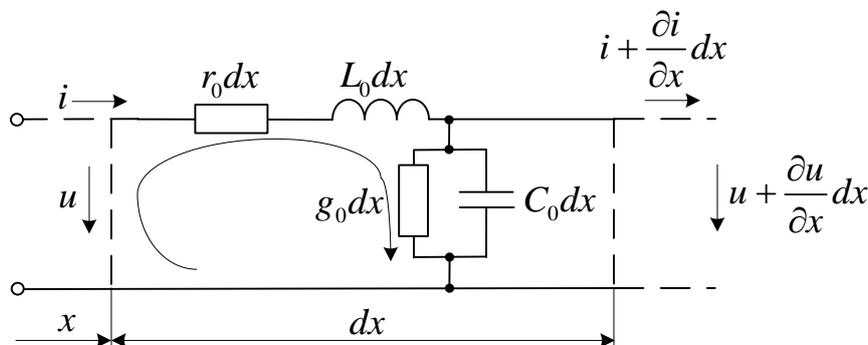


Рисунок 1 – Схема замещения элементарного участка длиной линии

Однако определение допустимых уровней влияния, оказываемого волновыми процессами, не является простой и однозначной задачей. Знания о токах различных источников недостаточны для того, чтобы установить пределы, в которых обеспечивалась бы электромагнит-

ная совместимость оборудования [2]. До тех пор, пока не будет достигнуто достаточного понимания характера электромагнитных явлений в сложных системах, энергоснабжение будет оставаться под угрозой повышенной опасности и энергоснабжающие организации и потребители будут часто вынуждены принимать меры уже после аварий.

Для оценки воздействия волн на изоляцию электрооборудования необходимы данные не только об амплитудных значениях напряжений и токов [3], но и о форме кривых. Для этого расчет нужно проводить по мгновенным значениям напряжений и токов. Такое описание также необходимо для определения помех в сетях, влияющих на качество электроэнергии.

Для решения этой проблемы необходимо смоделировать систему электроснабжения, что позволит провести глубокий анализ сложных электромагнитных процессов в сетях.

Система электроснабжения может рассматриваться как соединение сосредоточенных и распределенных звеньев, каждое из которых представлено соответствующим активным или пассивным четырехполюсником (рисунок 2). В расчетном отношении положительное свойство схемы состоит в том, что результирующая математическая модель формируется по математическим моделям ее звеньев-четырёхполюсников [4].

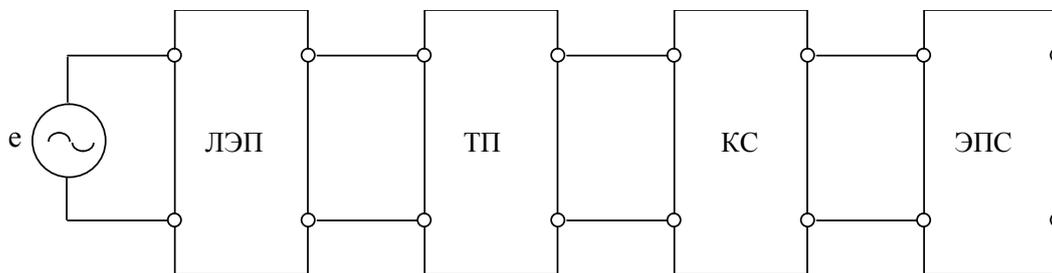


Рисунок 2 – Структурная схема участка электроснабжения при консольном питании:
ЛЭП – линии электропередачи; ТП – тяговая подстанция;
КС – контактная сеть; ЭПС – электроподвижной состав

Участки контактной сети представляются в виде однородной двухпроводной линии, а линии электропередачи (ЛЭП) являются трехпроводной системой [5]. Для приведения уравнений ЛЭП к виду уравнений двухпроводной линии был использован следующий алгоритм.

Расчет процессов в трехфазных цепях производился в переменных, обладающих тем свойством, что система уравнений в этих новых переменных распадается на уравнения, каждое из которых содержит неполное количество переменных.

Таковыми переменными могут служить α -, β -, 0 -составляющие тока и напряжения, т. е. тройка фазовых векторов i_a, i_b, i_c заменяется тремя токами i_α, i_β, i_0 , представляющими линейные комбинации фазовых токов. Аналогичный смысл имеет и преобразование фазовых напряжений в напряжения u_α, u_β, u_0 .

Уравнения линии передачи (2), (3) могут быть получены из схемы замещения участка трехфазной линии, представленной на рисунке 3:

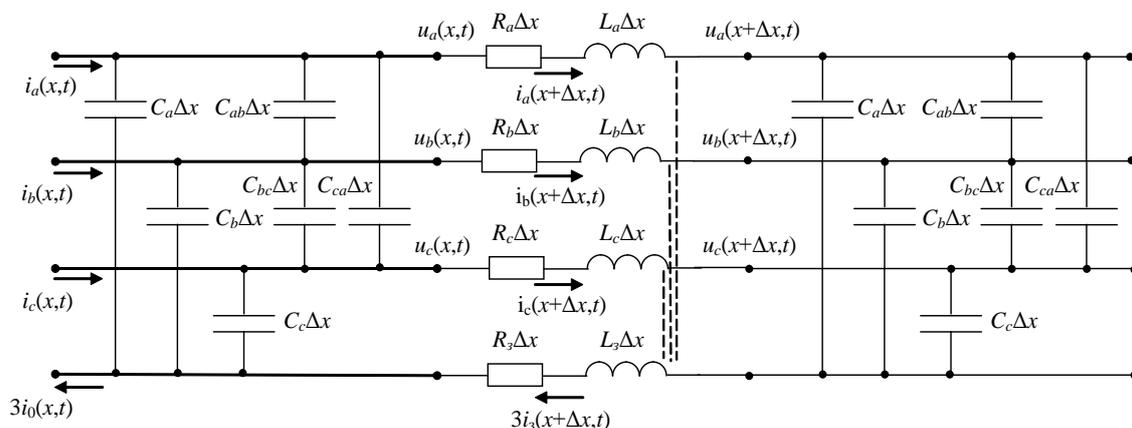


Рисунок 3 – Схема замещения элемента трехфазной линии передачи

$$\left\{ \begin{aligned} i_a(x,t) - i_a(x+\Delta x,t) &= C_a \Delta x \frac{\partial u_a(x+\Delta x,t)}{\partial t} + C_{ab} \Delta x \frac{\partial (u_a(x+\Delta x,t) - u_b(x+\Delta x,t))}{\partial t} + \\ &+ C_{ac} \Delta x \frac{\partial (u_a(x+\Delta x,t) - u_c(x+\Delta x,t))}{\partial t}; \\ i_b(x,t) - i_b(x+\Delta x,t) &= C_b \Delta x \frac{\partial u_b(x+\Delta x,t)}{\partial t} + C_{ba} \Delta x \frac{\partial (u_b(x+\Delta x,t) - u_a(x+\Delta x,t))}{\partial t} + \\ &+ C_{bc} \Delta x \frac{\partial (u_b(x+\Delta x,t) - u_c(x+\Delta x,t))}{\partial t}; \\ i_c(x,t) - i_c(x+\Delta x,t) &= C_c \Delta x \frac{\partial u_c(x+\Delta x,t)}{\partial t} + C_{ca} \Delta x \frac{\partial (u_c(x+\Delta x,t) - u_a(x+\Delta x,t))}{\partial t} + \\ &+ C_{cb} \Delta x \frac{\partial (u_c(x+\Delta x,t) - u_b(x+\Delta x,t))}{\partial t}; \end{aligned} \right. \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{aligned} u_a(x,t) - u_a(x+\Delta x,t) &= L_a \Delta x \frac{\partial i_a(x+\Delta x,t)}{\partial t} + L_{ab} \Delta x \frac{\partial i_b(x+\Delta x,t)}{\partial t} + L_{ac} \Delta x \frac{\partial i_c(x+\Delta x,t)}{\partial t} + \\ &+ R_a \Delta x \cdot i_a(x+\Delta x,t) + R_3 \Delta x (i_a(x+\Delta x,t) + i_b(x+\Delta x,t) + i_c(x+\Delta x,t)); \\ u_b(x,t) - u_b(x+\Delta x,t) &= L_b \Delta x \frac{\partial i_b(x+\Delta x,t)}{\partial t} + L_{ba} \Delta x \frac{\partial i_a(x+\Delta x,t)}{\partial t} + L_{bc} \Delta x \frac{\partial i_c(x+\Delta x,t)}{\partial t} + \\ &+ R_b \Delta x \cdot i_b(x+\Delta x,t) + R_3 \Delta x (i_a(x+\Delta x,t) + i_b(x+\Delta x,t) + i_c(x+\Delta x,t)); \\ u_c(x,t) - u_c(x+\Delta x,t) &= L_c \Delta x \frac{\partial i_c(x+\Delta x,t)}{\partial t} + L_{ca} \Delta x \frac{\partial i_a(x+\Delta x,t)}{\partial t} + L_{cb} \Delta x \frac{\partial i_b(x+\Delta x,t)}{\partial t} + \\ &+ R_c \Delta x \cdot i_c(x+\Delta x,t) + R_3 \Delta x (i_a(x+\Delta x,t) + i_b(x+\Delta x,t) + i_c(x+\Delta x,t)). \end{aligned} \right. \quad (3)$$

Примем, что рассматриваемый участок цепи характеризуется полной симметрией параметров, т. е. что имеют место равенства:

$$\left\{ \begin{aligned} L_{ab} &= L_{ba} = L_{ac} = L_{ca} = L_{bc} = L_{cb} = L_0; \\ C_{ab} &= C_{ba} = C_{ac} = C_{ca} = C_{bc} = C_{cb} = C; \\ L_a &= L_b = L_c = L; \\ R_a &= R_b = R_c = R. \end{aligned} \right. \quad (4)$$

После некоторых математических преобразований получим уравнения:

$$\left\{ \begin{aligned} -\frac{\partial (u_a + u_b + u_c)}{\partial t} &= (R + R_3)(i_a + i_b + i_c) + (L + 2L_0) \frac{\partial (i_a + i_b + i_c)}{\partial t}; \\ -\frac{\partial (i_a + i_b + i_c)}{\partial t} &= C \frac{\partial (u_a + u_b + u_c)}{\partial t}. \end{aligned} \right. \quad (5)$$

В итоге соотношения для линии электропередачи будут иметь следующий вид:

$$\left\{ \begin{aligned} -\frac{\partial u_0}{\partial t} &= (R + 3R_3)i_0 + (L + 2L_0) \frac{\partial i_0}{\partial t}; \\ -\frac{\partial i_0}{\partial t} &= C \frac{\partial u_0}{\partial t}. \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Значение активной проводимости G_0 для линий напряжением меньше 330 кВ принимается равным нулю.

Таким образом, получили систему уравнений, аналогичную системе для однородной двухпроводной линии.

Дальнейший расчет напряжения и тока в ЛЭП проводится, как для модели однородной двухпроводной линии [6].

Уравнения (5) в комплексной форме можно записать:

$$\begin{cases} -\frac{d\dot{U}}{dx} = (R + 3R_3 + j\omega(L + 2L_0))\dot{I}; \\ -\frac{d\dot{I}}{dx} = j\omega C_0\dot{U}; \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \dot{U}(x) = \frac{1}{2}(\dot{U}_1 + \dot{I}_1 \underline{Z}_{\text{вЛ}})e^{-\gamma_\ell x} + \frac{1}{2}(\dot{U}_1 - \dot{I}_1 \underline{Z}_{\text{вЛ}})e^{\gamma_\ell x}; \\ \dot{I}(x) = \frac{1}{2\underline{Z}_{\text{вЛ}}}(\dot{U}_1 + \dot{I}_1 \underline{Z}_{\text{вЛ}})e^{-\gamma_\ell x} - \frac{1}{2\underline{Z}_{\text{вЛ}}}(\dot{U}_1 - \dot{I}_1 \underline{Z}_{\text{вЛ}})e^{\gamma_\ell x}; \end{cases} \quad (8)$$

и

$$\begin{cases} \dot{U}(x) = \dot{U}_1 \operatorname{ch} \gamma_\ell x - \dot{I}_1 \underline{Z}_{\text{вЛ}} \operatorname{sh} \gamma_\ell x; \\ \dot{I}(x) = \dot{I}_1 \operatorname{ch} \gamma_\ell x - \frac{\dot{U}_1}{\underline{Z}_{\text{вЛ}}} \operatorname{sh} \gamma_\ell x, \end{cases} \quad (9)$$

где $\underline{Z}_{\text{вЛ}}$ – волновое сопротивление линии; γ_ℓ – коэффициент распространения.

Возможность проведения экспериментальных исследований на физических моделях позволяет глубже понять суть происходящих процессов. Однако в условиях лаборатории проведение экспериментов по исследованию цепи с распределенными параметрами затруднительно, так как длина исследуемой линии должна составлять по крайней мере десятки километров. Один из модулей лабораторного стенда «Теория электрических цепей», изготовленного научно-производственным предприятием «Учтех-Профи» (г. Челябинск), позволяет смоделировать цепь с распределенными параметрами длиной 10 км, представленную десятью П-образными четырехполюсниками. Погонные параметры этой линии: $L_0 = 0,25$ мГн/км, $C_0 = 0,09$ мкФ/км. Одним из недостатков стенда для проведения научных исследований является реализация в нем только линии без потерь ($r_0 = 0$, $g_0 = 0$), работа которой исследуется на высокой частоте [7].

Задачей физического эксперимента на описанном стенде явилось получение распределения действующих значений напряжения вдоль линии при различных режимах работы линии при питании ее от источника синусоидального напряжения с действующим значением $U = 7$ В. В линиях без потерь в режимах холостого хода (х. х., $Z_{\text{н}} = \infty$) и короткого замыкания (к. з., $Z_{\text{н}} = 0$) наблюдается явление стоячих волн. Точкам максимальных значений напряжения (пучности) соответствуют минимальные значения тока (узлы) и наоборот. Пучности и узлы чередуются через расстояния, равные четверти длины волны. При заданных параметрах модели длина волны составляет 13 км. Полученные зависимости действующих значений напряжения от координаты x , отсчитываемой от начала линии, для режимов холостого хода и короткого замыкания приведены в таблице.

Результаты эксперимента на физической модели

ℓ , км	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
$U_{\text{х.х.}}$, В	5,6	4,7	3	0	2	4,2	5,5	5,1	3,7	2	2
$U_{\text{к.з.}}$, В	0	2,7	4,8	5,6	5,1	3,3	0	2	4	5,5	5,5

Проведение виртуальных электротехнических экспериментов с использованием математических моделей имеет ряд положительных свойств: безопасность, универсальность (один персональный компьютер заменяет множество реальных приборов и элементов электрических схем), наглядность и удобство представления материала и др.

Для исследования линий при различных первичных параметрах, длине и режимах работы создана математическая модель в программной среде MathCAD.

Для исследования адекватности математической модели проведен виртуальный эксперимент при синусоидальном питающем напряжении для линии с параметрами, аналогичными физической модели, для режимов холостого хода и короткого замыкания. Полученная кривая зависимости действующих значений напряжения от координаты x , отсчитываемой от начала линии, для режима холостого хода приведена на рисунке 4.

Сравнение результатов эксперимента на физической модели и расчета с использованием математической модели (см. таблицу и рисунок 4) показало, что характер зависимостей и численные значения совпадают.

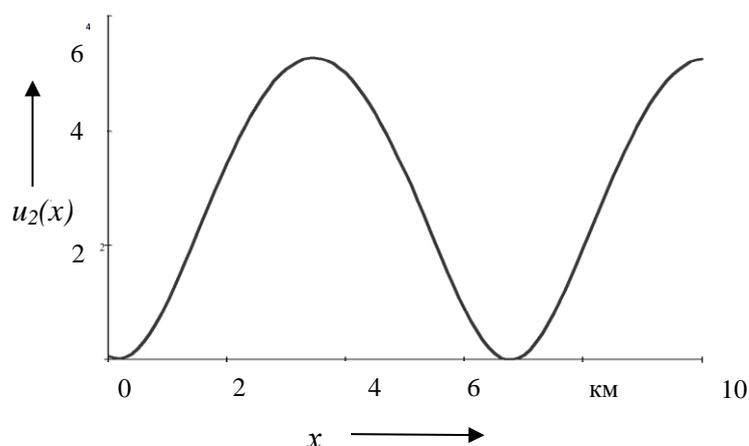


Рисунок 4 – Зависимость действующего напряжения в линии от координаты x для режима холостого хода

Форма напряжения в линии, как правило, несинусоидальна и может быть представлена в виде бесконечного гармонического ряда Фурье. В основу математической модели цепи с распределенными параметрами при несинусоидальном питающем напряжении положен метод наложения, заключающийся в расчете значений тока и напряжения в любой точке линии для каждой гармоники в отдельности. Последовательным расчетом определяются значения тока и напряжения соответствующих гармоник в любой точке линии, и в конечном итоге для тока и напряжения формируются результирующие ряды [8].

При помощи созданной математической модели рассчитаны различные режимы работы линий при несинусоидальном питающем напряжении.

В теории цепей с распределенными параметрами существует понятие неискажающей линии. Такая линия работает в режиме согласованной нагрузки (нагружена на волновое сопротивление), а ее параметры удовлетворяют условию:

$$\frac{r_0}{g_0} = \frac{L_0}{C_0}. \quad (10)$$

Ожидаемый результат расчета: форма кривых напряжения и тока на входе и на выходе неискажающей линии должна быть одинаковой, но сдвинутой по фазе. Для участка неискажающей линии протяженностью 120 км был произведен расчет передачи электрических сигналов несинусоидальной формы. Кривая входного напряжения, имеющая для примера форму прямоугольных импульсов с периодом 1500 мкс и продолжительностью импульса 1000 мкс, представлена в виде суммы ста гармоник с постоянной составляющей. Параметры линии:

$r_0 = 1,415 \text{ Ом/км}$; $g_0 = 9 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}$; $C_0 = 8,6 \cdot 10^{-9} \text{ Ф/км}$; $L_0 = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ Гн/км}$. Расчетные кривые напряжения на входе и выходе линии представлены на рисунке 5.

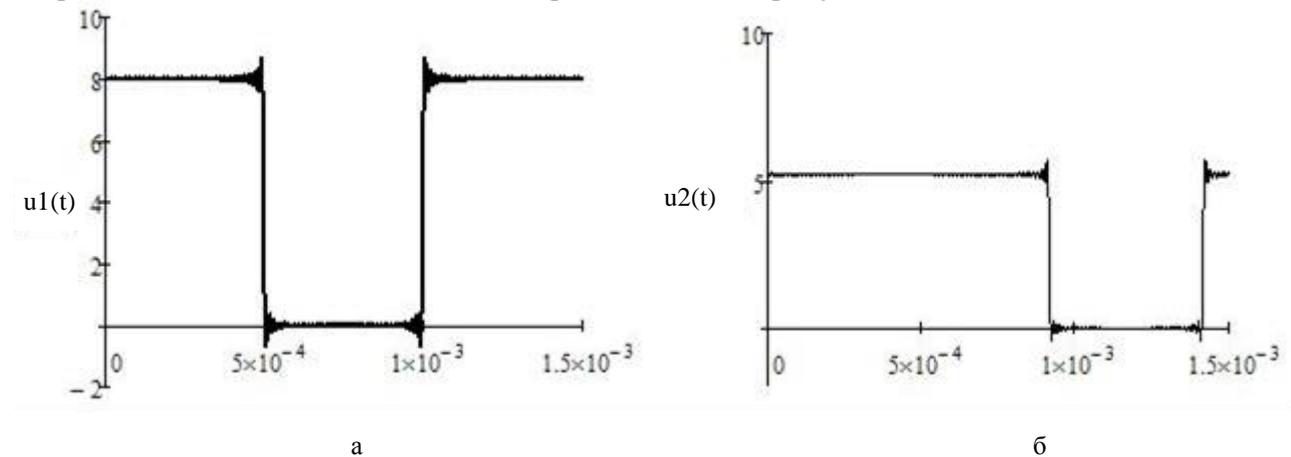


Рисунок 5 – Расчетные кривые напряжения на входе (а) и на выходе (б) неискажающей линии

Для сравнения произведен расчет обычной искажающей линии (первичные параметры: $r_0 = 12 \text{ Ом/км}$; $g_0 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}$; $C_0 = 8,6 \cdot 10^{-9} \text{ Ф/км}$; $L_0 = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ Гн/км}$), нагруженной на активно-индуктивное сопротивление (режим несогласованной нагрузки). Форма входного напряжения и длина линии остались без изменения. В таком режиме на форму кривой напряжения на выходе линии оказывает влияние обратная волна напряжения, зависящая от коэффициента отражения. Происходит уменьшение амплитуды за счет коэффициента затухания. В результате прохождения по линии импульс напряжения искажается, т. е. форма выходного импульса в общем случае не совпадает с формой входного. Результаты расчета напряжения на входе и на выходе линии представлены на рис. 6.

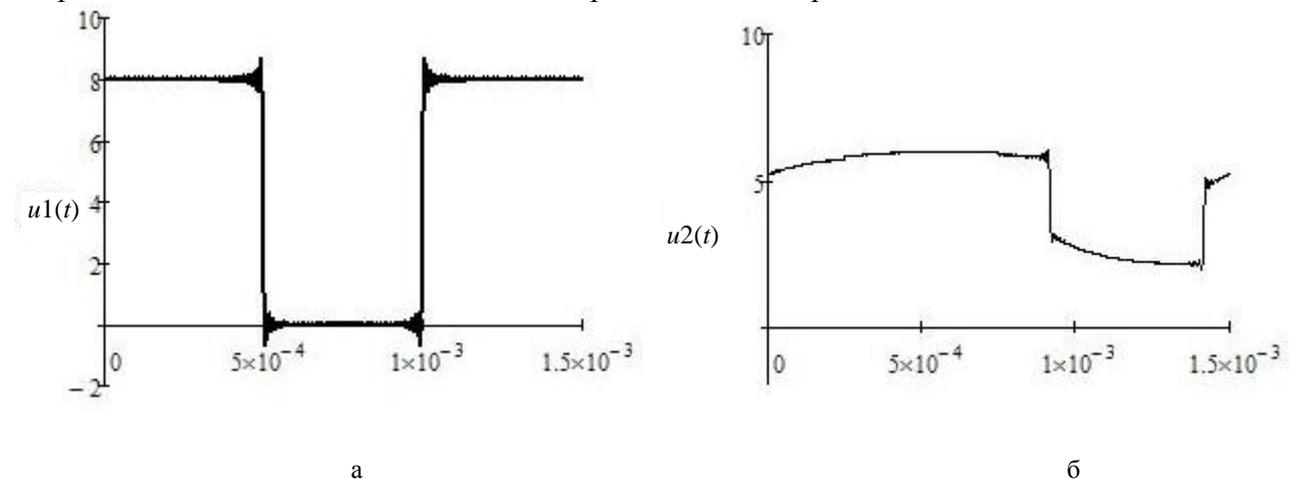


Рисунок 6 – Расчетные кривые напряжения на входе (а) и на выходе (б) искажающей линии

Таким образом, предложенный способ математического моделирования прохождения сигналов по линии с распределенными параметрами адекватно отражает явления, происходящие в линии, что подтверждено результатами эксперимента на физической модели и может применяться для анализа электромагнитных процессов в контактной сети и линиях электропередачи.

Список литературы

1. Комяков, А. А. Электрические цепи с распределенными параметрами: Учебное пособие [Текст] / А. А. Комяков, Н. В. Пашкова, А. В. Пономарев / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2011. – 71 с.

2. Бадер, М. П. Электромагнитная совместимость [Текст] / М. П. Бадер / УМК МПС России. – М., 2002. – 638 с.
3. Кузнецов, А. А. Разработка технических средств и методики контроля состояния изоляторов контактной сети постоянного тока [Текст] / А. А. Кузнецов, А. Ю. Кузьменко, Е. А. Кротенко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2012. – С. 110 – 116.
4. Пашкова, Н. В. Математическая модель для расчета нестационарных волновых процессов в контактных сетях системы тягового электроснабжения [Текст] / Н. В. Пашкова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2013. – С. 63 – 69.
5. Пашкова, Н. В. Особенности расчета волновых процессов в линиях электропередачи [Текст] / Н. В. Пашкова // Обеспечение экономически целесообразных условий работы железных дорог на основе оптимизации режимов работы электротехнических комплексов: Межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2008. – С. 58 – 61.
6. Пашкова, Н. В. Разработка метода оценки влияния параметров системы электроснабжения на волновые процессы в тяговых сетях [Текст]: Дис... канд. техн. наук. – Омск, 2004. – 164 с.
7. Исследование цепей с распределенными параметрами с использованием физических и математических моделей [Текст] / А. И. Гравер, Т. В. Ковалева и др. // Энергосберегающие технологии, контроль и управление для предприятий железнодорожного транспорта: Межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2015. – С. 30 – 36.
8. Периодические режимы однофазных и трехфазных электрических цепей: Учебное пособие [Текст] / А. Ю. Тэттер, В. Т. Черемисин и др. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2013. – 132 с.

References

1. Komiakov A. A., Pashkova N. V., Ponomarev A. V. *Elektricheskie tsepi s raspredelennymi parametrami* (Electrical circuits with distributed parameters). Omsk: OSTU, 2011, 71 p.
2. Bader M. P. *Elektromagnitnaia sovmestimost'* (Electromagnetic compatibility). Moscow: UMC MPS Rossii, 2002, 638 p.
3. Kuznetsov A. A., Kuz'menko A. Iu, Krotenko E. A. Development of technical means and methods of monitoring the status of a contact network insulators DC [Razrabotka tekhnicheskikh sredstv i metodiki kontrolya sostoianiia izoliatorov kontaktnoi seti postoiannogo toka]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2012, pp. 110 – 116.
4. Pashkova N. V. Mathematical model for calculating transient wave processes in the contact networks of traction power supply system [Matematicheskaia model' dlia rascheta nestatsionarnykh volnovykh pro-tsessov v kontaktnykh setiakh sistemy tiagovogo elektrosnabzheniia]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2013, pp. 63 – 69.
5. Pashkova N. V. Features of the calculation of wave propagation in transmission lines [Osobennosti rascheta volnovykh protsessov v liniakh elektroperedachi]. *Mezhvuzovskii tematicheskii sbornik nauchnykh trudov: «Obespechenie ekonomicheskii tselesoobraznykh uslovii raboty zheleznykh dorog na osnove optimizatsii rezhimov raboty elektrotekhnicheskikh kompleksov»* (Interuniversity thematic collection of scientific papers: «Ensuring economically viable conditions for railways on the basis of optimization of electrotechnical systems»). – Omsk, 2008, pp. 58 – 61.
6. Pashkova N. V. *Razrabotka metoda otsenki vliianiia parametrov sistemy elektrosnab-zheniia na volnovye protsessy v tiagovykh setiakh* (Developing methods for assessing the effect of the parameters of the power supply system on the wave processes in traction networks). Ph. D. thesis, Omsk, 2004, 164 p.
7. Graver A. I., Kovaleva T. V. Study of circuits with distributed parameters using physical and mathematical models [Issledovanie tsepei s raspredelennymi parametrami s ispol'zovaniem fizicheskikh i matematicheskikh modelei]. *Mezhvuzovskii tematicheskii sbornik nauchnykh trudov: «Energoberegaiushchie tekhnologii, kontrol' i upravlenie dlia predpriatii zheleznodorozhnogo*

transporta» (Interuniversity thematic collection of scientific papers: «Saving technologies, control and management for businesses of rail transport»). – Omsk, 2015, pp. 30 – 36.

8. Tetter A. Iu., Cheremisin V. T. *Periodicheskie rezhimy odnofaznykh i trekhfaznykh elektricheskikh tsepei* (Periodic modes of single-phase and three-phase electrical circuits). Omsk: OSTU, 2013, 132 p.

УДК 621.331.5

Ю. В. Кондратьев, А. В. Тарасенко

ВЫБОР МОЩНОСТИ И МЕСТА РАЗМЕЩЕНИЯ УСТРОЙСТВ ПОПЕРЕЧНОЙ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Крупномасштабные инвестиционные проекты ОАО «РЖД» по увеличению грузооборота предполагают увеличение нагрузки на существующие участки электрифицированных железных дорог, в связи с чем актуальной является проблема обеспечения пропускного требуемого количества пар поездов по участкам железных дорог. Электропотребление на железных дорогах переменного тока характеризуется достаточно высоким потреблением реактивной мощности, обусловленным спецификой электроподвижного состава переменного тока, что приводит к повышенному уровню потерь напряжения и мощности и, как следствие, к снижению энергетической эффективности и потенциальной пропускной и провозной способности железных дорог. Одним из наименее капиталоемких, а в некоторых случаях и единственно возможным рациональным способом усиления системы тягового электроснабжения переменного тока является использование устройств поперечной компенсации реактивной мощности. В статье рассмотрена методика определения мощности и выбора места размещения на участке железной дороги регулируемых и нерегулируемых устройств поперечной компенсации реактивной мощности в системах тягового электроснабжения 25 кВ и 2×25 кВ. Приведены расчет входного индуктивного сопротивления тяговой системы внешнего и тягового электроснабжения, основные варианты схем питания и секционирования тяговой сети и размещения устройств поперечной компенсации реактивной мощности, проверка обеспечения минимального уровня напряжения на токоприемнике электроподвижного состава. Результаты работы могут быть использованы как при проектировании новых участков железной дороги, так и при решении вопросов увеличения пропускной способности участков, находящихся в эксплуатации.

В системе тягового электроснабжения железных дорог переменного тока для повышения напряжения на токоприемнике электроподвижного состава (ЭПС) широко используются устройства поперечной компенсации (УПК) реактивной мощности [1]. Параметры и месторасположение УПК во многом определяют технико-экономические показатели работы участка железной дороги, поэтому от их правильного выбора зависит пропускная и провозная способность участка.

Расчет мощности и выбор места размещения УПК производят в следующей последовательности:

- выбор вариантов размещения УПК;
- расчет и проверка параметров УПК (регулируемых и нерегулируемых) для выбранных вариантов размещения;
- выбор УПК из ряда выпускаемых промышленностью.

В качестве вариантов размещения на рассматриваемом участке УПК принимают следующие объекты системы тягового электроснабжения:

- пост секционирования;
- автотрансформаторный пункт, совмещенный с постом секционирования;
- тяговую подстанцию.

Выбор места размещения УПК основан на таких расчетных показателях системы тягового электроснабжения, как минимальное трехминутное напряжение на токоприемнике ЭПС, ордината точки этого напряжения, расчетные и рекомендуемые значения коэффициента реактивной мощности тяговой нагрузки, максимальный 10-минутный ток тяговой нагрузки [2].

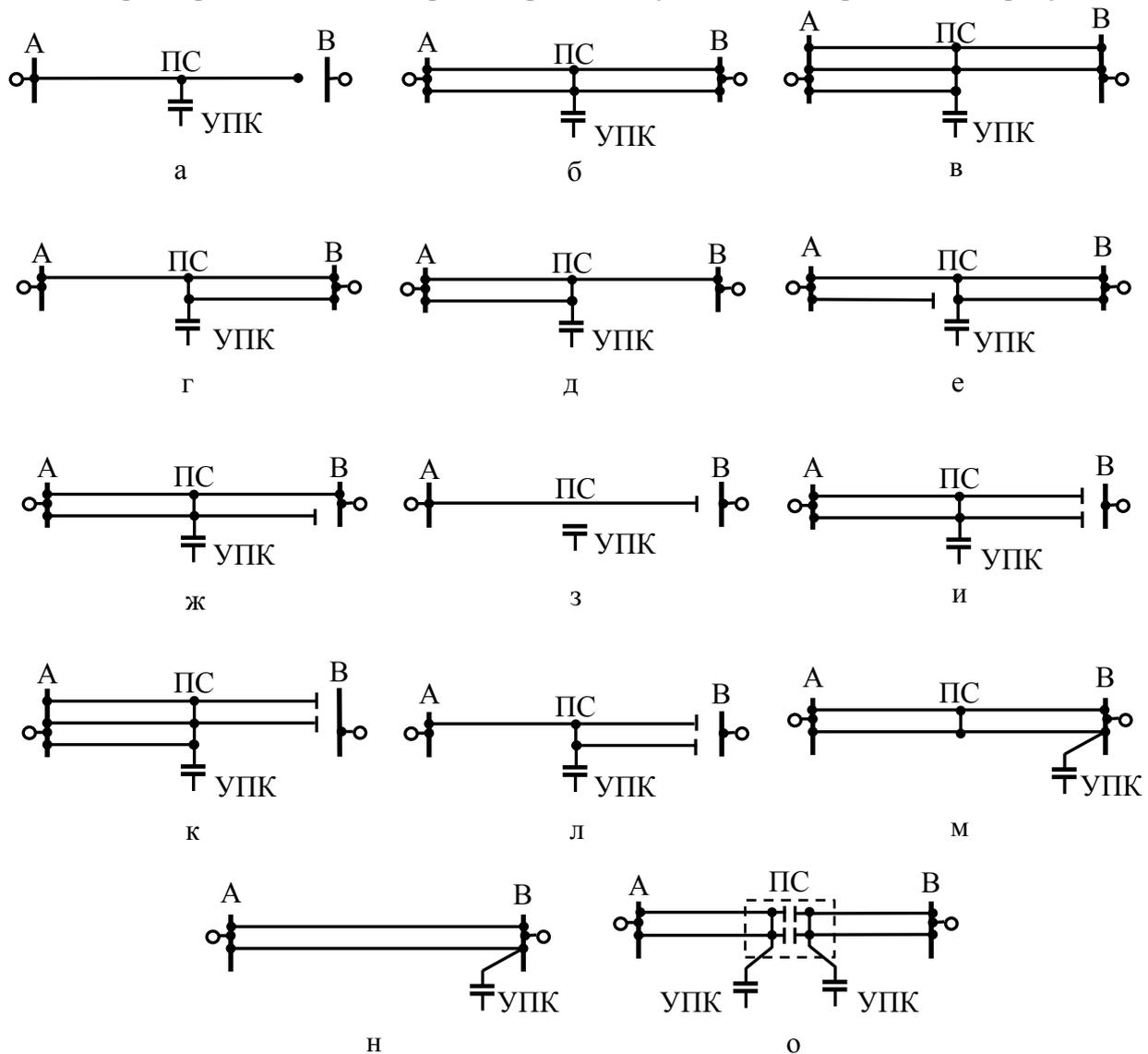
С целью решения задачи, направленной на повышение минимального напряжения на токоприемнике ЭПС, расчет мощности УПК в первую очередь выполняют для поста секциони-

рования или автотрансформаторного пункта, совмещенного с постом секционирования (при их наличии на рассматриваемом участке), а в случае необходимости предусматривают установку УПК на тяговых подстанциях.

В случае отсутствия поста секционирования на рассматриваемом участке при обоснованной необходимости целесообразно рассмотреть установку его с УПК.

На начальном этапе работы определяют ординаты поста секционирования и минимального напряжения на токоприемнике ЭПС.

Входные индуктивные сопротивления системы внешнего и тягового электроснабжения относительно сборных шин распределительного устройства поста секционирования ($X_{вх}$) и ординаты минимального напряжения на токоприемнике ЭПС ($X'_{вх}$), необходимые для расчета мощности УПК, зависят от схемы питания и секционирования контактной сети, основные варианты которой с размещенными на рассматриваемом участке УПК приведены на рисунке.



Основные варианты схем питания и секционирования контактной сети и размещения устройств поперечной компенсации реактивной мощности: ПС – пост секционирования;

а – двусторонний режим питания рассматриваемого участка; б – д – двусторонний узловый режим питания рассматриваемого участка; е, ж – двусторонний комбинированный режим питания рассматриваемого участка; з – односторонний режим питания рассматриваемого участка; и – л – односторонний узловый режим питания рассматриваемого участка; м – односторонний узловый режим питания рассматриваемого участка (подстанция В отключена от сборных шин); н – односторонний раздельный режим питания рассматриваемого участка (подстанция В отключена от сборных шин); о – двусторонний комбинированный режим питания рассматриваемого участка; п – комбинированный узловый режим питания рассматриваемого участка

Определяют входные индуктивные сопротивления любым из двух способов: аналитическим расчетом или на основе результатов расчета токов короткого замыкания в тяговой сети.

Аналитический расчет входного индуктивного сопротивления системы внешнего и тягового электроснабжения 25 кВ относительно сборных шин распределительного устройства поста секционирования до тяговой подстанции А (В) для одностороннего режима питания рассматриваемого участка осуществляют по формулам:

$$X_{\text{вх А}} = X_{\text{т.с А}} + 2X_{\text{тр А}} + 2X_{\text{с А}}; \quad (1)$$

$$X_{\text{вх В}} = X_{\text{т.с В}} + 2X_{\text{тр В}} + 2X_{\text{с В}}, \quad (2)$$

где $X_{\text{вх А}}$, $X_{\text{вх В}}$ – индуктивные сопротивления тяговой сети от поста секционирования до тяговой подстанции А и В соответственно, Ом;

$X_{\text{тр А}}$, $X_{\text{тр В}}$ – индуктивные сопротивления понижающих трансформаторов тяговой подстанций А и В соответственно, Ом:

$$X_{\text{тр А(В)}} = \frac{u_k U_{\text{ном}}^2}{100 S_{\text{тр}} n}, \quad (3)$$

где u_k – напряжение короткого замыкания понижающего трансформатора, %;

$U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение тяговой обмотки понижающего трансформатора, кВ;

$S_{\text{тр}}$ – номинальная мощность понижающего трансформатора, МВ·А;

n – количество включенных на сборные шины распределительного устройства напряжением 27,5 кВ понижающих трансформаторов, шт.;

$X_{\text{с А}}$, $X_{\text{с В}}$ – входные индуктивные сопротивления системы внешнего электроснабжения, приведенные к сборным шинам распределительного устройства напряжением 27,5 кВ тяговых подстанций А и В соответственно, Ом:

$$X_{\text{с А(В)}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{к.з}}}, \quad (4)$$

где $S_{\text{к.з}}$ – мощность короткого замыкания системы внешнего электроснабжения на шинах высшего напряжения тяговой подстанции А (В), МВ·А.

Входное индуктивное сопротивление $X'_{\text{вх}}$ определяют аналогично входному индуктивному сопротивлению $X_{\text{вх}}$.

При двухстороннем режиме питания рассматриваемого участка (рисунок, схемы а – ж), а также при одностороннем режиме питания (см. рисунок, схемы м, н) $X_{\text{вх}}$ до тяговых подстанций А и В определяют по формуле:

$$X_{\text{вх}} = \frac{X_{\text{вх А}} \cdot X_{\text{вх В}}}{X_{\text{вх А}} + X_{\text{вх В}}}. \quad (5)$$

Для случая трехстороннего и четырехстороннего питания тяговой сети входное индуктивное сопротивление $X_{\text{вх}}$ определяют соответственно по формулам:

$$X_{\text{вх}} = \frac{X_{\text{вх А}} \cdot X_{\text{вх В}} \cdot X_{\text{вх С}}}{X_{\text{вх А}} \cdot X_{\text{вх В}} + X_{\text{вх А}} \cdot X_{\text{вх С}} + X_{\text{вх В}} \cdot X_{\text{вх С}}}, \quad (6)$$

$$X_{\text{вх}} = \frac{X_{\text{вх А}} \cdot X_{\text{вх В}} \cdot X_{\text{вх С}} \cdot X_{\text{вх Д}}}{X_{\text{вх А}} \cdot X_{\text{вх В}} \cdot X_{\text{вх С}} + X_{\text{вх А}} \cdot X_{\text{вх В}} \cdot X_{\text{вх Д}} + X_{\text{вх А}} \cdot X_{\text{вх С}} \cdot X_{\text{вх Д}} + X_{\text{вх В}} \cdot X_{\text{вх С}} \cdot X_{\text{вх Д}}}. \quad (7)$$

Индуктивные сопротивления тяговой сети от поста секционирования до тяговых подстанций А и В определяют по данным о погонном сопротивлении тяговой сети, характеризующейся типом контактной подвески, маркой рельса, количеством путей, а также о состоянии схемы питания и секционирования контактной сети.

Аналитический расчет входного индуктивного сопротивления системы внешнего и тягового электроснабжения 2×25 кВ относительно сборных шин распределительного устройства поста секционирования до тяговой подстанции А (В) осуществляют по формулам:

$$X_{вх А} = Z_{т.с.А} \cdot \sin \alpha + X_{трА} + 2X_{с.А}; \quad (8)$$

$$X_{вх В} = Z_{т.с.В} \cdot \sin \alpha + X_{трВ} + 2X_{с.В}, \quad (9)$$

где $Z_{т.с.А}$, $Z_{т.с.В}$ – полные сопротивления тяговой сети системы тягового электроснабжения 2×25 кВ, Ом.

При расчете индуктивного сопротивления значение $\sin \alpha$ принимают равным 0,85.

Значения $Z_{т.с.А}$ и $Z_{т.с.В}$ определяют по таблице. При этом варианты схем питания принимают по аналогии с системой тягового электроснабжения 25 кВ (см. рисунок).

Значения полных сопротивлений тяговой сети для системы тягового электроснабжения 2×25 кВ

Схема питания (см. рисунок)	Полное сопротивление тяговой сети, Ом	
	$Z_{т.с.А}$	$Z_{т.с.В}$
а	$\underline{Z}_{т.с.э} \cdot L_{АП} + \gamma_k \cdot \underline{Z}_А + \underline{Z}_{р1} \cdot \beta_k \cdot l_{А АТ.П}$	$\underline{Z}_{т.с.э} \cdot L_{ВП} + \gamma_k \cdot \underline{Z}_А + \underline{Z}_{р1} \cdot \beta_k \cdot l_{В АТ.П}$
б	$0,5 \cdot (\underline{Z}_{т.с.э} \cdot L_{АП} + \gamma_k \cdot \underline{Z}_А) + \underline{Z}_{р2} \cdot \beta_k \cdot l_{А АТ.П}$	$0,5 \cdot (\underline{Z}_{т.с.э} \cdot L_{ВП} + \gamma_k \cdot \underline{Z}_А) + \underline{Z}_{р2} \cdot \beta_k \cdot l_{В АТ.П}$
в	$\frac{1}{3} \cdot (\underline{Z}_{т.с.э} \cdot L_{АП} + \gamma_k \cdot \underline{Z}_А) + \underline{Z}_{р2} \cdot \beta_k \cdot l_{А АТ.П}$	$0,5 \cdot (\underline{Z}_{т.с.э} \cdot L_{ВП} + \gamma_k \cdot \underline{Z}_А) + \underline{Z}_{р2} \cdot \beta_k \cdot l_{В АТ.П}$
г, е	$\underline{Z}_{т.с.э} \cdot L_{АП} + \gamma_k \cdot \underline{Z}_А + \underline{Z}_{р2} \cdot \beta_k \cdot l_{А АТ.П}$	$0,5 \cdot (\underline{Z}_{т.с.э} \cdot L_{ВП} + \gamma_k \cdot \underline{Z}_А) + \underline{Z}_{р2} \cdot \beta_k \cdot l_{В АТ.П}$
д, ж	$0,5 \cdot (\underline{Z}_{т.с.э} \cdot L_{АП} + \gamma_k \cdot \underline{Z}_А) + \underline{Z}_{р2} \cdot \beta_k \cdot l_{А АТ.П}$	$\underline{Z}_{т.с.э} \cdot L_{ВП} + \gamma_k \cdot \underline{Z}_А + \underline{Z}_{р1} \cdot \beta_k \cdot l_{В АТ.П}$
з, п	$\underline{Z}_{т.с.э} \cdot L_{АП} + \gamma_k \cdot \underline{Z}_А + \underline{Z}_{р1} \cdot \beta_k \cdot l_{А АТ.П}$	–
и	$0,5 \cdot (\underline{Z}_{т.с.э} \cdot L_{АП} + \gamma_k \cdot \underline{Z}_А) + \underline{Z}_{р2} \cdot \beta_k \cdot l_{А АТ.П}$	–
к	$\frac{1}{3} \cdot (\underline{Z}_{т.с.э} \cdot L_{АП} + \gamma_k \cdot \underline{Z}_А) + \underline{Z}_{р2} \cdot \beta_k \cdot l_{А АТ.П}$	–
м, н	$0,5 \cdot (\underline{Z}_{т.с.э} \cdot L_{АП} + \gamma_k \cdot \underline{Z}_А) + \underline{Z}_{р2} \cdot \beta_k \cdot l_{А АТ.П}$	–
о	$0,5 \cdot (\underline{Z}_{т.с.э} \cdot L_{АП} + \gamma_k \cdot \underline{Z}_А) + \underline{Z}_{р2} \cdot \beta_k \cdot l_{А АТ.П}$	$\underline{Z}_{т.с.э} \cdot L_{ВП} + \gamma_k \cdot \underline{Z}_А + \underline{Z}_{р1} \cdot \beta_k \cdot l_{В АТ.П}$

В таблице приняты следующие обозначения:

$l_{А АТ.П}$, $l_{В АТ.П}$ – расстояние от поста секционирования до ближайшего автотрансформаторного пункта в сторону тяговой подстанции А и В соответственно, км;

$\underline{Z}_{р1}$, $\underline{Z}_{р2}$ – погонные сопротивления рельсовой сети на однопутных и двухпутных участках соответственно, Ом/км;

$\underline{Z}_{т.с.э}$ – погонное сопротивление эквивалентной контактной сети системы тягового электроснабжения 2×25 кВ, приведенной к сопротивлению системы тягового электроснабжения 25 кВ, Ом/км;

γ_k , β_k – коэффициенты приведения сопротивлений системы тягового электроснабжения 2×25 кВ к системе тягового электроснабжения 25 кВ.

Полное сопротивление автотрансформатора определяют по выражению:

$$Z_A = \frac{u_k U_{\text{ном}}^2}{100 S_{\text{АТ.П}}}, \quad (10)$$

где u_k – напряжение короткого замыкания автотрансформатора, %;

$U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение, принимают равным 27,5 кВ;

$S_{\text{АТ.П}}$ – номинальная мощность автотрансформатора, МВ·А.

Определение входного индуктивного сопротивления системы внешнего и тягового электроснабжения на основе результатов расчета токов короткого замыкания в тяговой сети выполняют для нормальной схемы питания и секционирования рассматриваемого участка, при этом падение напряжения в электрической дуге и сопротивление в точке короткого замыкания принимают равными нулю.

Если уровень напряжения холостого хода на сборных шинах распределительного устройства 27,5 кВ смежных тяговых подстанций, питающих рассматриваемый участок, различается, то для расчетов в качестве $U_{x,x}$ принимают среднее значение напряжения холостого хода тяговых подстанций.

Расчет входных индуктивных сопротивлений $X_{\text{вх}}$ и $X'_{\text{вх}}$ системы внешнего и тягового электроснабжения 25 кВ (2×25 кВ) на основе результатов расчета тока короткого замыкания выполняют соответственно по формулам:

$$X_{\text{вх}} = \frac{U_{x,x}}{I_{\text{к.з п.с}}} \sin \varphi; \quad (11)$$

$$X'_{\text{вх}} = \frac{U_{x,x}}{I_{\text{к.з мин}}} \sin \varphi, \quad (12)$$

где $I_{\text{к.з п.с}}$ – ток короткого замыкания на шинах поста секционирования, А;

φ – угол между напряжением холостого хода на сборных шинах распределительного устройства тяговых подстанций и током короткого замыкания, град;

$I_{\text{к.з мин}}$ – ток короткого замыкания в ординате с минимальным напряжением на токоприемнике ЭПС, А.

Для системы тягового электроснабжения 2×25 кВ угол φ определяют для полуобмотки автотрансформатора, присоединенной к контактной сети.

Расчетную мощность регулируемого УПК на посту секционирования определяют из условия обеспечения на токоприемнике ЭПС минимального напряжения на уровне не ниже минимального нормируемого по формуле:

$$Q_{\text{к.у}} = \frac{U_{\text{ном к.у}}^2 \cdot (U_{\text{мин доп}} - U_{\text{мин факт}})}{U_{\text{мин доп}} \cdot X_{\text{вх}}}, \quad (13)$$

где $U_{\text{ном к.у}}$ – номинальное напряжение УПК, принимают равным 27,5 кВ;

$U_{\text{мин доп}}$, $U_{\text{мин факт}}$ – минимальное допустимое и минимальное фактическое напряжение на токоприемнике ЭПС соответственно в границах рассматриваемого участка, кВ.

Минимальное допустимое напряжение на токоприемнике ЭПС принимают равным 21 кВ (среднее значение за 3 мин), а для рассматриваемых участков с максимальной скоростью движения пассажирских поездов свыше 160 км/ч – равным 24 кВ (среднее значение за 1 мин).

Если ордината с минимальным напряжением на токоприемнике ЭПС отличается от ординаты поста секционирования более чем на 2 км, то выполняют корректировку мощности УПК, полученную по выражению (13), по формулам:

для однопутного рассматриваемого участка –

$$Q'_{к.у} = Q_{к.у} \frac{X_{вх}}{X'_{вх}}, \quad (14)$$

для многопутного рассматриваемого участка –

$$Q'_{к.у} = Q_{к.у} \left(1 + \frac{k_1 \cdot (L-l) \cdot x_{т.с}}{k_1 \cdot L \cdot x_{т.с} + 2(k_1 + k_2)(X_C + X_{тр})} \right), \quad (15)$$

где L – расстояние от поста секционирования до тяговой подстанции, определяемое зоной с ординатой минимального напряжения на токоприемнике ЭПС, км;

l – расстояние от ординаты с минимальным напряжением на токоприемнике ЭПС до ординаты ближайшей тяговой подстанции, км;

X_C – входное индуктивное сопротивление системы внешнего электроснабжения тяговой подстанции с ординатой, ближайшей к ординате с минимальным напряжением на токоприемнике ЭПС, приведенное к напряжению системы тягового электроснабжения, Ом;

$X_{тр}$ – индуктивное сопротивление трансформаторов тяговой подстанции с ординатой, ближайшей к ординате с минимальным напряжением на токоприемнике ЭПС, приведенное к напряжению системы тягового электроснабжения, Ом;

$x_{т.с}$ – удельное индуктивное сопротивление тяговой сети одного пути рассматриваемого участка с ординатой минимального напряжения на токоприемнике ЭПС, Ом/км;

k_1 – коэффициент токораспределения присоединения контактной сети поста секционирования, питающего участок с ординатой минимального напряжения на токоприемнике ЭПС;

k_2 – коэффициент токораспределения остальных присоединений поста секционирования, питающих участки, до ординаты тяговой подстанции, ближайшей к ординате минимального напряжения на токоприемнике ЭПС.

При одностороннем питании однопутного рассматриваемого участка при удалении ординаты с минимальным напряжением на токоприемнике ЭПС от ординаты питающей тяговой подстанции далее, чем расстояние от поста секционирования до тяговой подстанции, корректировка мощности УПК не требуется.

Коэффициенты токораспределения определяют по формулам:

$$k_1 = \frac{I_{1к.з}}{I_{к.з п.с}}; \quad (16)$$

$$k_2 = \frac{\sum I_{п.к.з}}{I_{к.з п.с}}, \quad (17)$$

где $I_{1к.з}$ – составляющая тока короткого замыкания на шинах поста секционирования, протекающая по присоединению контактной сети поста секционирования со стороны пути с ординатой минимального напряжения на токоприемнике ЭПС, А;

$\sum I_{п.к.з}$ – сумма составляющих тока короткого замыкания на шинах поста секционирования, протекающих по присоединениям поста секционирования, питающих соответствующую часть рассматриваемого участка с ординатой минимального напряжения на токоприемнике ЭПС, исключая присоединение, по которому протекает $I_{1к.з}$, А, (для двухпутного участка – составляющая тока короткого замыкания на шинах поста секционирования, проте-

кающая по смежному присоединению поста секционирования, питающему соответствующую часть рассматриваемого участка с ординатой минимального напряжения на токоприемнике ЭПС).

Полученное по формулам (13) – (15) значение мощности УПК округляют до ближайшего большего значения номинальной мощности УПК, выпускаемого промышленностью.

Максимальное повышение напряжения при установке УПК не должно приводить к повышению напряжения в тяговой сети выше максимально допустимого (29 кВ). Исходя из этого при выборе мощности нерегулируемого УПК должно выполняться неравенство:

$$\begin{aligned} &\text{для } U_{\max \text{ доп}} \geq U_{x.x} \text{ и } U_{\min \text{ доп}} \geq U_{\min \text{ факт}}; \\ &U_{\min \text{ доп}} - U_{\min \text{ факт}} \leq U_{\max \text{ доп}} - U_{x.x}, \end{aligned} \quad (18)$$

где $U_{\max \text{ доп}}$, $U_{x.x}$ – максимальное допустимое напряжение в тяговой сети и напряжение холодного хода на сборных шинах распределительного устройства соответственно, кВ.

Если неравенство (18) не соблюдается, в составе оборудования УПК следует предусмотреть устройство защитного отключения, а также рассмотреть вариант подключения УПК к сборным шинам тяговой подстанции.

Мощность УПК проверяют по критериям поддержания минимально допустимого уровня напряжения на токоприемнике ЭПС в границах рассматриваемого участка и обеспечения заданного коэффициента реактивной мощности для расчетных и перспективных размеров движения:

$$U_{\min \text{ ЭПС К.У}} \geq U_{\min \text{ доп}}, \quad (19)$$

где $U_{\min \text{ ЭПС К.У}}$ – Минимальное напряжение на токоприемнике ЭПС при применении УПК, кВ.

Коэффициент реактивной мощности определяют по суммарной тяговой нагрузке присоединений понижающих трансформаторов тяговых подстанций.

Мощность УПК на посту секционирования $Q''_{К.У}$, соответствующая номинальному ряду мощностей УПК, выпускаемых промышленностью, должна быть больше или равна расчетному значению мощности $Q'_{К.У}$ и не должна превышать средней реактивной мощности тяговой нагрузки на рассматриваемом участке:

$$Q''_{К.У} \leq Q_{\text{ср т.с}}, \quad (20)$$

где $Q_{\text{ср т.с}}$ – средняя реактивная мощность тяговой нагрузки на рассматриваемом участке, квар:

$$Q_{\text{ср т.с}} = \frac{(W_{Q_{\text{т.с А}}} + W_{Q_{\text{т.с В}}})}{24D_{\text{инт мес}}}, \quad (21)$$

где $W_{Q_{\text{т.с А}}}$, $W_{Q_{\text{т.с В}}}$ – расход реактивной электроэнергии за месяц интенсивных нагрузок по присоединениям контактной сети, питающих рассматриваемый участок подстанций А и В соответственно, квар·ч;

$D_{\text{инт мес}}$ – число суток интенсивного месяца.

Если неравенство (20) не выполняется, то номинальную мощность УПК, размещаемого на посту секционирования, ограничивают значением, не превышающим $Q_{\text{ср т.с}}$.

При несоблюдении неравенства (19) для выбранной мощности УПК на посту секционирования предусматривают дополнительное УПК на одной из смежных тяговых подстанций.

Для регулируемых УПК проверку по условиям (19) и (20) не выполняют.

Для определения мощности УПК, размещаемого на тяговой подстанции, повторяют расчет по выражению (13), учитывая в составе исходных данных мощность УПК на посту секционирования, выбранную с учетом ограничений (19) – (21).

Первоначально рассматривают вариант размещения УПК на тяговой подстанции, ближайшей к ординате минимального напряжения на токоприемнике ЭПС. В случае, если данная ордината отличается от ординаты поста секционирования на величину не более ± 1 км, УПК размещают на тяговой подстанции, питающей рассматриваемый участок отстающей фазой. Если отстающие фазы располагаются с обеих сторон рассматриваемого участка, то для размещения УПК принимают тяговую подстанцию, у которой наблюдается наибольший коэффициент реактивной мощности. Аналогично поступают в случае, если с обеих сторон рассматриваемый участок получает питание от опережающих фаз тяговых подстанций.

Минимальное значение коэффициента реактивной мощности для тяговой подстанции определяется по формуле:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{W_{Q_{T.C.A(B)}}}{W_{P_{T.C.A(B)}}}, \quad (22)$$

где $W_{P_{T.C.A(B)}}$, $W_{Q_{T.C.A(B)}}$ – соответственно расход активной и реактивной электроэнергии по присоединениям контактной сети, питающих рассматриваемый участок, подстанции А (В) за интенсивный месяц при включенных УПК, кВт·ч.

При этом минимальное значение $\operatorname{tg}\varphi$ для тяговой подстанции не должно превышать рекомендуемых значений, установленных нормативными актами или договорами об оказании услуг по передаче электроэнергии (договорах энергоснабжения).

Для проектируемых участков коэффициент реактивной мощности $\operatorname{tg}\varphi$, расход активной и реактивной энергии за интенсивный месяц определяют по тяговым и электрическим расчетам, выполненным без учета УПК. Расчетную реактивную мощность, потребляемую тяговой подстанцией с учетом выбранных УПК, определяют по формуле:

$$Q_{\text{ТП}}^* = \frac{W_Q}{24D_{\text{инт мес}}} - \left(Q_{k1} + Q_{k2} + Q_{k.P.C1} \frac{L_{AB} - l_{\text{АП}}}{L_{AB}} + Q_{k.P.C2} \frac{L_{CA} - l'_{\text{ПА}}}{L_{CA}} \right), \quad (23)$$

где $\frac{W_Q}{24D_{\text{инт мес}}}$ – реактивная мощность тяговой подстанции без учета УПК за интенсивный месяц, Мвар;

Q_{k1} , Q_{k2} – мощность УПК на фазах тяговой подстанции, Мвар;

$Q_{k.P.C1}$, $Q_{k.P.C2}$ – мощность УПК на постах секционирования справа и слева от подстанции соответственно, Мвар;

L_{AB} , L_{CA} – расстояние между тяговыми подстанциями А, В и А, С соответственно, км;

$l_{\text{АП}}$, $l'_{\text{ПА}}$ – расстояние до постов секционирования справа и слева от подстанции А, км.

Если в расчетах то или иное УПК отсутствует, то соответствующее значение в формуле (23) принимают равным нулю.

Окончательно с учетом УПК

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{Q_{\text{ТП}}^* \cdot 24D_{\text{инт мес}}}{W_{P_{T.C.A(B)}}}. \quad (24)$$

УПК для тяговой подстанции выбирают из выпускаемых промышленностью, при этом номинальная мощность выбранного УПК не должна превышать реактивной мощности тяговой подстанции, определяемой по выражению (23).

После выбора мощности УПК на тяговой подстанции выполняют проверку по обеспечению поддержания минимального уровня напряжения на токоприемнике ЭПС в соответствии с неравенством (19), а также максимального уровня напряжения на сборных шинах тяговой

подстанции в соответствии с неравенством (18). Для регулируемых УПК проверку по условиям (18) и (19) не выполняют.

Таким образом, проведение технико-экономических расчетов, по результатам которых определяются оптимальное расположение УПК и его мощность, позволит повысить энергетическую эффективность участка железной дороги за счет снижения уровня технических потерь электроэнергии в тяговой сети и увеличить напряжение в контактной сети и увеличить пропускную и провозную способность.

Список литературы

1. Герман, Л. А. Регулируемые установки емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог: Монография [Текст] / Л. А. Герман, А. С. Серебряков / МИИТ. – М., 2011. – 164 с.

2. Вильгельм, А. С. Совершенствование метода расчета системы тягового электроснабжения переменного тока [Текст] / А. С. Вильгельм, А. А. Комяков, В. Л. Незевак // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2014. – № 3 (19). – С. 54 – 65.

References

1. German L. A., Serebryakov A. S. *Reguliruemye ustanovki emkostnoy kompensacii v sistemakh tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznikh dorog* (Regulated facilities capacitive compensation in traction power supply systems of Railways: monograph). Moscow: Moscow State Transport University, 2011, 164 p.

2. Vilgelm A. S., Komyakov A. A., Nezevak V. L. Improvement in the calculation on methods for the traction power system [Sovershenstvovanie metoda rascheta sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka]. *Izvestiya Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2014, no. 3 (19), pp. 54 – 65.

УДК 621.331:621.331

В. Л. Незевак, А. П. Шатохин

МОНИТОРИНГ ВЫПОЛНЕНИЯ НОРМ УДЕЛЬНОЙ РЕКУПЕРАЦИИ В ГРАНИЦАХ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ЗОНЫ МОНИТОРИНГА УЧАСТКА ПОСТОЯННОГО ТОКА

В статье рассматривается проблема повышения эффективности рекуперативного торможения на участках железных дорог постоянного тока. Для выявления причин снижения уровня удельной рекуперации на участке предлагается алгоритм, позволяющий определять причины снижения уровня удельной рекуперации на произвольном участке мониторинга с учетом определения работоспособности локомотива, параметров работы системы тягового электроснабжения и исполненного графика движения поездов. Рассмотрены основные этапы работы алгоритма на примере одного из участков железной дороги.

Нормативные требования в области энергосбережения и постоянный рост тарифов на энергоресурсы обуславливают актуальность вопросов по повышению энергетической эффективности во всех сферах экономической деятельности, в том числе и на транспорте. Одной из важнейших задач, стоящих перед предприятиями холдинга РЖД, является повышение энергетической эффективности производственной деятельности и в первую очередь перевозочного процесса. Решение указанной задачи связано с повышением эффективности рекуперативного торможения, объемы которого составили по итогам 2014 г. 1,9 млрд кВт·ч.

Решение задачи повышения эффективности рекуперативного торможения неразрывно связано с анализом влияния массы состава и технической скорости, условий безопасного пропуска поездов, режимных карт, исправности локомотива (в части исправности схем реку-

перативного торможения), параметров системы тягового электроснабжения на энергетическую эффективность перевозочного процесса. В настоящее время анализ эффективности применения рекуперативного торможения осуществляется на основе анализа результатов поездок по локомотивам, сериям, поездоучасткам и локомотивным бригадам [1, 2]. Указанный анализ основан на поиске минимальных значений удельной рекуперации из сформированной базы данных по выбранным категориям для проведения в дальнейшем работы по выявлению причин, повлиявших на снижение удельной рекуперации.

В настоящее время на железных дорогах внедряются системы, позволяющие не только проводить анализ отчетных данных результатов поездок по применению рекуперативного торможения, но и контролировать процессы электропотребления в режиме реального времени. Одной из таких систем является автоматизированная система мониторинга энергетической эффективности перевозочного процесса, основанная на измерениях параметров электропотребления электроподвижного состава и присоединений тяговых подстанций [3].

Как было отмечено выше, анализ поездок локомотивов позволяет выявить поездки с уровнем удельной рекуперации ниже среднего. В качестве примера можно привести результаты мониторинга на Западно-Сибирской и Свердловской железных дорогах для участков Тайга – Мариинск и Екатеринбург – Каменск-Уральский соответственно, где при рассмотрении поездок с одной серией локомотива, массой поезда и технической скоростью были выявлены значительные расхождения величины удельной рекуперации. На рисунке 1 приведены значения удельной рекуперации для ряда поездок электровозов серии 2ЭС6, эксплуатируемых на участке Тайга – Мариинск и Екатеринбург – Каменск-Уральский соответственно (масса составов – в диапазон от 4000 до 5000 т). Среднее значение удельной рекуперации на рассматриваемых участках за время наблюдения составило 19,8 и 11,4 кВт·ч/10⁴ткм брутто соответственно.

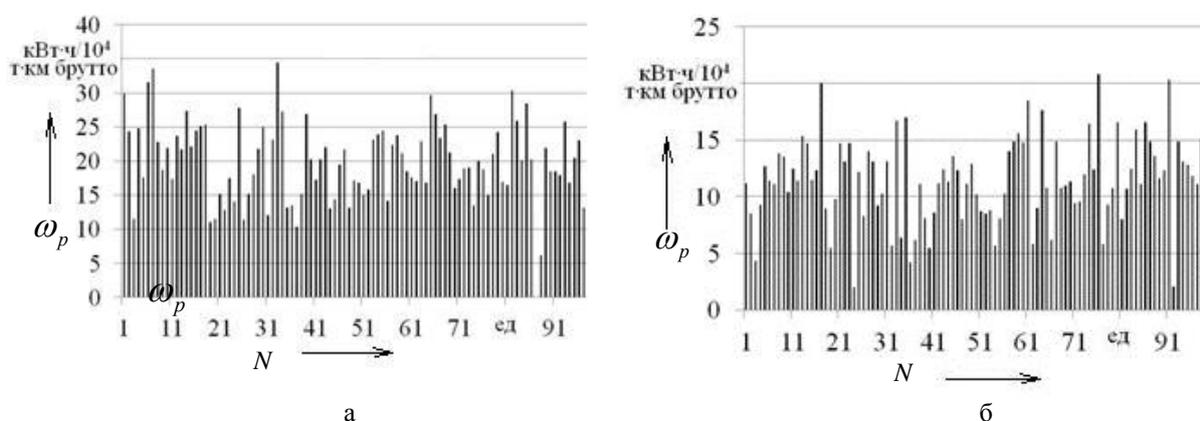


Рисунок 1 – Диаграммы величин (кВт·ч/10⁴ткм брутто) удельной рекуперации электровозов 2ЭС6 на участках Тайга – Мариинск (а) и Екатеринбург – Каменск-Уральский (б)

Обработка результатов поездок позволяет выявить случаи с низким уровнем удельной рекуперации. В качестве основных причин снижения уровня можно указать следующие: неисправность системы рекуперации на локомотиве, отсутствие необходимых условий по напряжению в системе тягового электроснабжения, одиночное следование поезда по межподстанционной зоне (МПЗ), неприменение машинистом локомотива рекуперативного торможения и т. д. Своевременное выявление указанных причин с целью воздействия на указанные факторы позволит значительно повысить уровень удельной рекуперации. Решение указанной задачи возможно с помощью подсистемы, входящей в упомянутую выше автоматизированную систему, позволяющую осуществлять мониторинг эффективности применения рекуперативного торможения.

Под мониторингом эффективности применения и использования энергии рекуперации понимается постоянное исследование состояния, анализ и прогнозирование уровня удельной рекуперации в границах произвольного участка железной дороги с целью выявления мест и

причин его снижения. В ОАО «РЖД» в настоящее время в соответствии с распоряжением «Об утверждении методики планирования и нормирования энергии рекуперации на уровне эксплуатационного локомотивного депо» [4] удельную рекуперацию определяют и нормируют для конкретного участка на основе статистического анализа маршрутов машиниста (ММ). Данная работа производится после поездки локомотивной бригады. Детальный анализ показал ряд недостатков метода, связанных с невозможностью выявления причин снижения уровня удельной рекуперации на участке с локализацией до любой МПЗ, а также с отсутствием некоторых эталонных значений удельной рекуперации, с которыми следует сравнивать результаты поездки локомотива.

Для реализации системы мониторинга предлагается использовать создаваемую автоматизированную систему мониторинга энергоэффективности перевозочного процесса (АСМЭПП), состоящую из трех подсистем [5, 6]:

автоматизированная система мониторинга и учета электроэнергии на фидерах контактной сети тяговых подстанций (АСМУЭ ФКС);

информационно-измерительные комплексы учета электрической энергии на электроподвижном составе (ИИК ЭПС);

единая система сбора и обработки данных

Схема информационного взаимодействия подсистем АСМЭПП представлена на рисунке 2.

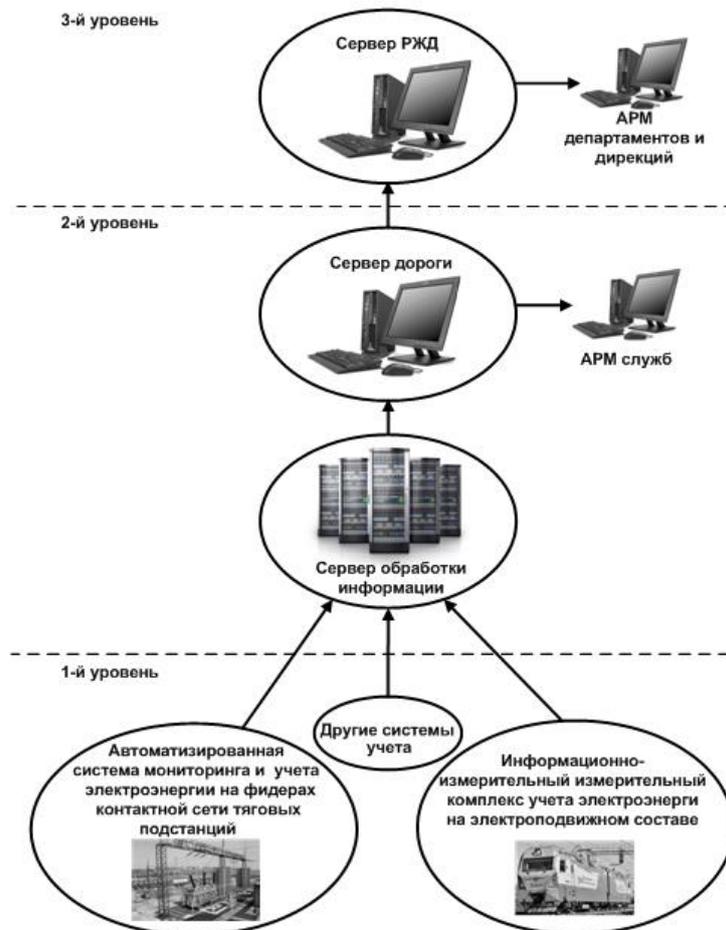


Рисунок 2 – Информационное взаимодействие подсистем АСМЭПП

У системы мониторинга должны быть следующие функциональные возможности:

1) оценка качества собранной информации. Полученные данные должны быть оценены с точки зрения их достоверности, актуальности и информативности, чтобы на их основе можно было проводить анализ;

2) оценка эффективности применения и использования энергии рекуперации. Обработка данных мониторинга подразумевает анализ собранных данных в реальном времени, к примеру, с помощью задач классификации, кластеризации, нахождения последовательностей и т. д.;

3) подготовка данных. Анализируемые данные должны иметь возможность представления как в текстовом, так и графическом виде (с возможностью рейтинговой оценки) для улучшения информативности получаемых результатов;

4) сбор и хранение результатов для последующего анализа.

Для реализации указанных функциональных возможностей предлагается следующий порядок получения, обработки и анализа данных (рисунок 3). На первом этапе работы алгоритма по данным ИИК ЭПС и АСМУЭ ФКС определяется удельная рекуперация электровоза на зоне мониторинга по выражению:

$$\omega_p = \frac{W_p^{\text{возвр}}}{A}, \quad (1)$$

где A – объем тонно-километровой работы в границах зоны мониторинга, выполняемой рассматриваемым электровозом, 10^4 ткм брутто;

$W_p^{\text{возвр}}$ – объем рекуперации электрической энергии в границах зоны мониторинга рассматриваемым электровозом, кВт·ч.

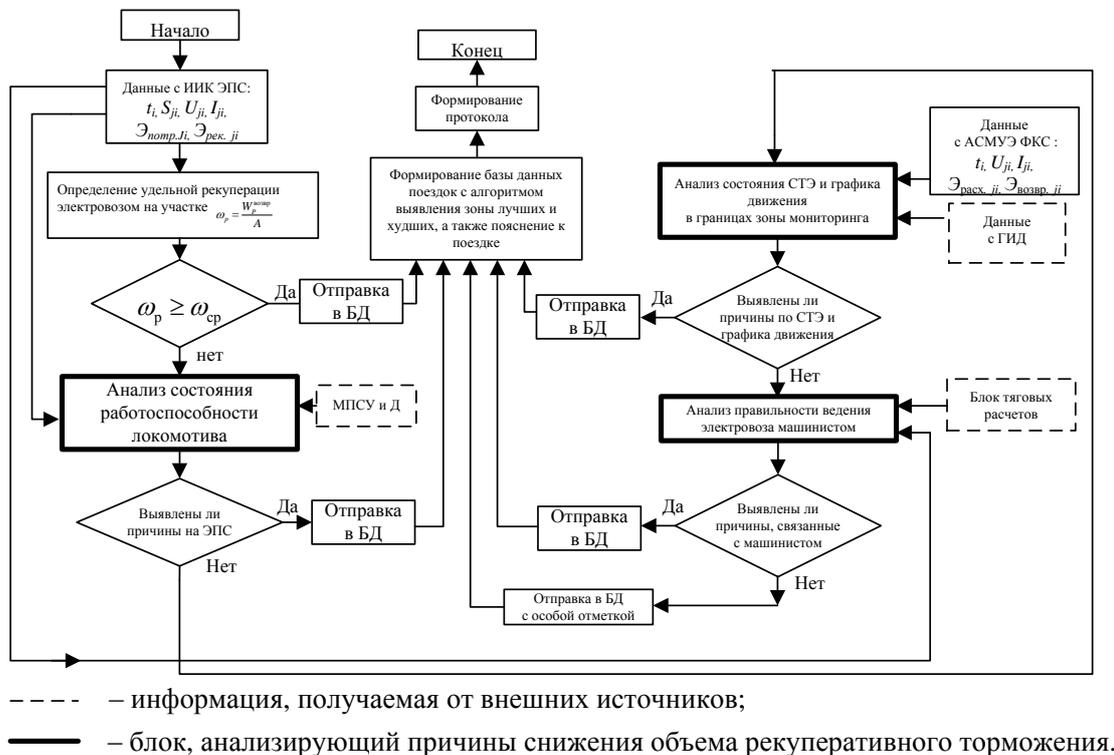


Рисунок 3 – Алгоритм определения причин невыполнения норм удельной рекуперации в границах произвольной зоны мониторинга

Далее на основании статистического анализа базы данных по поездкам определяется средняя удельная рекуперация $\omega_{ср}$ на участке мониторинга для данной серии локомотива, массы поезда и технической скорости. По результатам сравнения выявляются поездки, в которых уровень удельной рекуперации на участке ниже среднего, для дальнейшего выявления причин его снижения:

$$\omega_p < \omega_{ср}. \quad (2)$$

На данном этапе также необходимо проанализировать поездки, в которых уровень удельной рекуперации будет превышать максимальный уровень для параметров поезда, с целью исключения в дальнейшем недостоверных данных об уровне удельной рекуперации.

В случае отклонения фактического уровня от норм в меньшую сторону производится анализ причин невыполнения объемов рекуперативного торможения, связанных с неисправностью электроподвижного состава. Для этого используются системы регистрации параметров движения, например, такие как МСУЛ РПМ, устанавливаемые на электровозах серии 2ЭС6 и 2ЭС10. Указанные системы могут быть использованы в качестве источников информации о работоспособности основных узлов локомотива. Полученная информация о состоянии систем локомотива обрабатывается с целью исключения ошибок с помощью алгоритмов диагностики неисправности локомотива, основанных на теории графов и дополнительных алгоритмах фильтрации, например, фильтре Калмана – Бьюси [7]. Возможные неисправности, определяемые МСУЛ РПМ, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Возможные неисправности схемы рекуперативного торможения

Причина прекращения рекуперативного торможения
Аварийные токи ТЭД
Отключение ВАБ по ДР-ТД и БК
Нет тока ТЭД 1-2
Нет тока возбуждения ТЭД 1-2 СТПР 1000
Срабатывание защиты СТПР 1000 по входному напряжению
Отключение ВАБ по БК
Нет тока возбуждения ТЭД3-4 СТПР1000

В качестве примера выявления неисправности схемы рекуперативного торможения на электровозе 2ЭС6 представлена расшифровка картриджа РПМ с выявленной неисправностью (рисунок 4), где рекуперативное торможение было прервано в связи с появлением аварийных токов в тяговых двигателях.

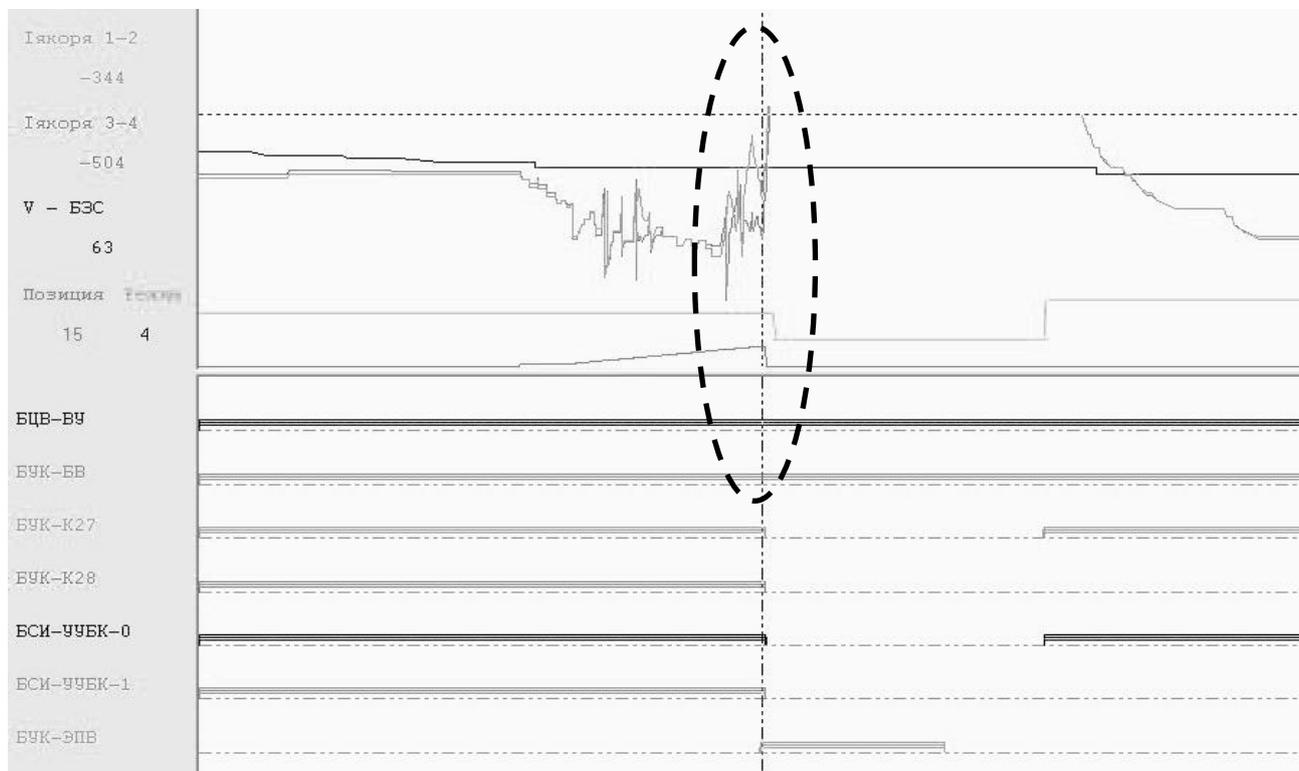


Рисунок 4 – Аварийные токи тяговых двигателей

Результатом работы блока алгоритма, связанного с анализом работы электроподвижного состава, является определение наличия или отсутствия причин, вызвавших снижение уровня

удельной рекуперации со стороны электроподвижного состава. Во втором случае следует проанализировать параметры работы системы тягового электроснабжения (СТЭ) и условия пропуска поездов на участке.

Основным критерием оценки условий, создаваемых системой тягового электроснабжения для рекуперации, является уровень напряжения в контактной сети. В таблице 2 приведены основные параметры системы тягового электроснабжения, формирующие условия для применения рекуперативного торможения. Наиболее благоприятными условиями со стороны СТЭ являются уровень напряжения на шинах тяговой подстанции, обеспечивающий возможность приема энергии рекуперации электроподвижным составом на данной МПЗ или смежной с ней; узловой двусторонний режим питания МПЗ; исправная работа приемников энергии рекуперации – выпрямительно-инверторных преобразователей (ВИПов), поглощающих устройств (ПУ) или накопителей электроэнергии (НЭЭ), оказывающая существенное влияние на уровень рекуперации [8]; отсутствие перерывов в движении поездов, обусловленных отказами устройств СТЭ, и др. В качестве дополнительных факторов, оказывающих влияние на условия применения рекуперативного торможения, следует рассматривать условия пропуска поездов по участку железной дороги, обусловленные организацией пакетного пропуска поездов, продолжительностью технологических окон и интервалом попутного следования [9].

Таблица 2 – Параметры и режимы работы системы тягового электроснабжения, формирующие условия для применения рекуперативного торможения

Благоприятные условия	Неблагоприятные условия
Напряжение в контактной сети $U_{к.с} \leq U_{х.х}$	Напряжение в контактной сети $U_{к.с} > U_{х.х}$
Режим питания межподстанционных зон – двусторонний, узловой, параллельный	Изменения в нормальной схеме питания и секционирования – отключение постов секционирования, пунктов параллельного соединения, создание консольной схемы питания и т. п.
Устойчивая работа приемников энергии рекуперации (ВИП, ПУ или НЭЭ)	Отказы в работе специальных приемников рекуперации
Поддержание заданного уровня напряжения на шинах смежных подстанций для обеспечения перетоков энергии рекуперации в соседние МПЗ	Отказ в работе системы тягового электроснабжения – снятие напряжения в контактной сети в аварийных режимах
Отсутствие отключений присоединений контактной сети	Технологические окна в работе, связанные со снятием напряжения в контактной сети

Для анализа уровня напряжения в контактной сети на участке со сниженной удельной рекуперацией используются данные с измерительных систем, установленных на фидерах контактной сети. График напряжения на токоприемнике электровоза 2ЭС6 представлен на рисунке 5. На графике регистрации параметров движения электровоза зафиксирован случай применения рекуперативного торможения, в результате которого напряжение на токоприемнике превышает 4 кВ, что приводит к срыву рекуперации ввиду отсутствия приемников рекуперации на межподстанционной зоне (на рисунке 6 выделено пунктиром). Следует отметить, что наличие приемников рекуперативного торможения в подобных случаях позволяет поддерживать уровень напряжения в контактной сети на уровне 3,7 – 3,8 кВ, что подтверждается результатами измерений.

На заключительном этапе работы алгоритма анализируются условия пропуска поездов на участке железной дороги с целью выявления случаев одиночного следования на межподстанционных зонах, задержек у входных сигналов и других неграфиковых остановок, приводящих к сбою в движении. Для оценки поездной обстановки на межподстанционной зоне может использоваться программный комплекс ГИД «Урал – ВНИИЖТ», позволяющий получить данные о расписании следования рассматриваемого поезда и других поездов как в графическом, так и табличном виде с указанием времени проследования станций и продол-

жительности остановок. Информация о данных следования поездов позволяет соотнести низкий уровень удельной рекуперации с условиями пропуска поездов на участке. В качестве примера можно привести поездку с низким уровнем удельной рекуперации, обусловленным одиночным следованием поезда с локомотивом ВЛ10 по перегону при отсутствии условий для применения рекуперативного торможения (рисунок 7 – выделено пунктиром).

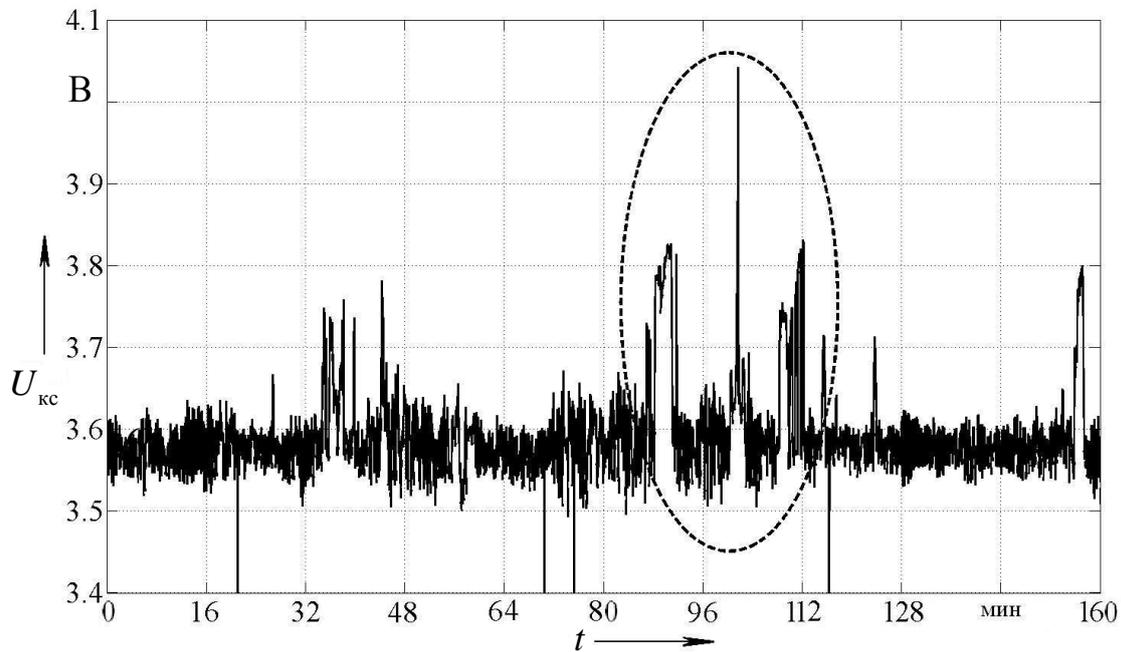


Рисунок 5 – График напряжения на токоприемнике 2ЭС6

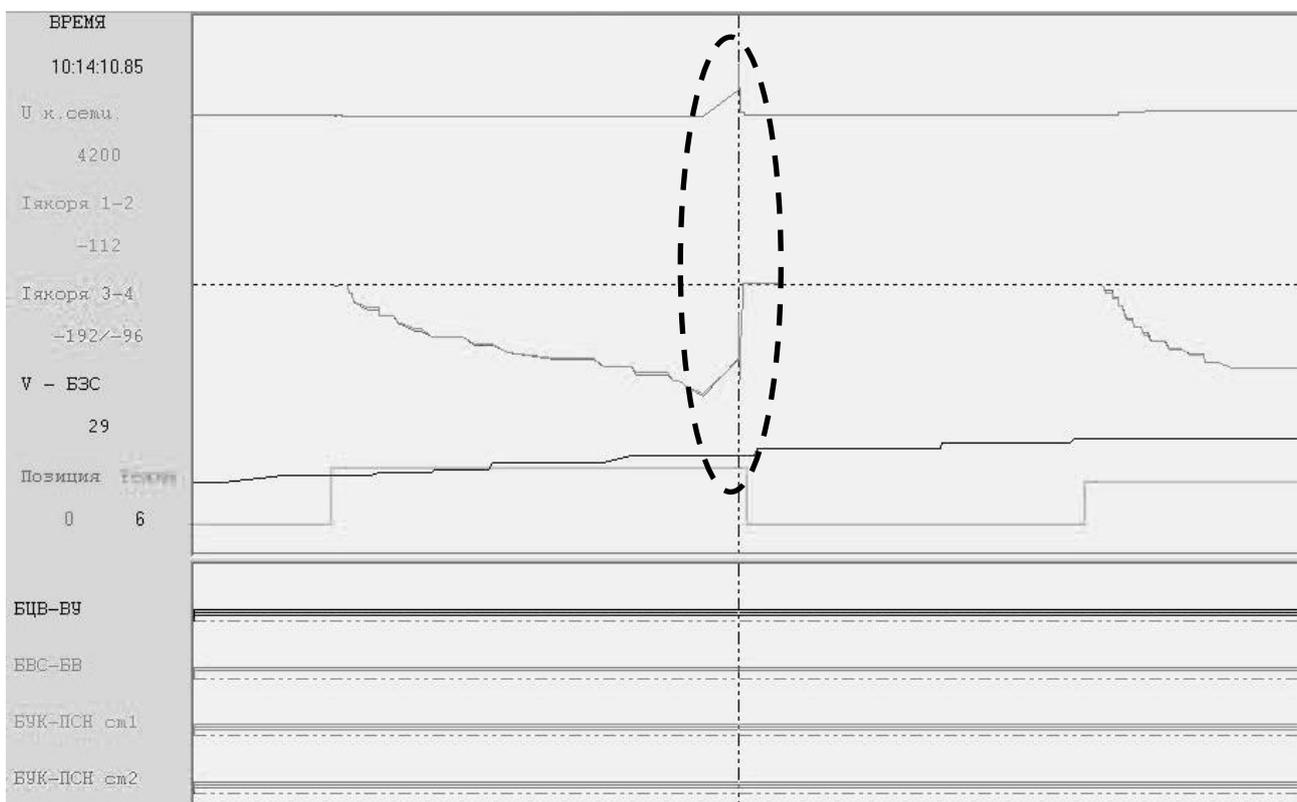


Рисунок 6 – Срыв рекуперативного торможения на электровозе 2ЭС6

Для выявления случаев неэффективного управления локомотивом или несоблюдения параметров режимной карты в алгоритм включен блок энергооптимальных тяговых расчетов, позволяющий производить расчеты для выбранного поезда. Вычисления в данном блоке могут производиться по уже известным алгоритмам [10], а сходимость энергооптимальных тяговых расчетов с данными по поездке будет определяться суммой относительных отклонений:

$$\Delta = \sum_i \frac{|W_i - W_i^*|}{W_i}, \quad (3)$$

где W_i – расход электрической энергии электровозом на i -м измерении, кВт·ч;

W_i^* – расход электроэнергии электровозом на i -м интервале моделирования, кВт·ч.

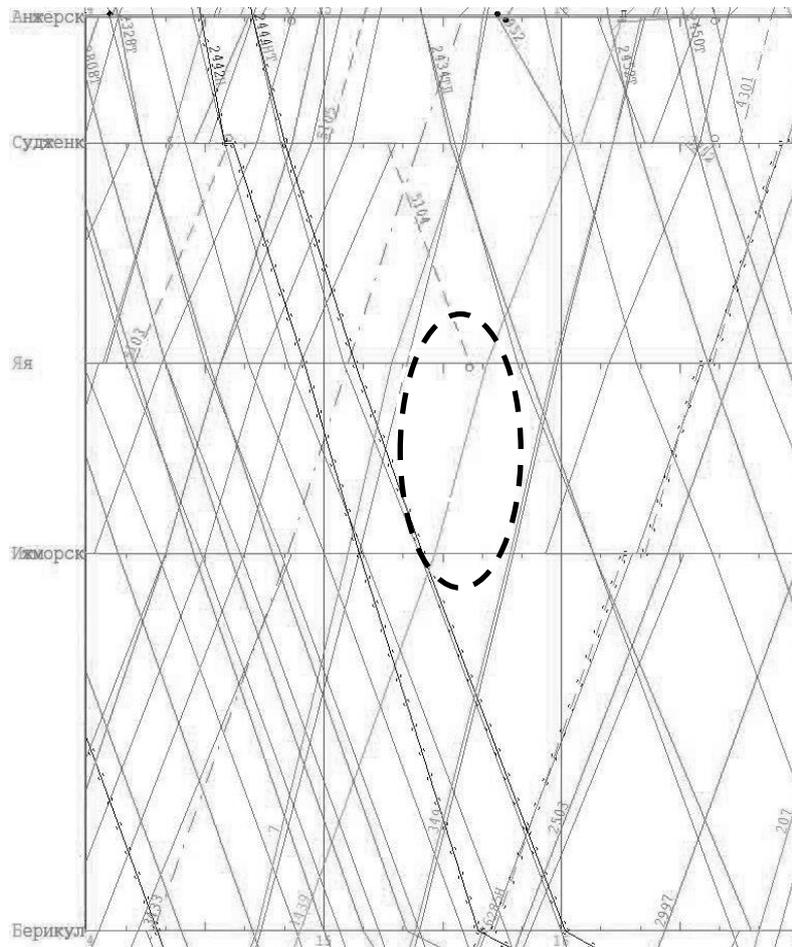


Рисунок 7 – Одиночное следование поезда с локомотивом ВЛ10 на межподстанционной зоне

Таким образом, анализ уровня удельной рекуперации, осуществляемый в настоящее время на основе статистических данных, содержит ряд недостатков. С целью повышения качества анализа предложена система, выполняющая мониторинг уровня удельной рекуперации на основе автоматизированных систем мониторинга и учета электроэнергии по присоединениям контактной сети тяговых подстанций и на электроподвижном составе, данных систем диагностики электроподвижного состава и информационных систем о следовании поездов по участку железной дороги. Представленный алгоритм анализа удельной рекуперации системы мониторинга имеет целью выявление причин снижения объемов рекуперативного торможения на произвольных участках и сокращение затрат времени на обработку и последующий анализ поездок персоналом эксплуатационных локомотивных депо и других структурных подразделений.

Список литературы

1. Давыдов, А. И. Анализ эффективности возврата электроэнергии в контактную сеть при рекуперативном торможении электроподвижного состава на основе данных маршрутов машинистов [Текст] / А. И. Давыдов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2011. – № 1. – С. 56 – 63.
2. Ли, В. Н. Анализ энергозатрат электроподвижным составом на Дальневосточной железной дороге [Текст] / В. Н. Ли, В. В. Трофимович, И. В. Игнатенко // Вестник Института тяги и подвижного состава / Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения. – Хабаровск. – 2012. – № 8. – С. 62 – 66.
3. Этапы реализации автоматизированной системы мониторинга энергоэффективности перевозочного процесса [Текст] / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров и др. // Железнодорожный транспорт. – № 3. – 2015. – С. 45 – 49.
4. Об утверждении методики планирования и нормирования энергии рекуперации на уровне эксплуатационного локомотивного депо: Распоряжение ОАО «РЖД». – 15 января 2013 №44р. – М.:ОАО «РЖД». – 14 с.
5. Методика измерения электроэнергии (мощности) на тяговом подвижном составе: Распоряжение ОАО «РЖД» от 16 ноября 2010 г. № 2339р. – М.:ОАО «РЖД». – 59 с.
6. Об утверждении Технологии учета расхода электроэнергии электроподвижным составом с использованием автоматизированных информационно-измерительных комплексов и Технических требований к автоматизированным информационно-измерительным комплексам учета электроэнергии на тяговом подвижном составе: Распоряжение ОАО «РЖД» от 31 декабря 2014 г. № 3226р. – М.:ОАО «РЖД». – 42 с.
7. Хазов, М. С. Диагностика питания электровоза [Текст] / М. С. Хазов // Мир транспорта. – 2010. – № 2. – С. 64 – 68
8. Вильгельм, А. С. Пути повышения энергоэффективности на малом кольце Московской железной дороги с использованием инверторов [Текст] / А. С. Вильгельм, В. Л. Незевак, В. Т. Черемисин // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2014. – № 3 (42). – С. 90 – 94.
9. Гателюк, О. В. Оптимизация графика движения поездов по критерию расхода электрической энергии на тягу на участках железных дорог в условиях применения рекуперативного торможения [Текст] / О. В. Гателюк, В. Л. Незевак, А. П. Шатохин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2015. – № 1 (21). – С. 59 – 69.
10. Мугинштейн, Л. А. Программно-технический комплекс для оптимизации режимов вождения поездов с целью сокращения эксплуатационных расходов [Текст] / Л. А. Мугинштейн, И. А. Ябко // Сб. тр. 2-й науч. практ. конф. «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте» / Московский ин-т инж. ж.-д. трансп. – М., 2001. – С. 3 – 30.

References

1. Davydov A. I. The analysis of the efficiency of the power regeneration by the regenerative braking of the electric rolling train on the basis of the engine-drivers' dates [Analiz jeffektivnosti vozvrata jelektrojenergii v kontaktnuju set' pri rekuperativnom tormozhenii jelektropodvizhnogo sostava na osnove dannyh marshrutov mashinistov]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2011, no. 1 (5), pp. 56 – 63.
2. Li V. N., Trofimovich V. V., Ignatenko I. V. The analysis of the power inputs of the electric rolling train on the Far Eastern railway [Analiz jenergozatrata jelektropodvizhnym sostavom na Dal'nevostochnoj zheleznoj doroge]. *Vestnik Instituta tiagi i podvizhnogo sostava – Bulletin of the traction and rolling train institute*, 2012, no. 8, pp. 62 – 66.
3. Cheremisin V. T., Nikiforov M. M., Ushakov S. J. The phases of the realization of the automated monitoring's system of the transportation process' energy efficiency [Jetapy realizacii

автоматизированной системы мониторинга энергоэффективности перевозочного процесса]. *Zheleznodorozhnyi transport – Railway transport*, 2015, no. 3, pp. 45 – 49.

4. *Ob utverzhdenii metodiki planirovaniya i normirovaniya jenerгии rekuperacii na urovne jekspluacionnogo lokomotivnogo depo. Rasporjazhenie OAO «RZhD ot 15.01.2015, №44p* (About statement of the methods of planning and regulation of the regeneration energy on the level of the operational locomotive depot. Instruction of OAO «RZhD» of 15.01.2013 no. 44r), Moscow, 2013, 14 p.

5. *Metodika izmereniya jelektroenergii (moshhnosti) na tjagovom podvizhnom sostave. Rasporjazhenie OAO «RZhD ot 16.11.2010, №2339p* (Methods of the electrical energy's measuring (capacity) on the traction rolling train. Instruction of OAO «RZhD» of 16.11.2010 no. 2339r), Moscow, 2013, 59 p.

6. *Ob utverzhdenii Tehnologii ucheta rashoda jelektroenergii jelektropodvizhnyh sostavom s ispol'zovaniem avtomatizirovannyh informacionno-izmeritel'nyh kompleksov i Tehnicheskikh trebovanij k avtomatizirovannym informacionno-izmeritel'nyh kompleksam ucheta jelektroenergii na tjagovom podvizhnom sostave. Rasporjazhenie OAO «RZhD ot 31.12.2014, №3226p* (About statement of the technology of the expenditure record of the electrical energy of the electric rolling train with the use of the automated information-measuring complexes and specifications to the automated information-measuring complexes of the electric energy costing on the traction rolling train. Instruction of OAO «RZhD» of 31.12.2014 no. 3226r), Moscow, 2013, 42 p.

7. Khazov, M. S. The diagnostic of the electric locomotive power supply [Diagnostika pitaniya jelektrovoza]. *Mir transporta – World of transport*, 2010, no. 2, pp.64 – 68.

8. Vil'gel'm A. S., Nezevak V. L., Cheremisin V. T. The ways of the efficient energy use's increase on the internal ring of the Moscow railway with the use of inverters [Puti povysheniya jenergojektivnosti na malom kol'ce Moskovskoj zheleznoj dorogi s ispol'zovaniem invertorov]. *Transport Urala – Transport of Ural*, 2014, no. 3 (42), pp. 90 – 94.

9. Gatelyuk O. V., Nezevak V. L., Shatohin A. P. The graphic time table's optimization by the criterion of the traction power consumption on the railway sections in the conditions of the regenerative braking's use [Optimizacija grafika dvizheniya poezdov po kriteriju rashoda jelektricheskoj jenerгии na tjagu na uchastkah zheleznyh dorog v uslovijah primeneniya rekuperativnogo tormozhenija]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2015, no. 1 (21), pp. 59 – 69.

10. Muginshteyn, L. A., Yabko, I. A. The program-technical complex for the optimization of the trains driving mode with the purpose of the maintenance charges' cutting down [Programmno-tehnicheskij kompleks dlja optimizacii rezhimov vozhdeniya poezdov s cel'ju sokrashheniya jekspluacionnyh rashodov]. *Sbornik trudov 2-j nauchno-prakticheskoy konferencii «Resursosberegajushhie tehnologii na zheleznodorozhnom transporte»* (Materials of the 2nd theoretical and practical conference «Resource saving technologies on the railway transport»). – Moscow, 2001, pp. 3 – 30.

УДК 621.332:621.315

Р. Б. Скоков, И. А. Кремлев, И. В. Тарабин, И. А. Терёхин

ОЦЕНКА УСЛОВИЙ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ ЗАЗЕМЛЕНИЯ НА РЕЛЬС УСТРОЙСТВ ТЯГОВОЙ СЕТИ В УСЛОВИЯХ ПРИМЕНЕНИЯ ИЗОЛИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ КАПИТАЛЬНОМ РЕМОНТЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОЛОТНА

В настоящее время при капитальном ремонте железнодорожного полотна используются новые материалы, которые вносят существенные изменения в электрическую структуру балластной призмы, существенно повышая переходное сопротивление «рельс – земля» и, как следствие, потенциал рельсов относительно удаленной земли. В статье предложена методика оценки условий электробезопасности заземления на рельс

устройств тяговой сети при капитальном ремонте железнодорожного полотна, подтверждена высокая опасность поражения электрическим током устройств, присоединенных к тяговому рельсу.

В последнее время при капитальном ремонте железнодорожного полотна применяются современные материалы, такие как геотекстиль и пеноплекс. В свою очередь они вносят существенные изменения в структуру балластной призмы, так как являются практически диэлектриками. Изменение электрической структуры балластной призмы существенно повышает переходное сопротивление «рельс – земля» и, как следствие, потенциал рельсов относительно удаленной земли. Экспериментально сотрудниками кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПС на участке Мынкуль – Карасук было установлено, что переходное сопротивление в случае использования нового типа полотна может повышаться до 45 – 150 Ом·км. Очевидно, что это приводит к существенному повышению потенциала рельса относительно удаленной земли. Как показывает эксплуатация, из-за наличия диэлектриков в структуре балластной призмы напряжения на рельсах достигают значения пробивных напряжений искровых промежутков, устанавливаемых в цепи заземления опор контактной сети, что приводит к их массовому выходу из работы. Это же может послужить причиной травмирования персонала, обслуживающего элементы тяговой сети.

Для определения потенциала рельсов в любой точке межподстанционной зоны необходимо учесть перераспределение тока в элементах рельсовой сети, т. е. в самом рельсе и сопротивлении перехода «рельс – земля». Рассмотрим вариант подпитки места короткого замыкания (КЗ) или нагрузки, находящейся между двумя тяговыми подстанциями. Схема замещения рельсовой сети в случае КЗ приведена на рисунке 1.

Рельсовая сеть является линией с распределенными параметрами, следовательно, в пределах межподстанционной зоны ее можно представить в виде четырех узлов – «ТПС1», «x», «КЗ», «ТПС2» и трех последовательно соединенных участков – «ТПС1 – x», «x – КЗ», «КЗ – ТПС2», каждый из которых является однородной линией с распределенными параметрами. Таким образом, рельсовая сеть будет характеризоваться продольным километренным сопротивлением рельсов z_p , переходным сопротивлением «рельс – земля» r_{p-3} , волновым сопротивлением z_b и километренным коэффициентом распространения γ рельсовой сети.

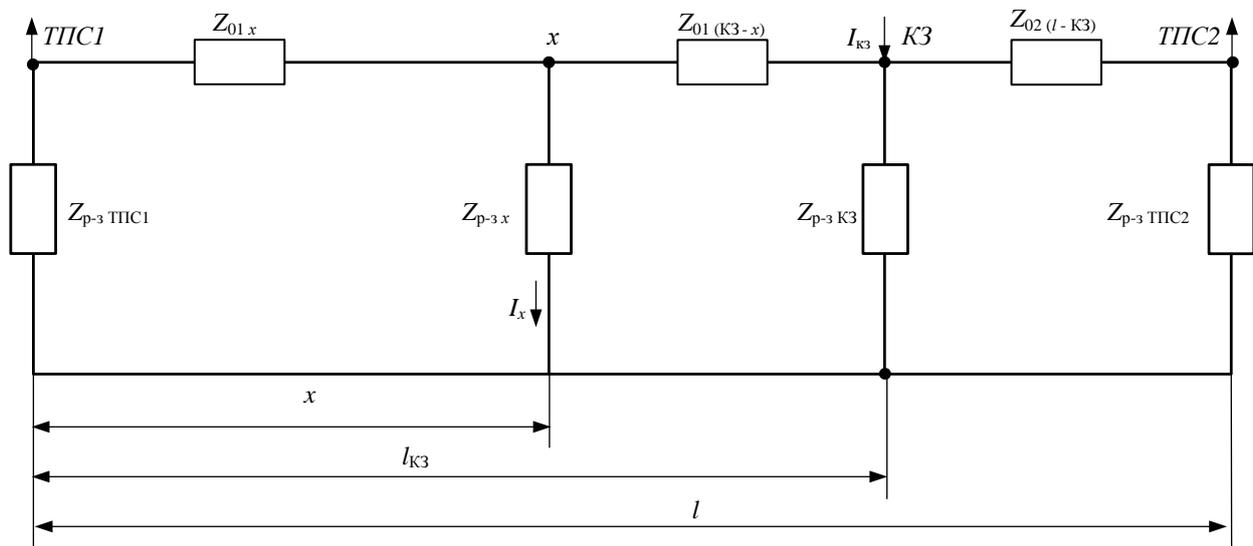


Рисунок 1 – Расчетная схема замещения рельсовой сети

Собственное продольное погонное сопротивление рельсов определяется многими факторами и может быть рассчитано по формуле:

$$z_p = \frac{r_{pa}}{2} + 0,05 - j0,144 \left[1,53 - 5,2 \frac{r_{pa}}{2} + \lg \left(\sqrt{k \cdot a_p} \sqrt{10^{-11} \sigma} \right) \right], \quad (1)$$

где r_{pa} – активное сопротивление рельса, Ом; σ – удельная проводимость земли Сим/м; a_p – расстояние между рельсами, см; k – коэффициент самоиндукции рельса

$$k = \frac{S}{2\pi}, \quad (2)$$

здесь S – периметр рельса, см.

Волновое сопротивление рельсовой цепи и километрический коэффициент определяются выражениями:

$$z_B = \sqrt{z_p r_{p-3}}; \quad (3)$$

$$\gamma = \sqrt{z_p / r_{p-3}}. \quad (3a)$$

Для составления схемы замещения рельсовой сети можно принять, что в каждый момент времени потенциал в рассматриваемой точке остается неизменным, т. е. не зависит от времени. Тогда каждый участок рельсовой линии можно представить в виде четырехполюсников. При расчете потенциалов требуется учитывать и входное сопротивление контура заземления подстанции. Для определения максимальных потенциалов необходимо учесть максимально возможные (допустимые) значения сопротивления растеканию контура заземления подстанции.

Параметры данной схемы можно определить по формулам:

$$Z_{01.x} = z_B \operatorname{sh}(\gamma x); \quad (4)$$

$$Z_{01.(K3-x)} = z_B \operatorname{sh}[\gamma(l_{K3} - x)]; \quad (5)$$

$$Z_{02.(l-K3)} = z_B \operatorname{sh}[\gamma(l - l_{K3})]; \quad (6)$$

$$Z_{p-3 \text{ ППС}} = \frac{Z_{3y} z_B \frac{\operatorname{sh}(\gamma x)}{\operatorname{ch}(\gamma x) - 1}}{Z_{3y} + z_B \frac{\operatorname{sh}(\gamma x)}{\operatorname{ch}(\gamma x) - 1}}, \quad (7)$$

где Z_{3y} – сопротивление растеканию заземляющего устройства тяговой подстанции, Ом;

$$Z_{p-3 \text{ ППС}2} = \frac{Z_{3y} + z_B \frac{\operatorname{sh}[\gamma(l - l_{K3})]}{\operatorname{ch}[\gamma(l - l_{K3})] - 1}}{Z_{3y} + z_B \frac{\operatorname{sh}[\gamma(l - l_{K3})]}{\operatorname{ch}[\gamma(l - l_{K3})] - 1}}; \quad (8)$$

$$Z_{p-3 x} = \frac{z_B \frac{\operatorname{sh}(\gamma x)}{\operatorname{ch}(\gamma x) - 1} \cdot \frac{\operatorname{sh}[\gamma(l_{K3} - x)]}{\operatorname{ch}[\gamma(l_{K3} - x)] - 1}}{\frac{\operatorname{sh}(\gamma x)}{\operatorname{ch}(\gamma x) - 1} + \frac{\operatorname{sh}[\gamma(l_{K3} - x)]}{\operatorname{ch}[\gamma(l_{K3} - x)] - 1}}; \quad (9)$$

$$Z_{p-3 K3} = \frac{z_B \frac{\operatorname{sh}(\gamma l_{K3})}{\operatorname{ch}(\gamma l_{K3}) - 1} \cdot \frac{\operatorname{sh}[\gamma(l - l_{K3})]}{\operatorname{ch}[\gamma(l - l_{K3})] - 1}}{\frac{\operatorname{sh}(\gamma l_{K3})}{\operatorname{ch}(\gamma l_{K3}) - 1} + \frac{\operatorname{sh}[\gamma(l - l_{K3})]}{\operatorname{ch}[\gamma(l - l_{K3})] - 1}}. \quad (10)$$

Система уравнений, составленная на основании расчетной схемы (см. рисунок 1), позволяет определить значение тока, стекающего с рельсов в землю в точке с координатой x , а зная приведенное значение полного сопротивления перехода «рельс – земля» в точке x (т. е. Z_{p-3x}), можно определить потенциал рельса относительно удаленной земли в рассматриваемой точке x по формуле:

$$\phi_{p-3x} = I_x Z_{p-3x}. \quad (11)$$

При исследовании потенциала рельсовой сети наибольший интерес представляет картина изменения потенциала в пределах межподстанционной зоны и огибающая максимальных потенциалов для нормального нагрузочного режима и режима короткого замыкания на рельс. При этом целесообразно учитывать различные значения переходного сопротивления для учета влияния изменения структуры балластной призмы на процесс стекания тока в землю. В результате расчета по изложенной выше методике были получены кривые изменения потенциала рельсов на межподстанционной зоне, некоторые из этих кривых для режима нагрузки (на расстоянии 25 км от ТПС1) приведены на рисунке 2.

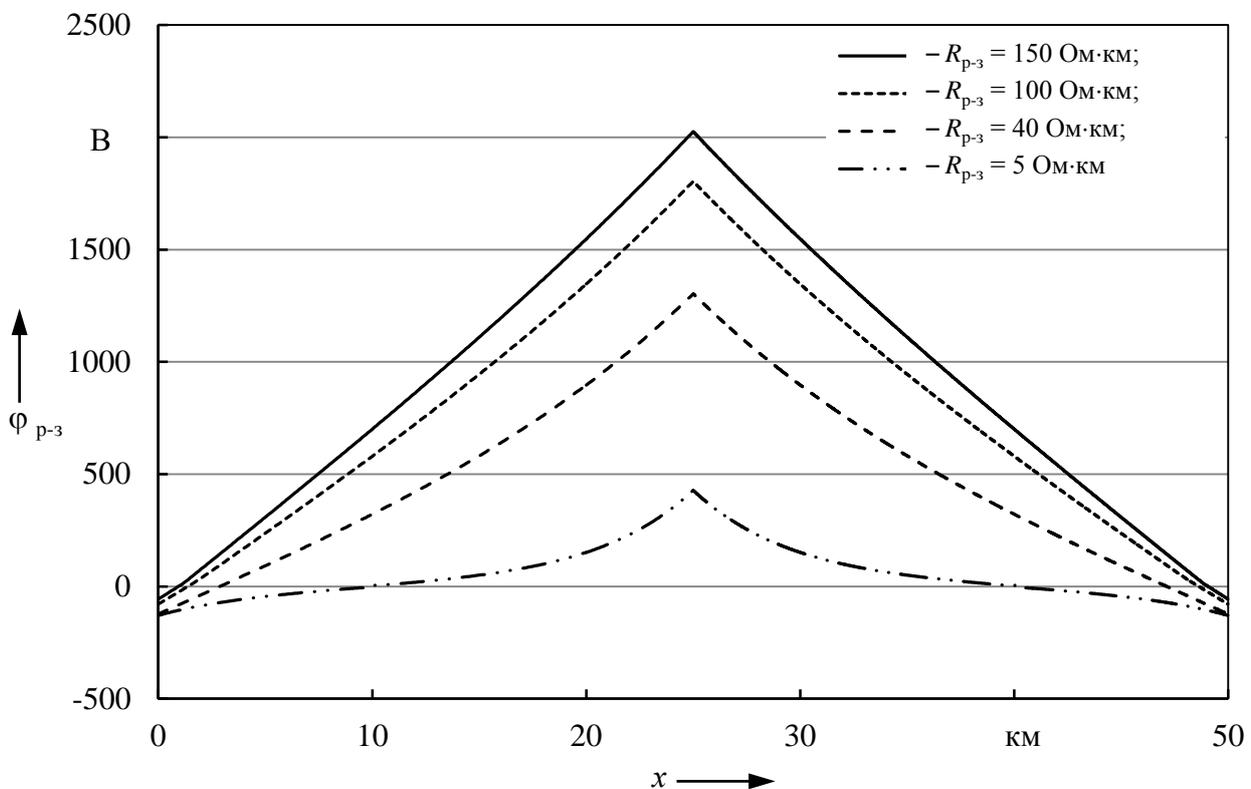


Рисунок 2 – Распределение потенциала рельсов на межподстанционной зоне при токе электровоза 500 А (электровоз расположен в середине зоны)

Кривые изменения максимальных потенциалов при различных переходных сопротивлениях «рельс – земля» для режимов нагрузки и короткого замыкания на рельс приведены на рисунках 3 и 4 соответственно.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие основные выводы:

- 1) переходное сопротивление «рельс – земля» оказывает существенное влияние на величину потенциалов, возникающих на элементах обратной цепи протекания тока;
- 2) рост сопротивления «рельс – земля», связанный с сезонными колебаниями удельного сопротивления грунта, а также в последнее время с капитальной реконструкцией земляного полотна, приводит к значительному удлинению (до нескольких десятков километров) зоны, на протяжении которой потенциал может достигать опасного для жизни человека значения;

3) в режиме замыкания на рельс (т. е. при металлическом коротком замыкании) практически всегда в рельсовой сети будут возникать потенциалы, превышающие допустимые значения на протяжении нескольких километров в обе стороны от точки КЗ, что приводит к выносу опасного потенциала на все металлические конструкции, соединенные с рельсом, и поэтому требует пересмотра принципов заземления конструкций [1 – 4].

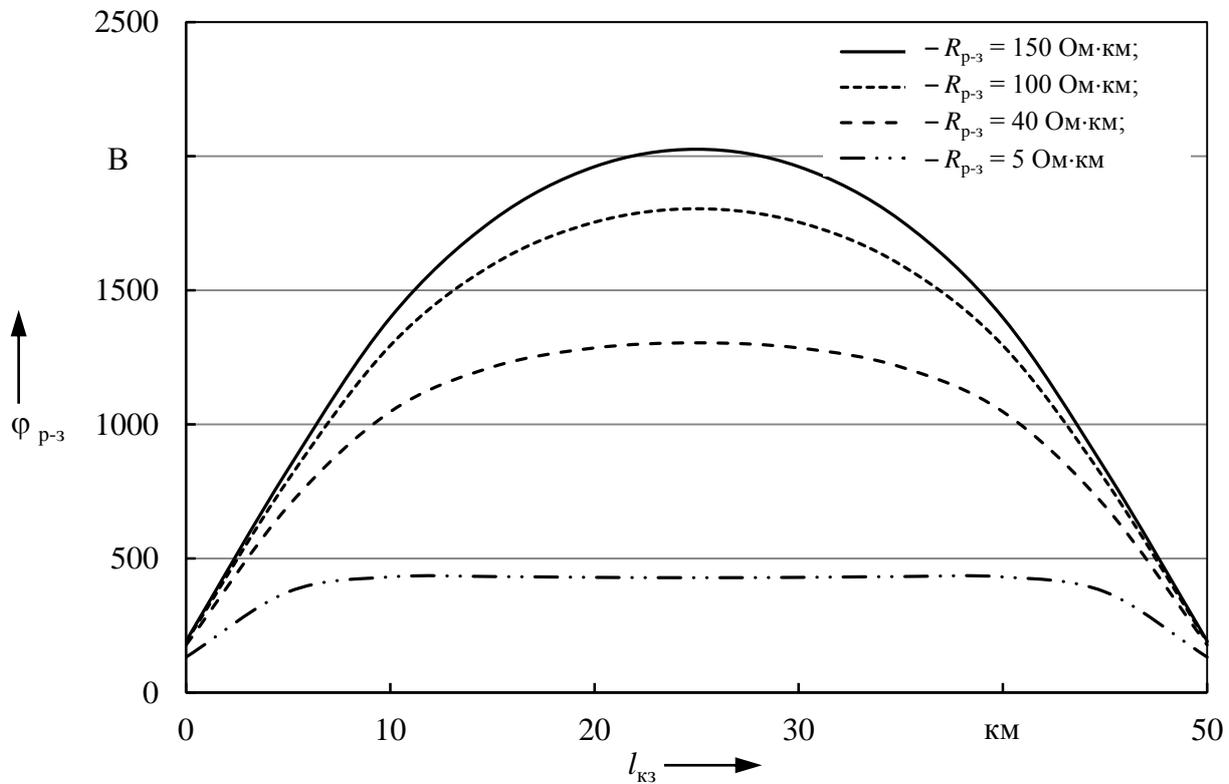


Рисунок 3 – Огибающие максимальных потенциалов в режиме нагрузки ($I_0 = 500$ А)

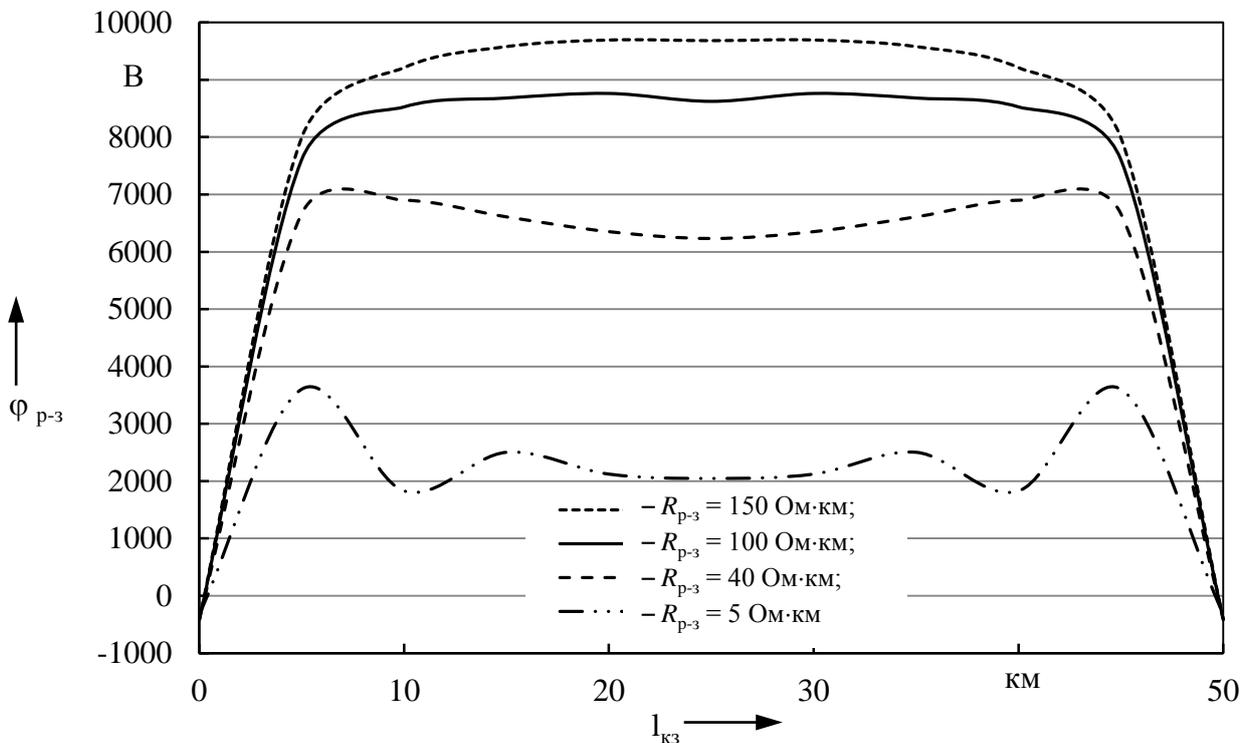


Рисунок 4 – Огибающие максимальных потенциалов в режиме КЗ

Список литературы

1. Терёхин И. А. К вопросу электробезопасности при разземлении опор контактной сети [Текст] / И. А. Терёхин, И. А. Кремлев // Успехи современного естествознания. – 2012. – № 6. – С. 57 – 58.
2. Кремлев И. А. Защита фидеров контактной сети переменного тока без заземления опор на рельсы. Энерго- и ресурсосбережение в структурных подразделениях Западно-Сибирской железной дороги [Текст] / И. А. Кремлев, Г. С. Магай, Р. Б. Скоков // Материалы науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2008. – 472 – 475.
3. Кремлев И. А. Обеспечение эксплуатации контактной сети переменного тока без заземления опор на рельсы [Текст] / И. А. Кремлев, Г. С. Магай, Р. Б. Скоков / Электроснабжение железных дорог / Сб. научн. тр. «Электроснабжение железных дорог» / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010.
4. Квашук В. А. Новая защита контактной сети: опыт Западно-Сибирской дороги / В. А. Квашук, В. Ф. Степанов, И. А. Кремлев // Локомотив. – 2010. – № 11. – С. 44, 45.

References

1. Terekhin I. A., Kremlev I. A. To an electrical safety question at a not grounded supports of a contact network [K voprosu elektrobezopasnosti pri razzemlenii opor kontaktnoi seti]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniia – The successes of modern science*, 2012, no. 6 pp. 57 – 58.
2. Kremlev I. A., Magay G. S., Skokov R. B. Protection feeders contact AC power without the support earth on track. Energy and resource efficiency in the structural units of the West – Siberian Railway [Zashchita fiderov kontaktnoi seti peremennogo toka bez zazemleniia opor na rel'sy. Energo-i resursosberezhenie v strukturnykh podrazdeleniakh Zapadno-Sibirskoi zheleznoi dorogi]. *Materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii* (Proceedings of the conference). – Omsk, 2008, pp. 472 – 475
4. Kvaschuk V. A, Stepanov V. F., Kremlev I. A. New protection catenary: the experience of the West Siberian road [Novaia zashchita kontaktnoi seti: opyt Zapadno-Sibirskoi dorogi]. *Lokomotiv – Locomotive*, 2010, no. 11, pp. 44 – 45.

УДК 621.331:621.311

В. Т. Черемисин, С. Г. Истомина

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИЧИН УЩЕРБА И ОТВЕТСТВЕННЫХ ЗА НЕГО УЧАСТНИКОВ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА ПРИ НЕВЫПОЛНЕНИИ ЛОКОМОТИВНОЙ БРИГАДОЙ УДЕЛЬНОЙ НОРМЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПОЕЗДКУ

В статье рассмотрены мероприятия по повышению энергоэффективности перевозочного процесса. Обоснована необходимость создания автоматизированной системы мониторинга энергетической эффективности работы электроподвижного состава. Приведен алгоритм, позволяющий определять причины невыполнения локомотивной бригадой удельной нормы электроэнергии на поездку. Разработаны формы протоколов, отражающих информацию по потерям электроэнергии по итогам поездки с указанием времени и места их возникновения.

В соответствии с Энергетической стратегией холдинга «Российские железные дороги» на период до 2015 года и на перспективу до 2030 года одной из приоритетных задач компании ОАО «РЖД» является значительное повышение энергетической эффективности тяги поездов. Так, в целом по ОАО «РЖД» прогнозируемое снижение удельного расхода тягово-энергетических ресурсов на тягу поездов к уровню 2010 г. должно составить к 2020 г. 2,8 – 4,3 %, к 2030 г. – 6,0 – 6,3 % [1].

Для решения этой комплексной задачи компанией ежегодно разрабатываются и реализуются мероприятия по энергосбережению и повышению энергетической эффективности. В частности, на 2015 г. для повышения энергоэффективности перевозочного процесса были определены следующие мероприятия:

- внедрение энергооптимальных графиков движения грузовых поездов;
- внедрение энергооптимальных расписаний движения пассажирских поездов;
- внедрение систем автоведения на тяговом подвижном составе;
- повышение коэффициента участковой скорости;
- повышение среднего веса грузовых поездов, в том числе за счет увеличения доли тяжеловесных грузовых поездов;
- снижение доли порожнего пробега грузовых вагонов и одиночного следования локомотивов;
- снижение количества неграфиковых остановок грузовых поездов, задержек у запрещающих сигналов;
- сокращение нагонов пассажирских поездов;
- повышение квалификации локомотивных бригад за счет обучения рациональным режимам вождения поездов;
- модернизация локомотивного оборудования системы взаимодействия АСУЖТ с тяговым подвижным составом посредством цифровой радиосвязи на электровозах;
- внедрение автомашиниста электротяги с регистратором параметров движения и системой информирования машиниста для организации движения по жестким ниткам графика, грузового движения.

В условиях проведения перечисленных мероприятий особую актуальность приобретает создание автоматизированной системы мониторинга энергетической эффективности работы электроподвижного состава, которая позволила бы выявлять места и случаи неэффективного использования электрической энергии и принимать управляющие воздействия (организационно-технические мероприятия, ремонт, внедрение новых технологий и др.) по повышению энергетической эффективности организации движения поездов [2].

Данная система должна иметь следующие основные функции:

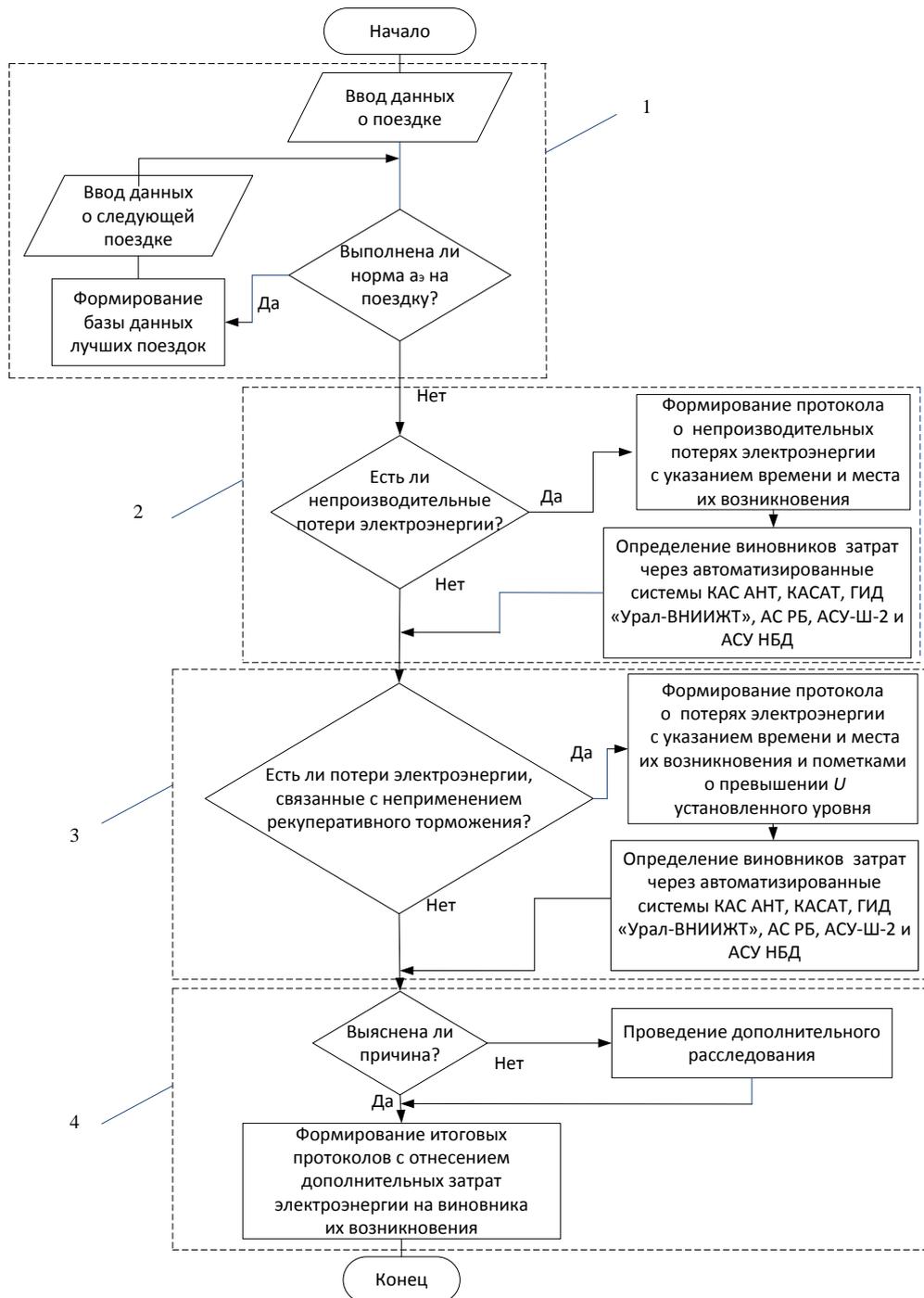
- автоматическое измерение и запись параметров электропотребления и рекуперации ЭПС с заданным интервалом и привязкой к глобальному времени и географическим координатам;
- автоматизированная идентификация машиниста с привязкой табельного номера к результатам измерений;
- автоматическая передача результатов измерений на сервер.

Локомотивная бригада (машинист и помощник машиниста) – это те специалисты, деятельность которых в первую очередь будет подвержена контролю по рациональному использованию ТЭР при создании системы мониторинга энергетической эффективности электроподвижного состава. В случае выявления невыполнения удельной нормы электрической энергии на поездку именно локомотивной бригаде, как правило, будут предъявляться претензии по нерациональному к использованию ТЭР. В связи с этим не менее актуальным является и вопрос по разработке механизма отнесения дополнительных энергозатрат на участников перевозочного процесса.

Для решения описанной проблемы авторами предлагается алгоритм определения причин невыполнения локомотивной бригадой удельной нормы электрической энергии на поездку с выявлением ответственного за нерациональное использование ТЭР (рисунок). Тело алгоритма условно можно разбить на четыре функциональных блока.

В блоке 1 выполняется ввод данных о поездке (дата и время приемки и сдачи ЭПС, табельный номер машиниста, номер ЭПС, номер и вес поезда, удельный расход электроэнергии, удельная рекуперация). Далее проверяется выполнение локомотивной бригадой удельной нормы электрической энергии a , на поездку. В случае выполнения нормы результаты поездки попадают в базу данных лучших поездок для анализа и обобщения передового опы-

та, а также для поощрения локомотивных бригад. После этого вводятся данные о следующей поездке. Далее в случае невыполнения удельной нормы электрической энергии осуществляется поиск причин ее невыполнения.



Блок-схема процесса определения причин невыполнения локомотивной бригадой удельной нормы электрической энергии на поездку с выявлением ответственного за нерациональное использование ТЭР

В блоке 2 определяется величина значения непроизводительных потерь электрической энергии. В случае их наличия происходит формирование протоколов о непроизводительных потерях электроэнергии с указанием времени и места их возникновения (таблицы 1 и 2). В данном случае под непроизводительными потерями понимаются потери электроэнергии в режиме простоя на станционных путях в ожидании работы, у запрещающих сигналов, на неграфиковые остановки, при проследовании мест с ограничением скорости, при нагоне графикового времени [3].

Таблица 1 – Форма протокола о непроизводительных потерях электрической энергии при неграфиковых остановках, остановках у запрещающих сигналов светофоров и в режиме простоя на станционных путях в ожидании работы

Порядковый номер момента возникновения непроизводительных потерь	Номер поезда	Табельный номер машиниста	Дата и время возникновения непроизводительного расхода		Координата		Непроизводительные потери электроэнергии, кВт·ч	Составляющая удельного расхода на непроизводительные потери электрической энергии, кВт·ч/10·ткм брутто
			начало	окончание	φ	λ		
1	<i>P</i>	<i>M</i>	$t_{н1}$	$t_{к1}$	φ_1	λ_1	$W_{нгр1}$	$a_{нгр1}$
2			$t_{н2}$	$t_{к2}$	φ_2	λ_2	$W_{нгр2}$	$a_{нгр2}$
<i>i</i>			$t_{ни}$	$t_{ки}$	φ_i	λ_i	$W_{нгри}$	$a_{нгри}$

Таблица 2 – Форма протокола о непроизводительных потерях электрической энергии при проследовании мест с ограничением скорости движения и нагоне графикового времени

Порядковый номер момента возникновения непроизводительных потерь	Номер поезда	Табельный номер машиниста	Дата и время возникновения непроизводительного расхода		Начальная координата		Конечная координата		Непроизводительные потери электроэнергии, кВт·ч	Составляющая удельного расхода на непроизводительные потери электрической энергии, кВт·ч/10·ткм брутто
			начало	окончание	φ	λ	φ	λ		
1	<i>P</i>	<i>M</i>	$t_{н1}$	$t_{к1}$	$\varphi_{н1}$	$\lambda_{н1}$	$\varphi_{к1}$	$\lambda_{к1}$	$W_{огр1}$	$a_{огр1}$
2			$t_{н2}$	$t_{к2}$	$\varphi_{н2}$	$\lambda_{н2}$	$\varphi_{к2}$	$\lambda_{к2}$	$W_{огр2}$	$a_{огр2}$
<i>i</i>			$t_{ни}$	$t_{ки}$	$\varphi_{ни}$	$\lambda_{ни}$	$\varphi_{ки}$	$\lambda_{ки}$	$W_{огри}$	$a_{огри}$

Далее определяется причастный к этим потерям функциональный филиал ОАО «РЖД» при использовании автоматизированных систем КАС АНТ, КАСАТ, АС РБ, АСУ НБД, АСУ-Ш-2 и ГИД «Урал-ВНИИЖТ».

Учет, контроль за устранением отказов в работе технических средств и анализ их надежности осуществляется с использованием Комплексной автоматизированной системы учета, контроля, устранения отказов в работе технических средств и анализа их надежности (КАС АНТ).

На основании первичной информации об инциденте, поступившей из системы ГИД «Урал-ВНИИЖТ», в системе КАС АНТ формируется оповещение об отказе в работе технического средства. Оповещение содержит следующую обязательную информацию: место (наименование станции, перегона) и время возникновения отказа в работе технического средства, характер проявления отказа в работе технического средства, причастная к данному случаю отказа служба, структурное подразделение функционального филиала, линейное подразделение, которые первоначально определяются диспетчером поездным, дежурным по станции при внесении информации в график исполненного движения.

Учету в системе КАС АНТ подлежат все отказы в работе технических средств, в том числе приведшие к нарушениям безопасности движения в поездной и маневровой работе.

К техническим средствам, отказы в работе которых подлежат учёту в автоматизированной системе КАС АНТ, относятся следующие:

а) технические средства, отказы в работе которых подлежат обязательному учету:

верхнее строение пути, земляное полотно, искусственные сооружения и железнодорожные переезды;

железнодорожный подвижной состав, специальный железнодорожный подвижной состав, обращающиеся в инфраструктуре ОАО «РЖД»;

устройства и линии электроснабжения;

устройства, средства, сооружения и системы железнодорожной технологической электросвязи;

устройства, средства и системы железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ);

устройства автоматического контроля технического состояния подвижного состава на ходу поезда;

устройство контроля схода подвижного состава (УКСПС);

вычислительная техника, периферийные устройства, сеть передачи данных, общесистемное и прикладное программное обеспечение, используемые в информационных системах при организации перевозочного процесса;

диагностическое оборудование мобильных средств контроля (вагон-путеизмеритель, вагон-дефектоскоп, мобильная лаборатория дефектоскопии, габаритообследовательская станция и др.);

автоматизированная система коммерческого осмотра поездов и вагонов (АСКО ПВ);

вагонные весы, находящиеся на балансе структурных подразделений Центральной дирекции по управлению терминально-складским комплексом или структурных подразделений Управления коммерческой работы и нормативного обеспечения в сфере грузовых перевозок Центральной дирекции управления движением;

пассажиры платформы, пешеходные мосты и настилы;

б) технические средства, отказы в работе которых подлежат учету только в случаях их влияния на перевозочный процесс:

здания, сооружения, устройства станционного хозяйства, грузовые платформы;

машины и механизмы;

средства крепления грузов;

устройства и коммуникации промышленного телевизионного обеспечения;

устройства и коммуникации теплоснабжения, водоснабжения и водоотведения.

В зависимости от последствий отказов в работе технических средств в системе КАСАНТ вводится их следующая классификация по категориям:

отказы 1-й категории – отказы, приведшие к задержке пассажирского, пригородного или грузового поезда на перегоне (станции) на 1 ч и более либо приведшие к транспортным происшествиям или событиям, связанным с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта;

отказы 2-й категории – отказы, приведшие к задержке пассажирского, пригородного или грузового поезда на перегоне (станции) продолжительностью от 6 мин до 1 ч;

отказы 3-й категории – отказы, не имеющие последствий, относящихся к отказам 1-й и 2-й категории (учет таких отказов производится первоначально в рамках автоматизированных систем управления хозяйством) [4].

Учет и классификация инцидентов по причине технологических нарушений осуществляются с использованием комплексной автоматизированной системы учета, расследования и анализа случаев технологических нарушений КАСАТ.

На основании первичной информации об инциденте, поступившей из системы ГИД «Урал-ВНИИЖТ», в системе КАСАТ формируется оповещение о технологическом нарушении. Оповещение должно содержать следующую обязательную информацию: место (наименование станции, перегона), время возникновения технологического нарушения, наименование технологического нарушения, причастное к данному случаю технологическое нарушение структурное подразделение функционального филиала, служба или линейное подразделение, которое первоначально определяется дежурно-диспетчерским аппаратом дирекции управления движением [5].

В зависимости от степени тяжести последствий и влияния на график движения поездов инциденты вследствие технологических нарушений классифицируются

как технологические нарушения первой категории в случае задержки пассажирского или пригородного поезда на 6 мин и более, а также поездов других категорий на 60 мин и более либо приведшие к транспортным происшествиям или событиям, связанным с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта;

технологические нарушения второй категории в случаях задержки грузового поезда от 15 до 60 мин относительно нормативного (вариантного) графика движения поездов, превышения перегонного времени хода поезда любой категории, кроме пассажирских и пригородных, от 15 до 60 мин, а также задержки поезда любой категории более 1 мин у запрещающего показания входного сигнала станции [6].

По характеру причин технологические нарушения классифицируются как технического характера – неправильное пользование железнодорожной техникой при ее нормальной работе;

технологического характера – нарушение технологии перевозочного процесса, порядка производства работ по текущему содержанию, ремонту и реконструкции (модернизации) объектов инфраструктуры и подвижного состава из-за невыполнения или ненадлежащего выполнения технологических операций, не вызвавшее отказа в работе технических средств ОАО «РЖД»;

особая технологическая необходимость;

внешнее воздействие – случаи задержек поездов, вызванные стихийными бедствиями, актами незаконного вмешательства в деятельность железнодорожного транспорта, умышленными или неправильными действиями организаций, не входящих в состав ОАО «РЖД», или лиц, не являющихся работниками ОАО «РЖД», в результате которых не было нарушено работоспособное состояние железнодорожной техники [7].

Учет транспортных и иных происшествий, связанных с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта, осуществляется в автоматизированной системе управления безопасностью движения АС РБ.

Учету в системе АС РБ подлежат

транспортные происшествия и события, указанные в источнике [8];

нарушения правил перевозки опасных грузов, указанные в классификаторе нарушений безопасности перевозок опасных грузов на железных дорогах;

дорожно-транспортные происшествия на железнодорожных переездах, не относящиеся к транспортным происшествиям, указанным в работе [9];

изломы рельсов, указанные в классификаторе дефектов рельсов.

Служебное расследование, учет и анализ сбоев в работе устройств автоматической локомотивной сигнализации (АЛС) (автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа (АЛСН), автоматической многозначной локомотивной сигнализации (АЛС-ЕН) и систем автоматического управления торможением поезда (САУТ)) осуществляются в автоматизированных системах АСУ-НБД и АСУ-Ш-2. Подробное описание функционирования данных автоматизированных систем приведено в источнике [10].

В блоке 3 определяются потери электрической энергии, связанные с неприменением рекуперативного торможения. В случае их наличия формируется протокол о потерях электрической энергии, обусловленных невыполнением удельной нормы рекуперированной электроэнергии в границах межподстанционных зон (МПЗ), с указанием времени и места их возникновения и пометками о превышении напряжения выше установленного уровня (таблица 3).

Таблица 3 – Форма протокола о потерях электрической энергии, обусловленных невыполнением удельной нормы рекуперированной электроэнергии в границах межподстанционных зон

МПЗ	Дата и время		Пометка о превышении напряжения выше установленного уровня	Потери электрической энергии, кВт·ч	Составляющая удельного расхода на потери электрической энергии, кВт·ч/10·ткм брутто
	вход на МПЗ	выход с МПЗ			
МПЗ ₁	$t_{н1}$	$t_{к1}$		$W_{пр1}$	$a_{пр1}$
МПЗ ₂	$t_{н2}$	$t_{к2}$		$W_{пр2}$	$a_{пр2}$
МПЗ _i	$t_{ни}$	$t_{ки}$		$W_{прi}$	$a_{прi}$

Далее определяется причастный к этим потерям функциональный филиал ОАО «РЖД» при использовании автоматизированных систем КАС АНТ, КАСАТ, АС РБ, АСУ НБД, АСУ-Ш-2.

В 4 блоке определяется, была ли выяснена причина невыполнения локомотивной бригадой удельной нормы электрической энергии на поездку. В случае если причина все же не была найдена, назначается проведение дополнительного расследования. В конечном итоге формируется итоговый протокол с отнесением дополнительных затрат электроэнергии на виновника их возникновения (таблица 4).

Таблица 4 – Форма протокола по отнесению ущерба от непроизводительных потерь электрической энергии на причастные функциональные филиалы ОАО «РЖД»

Наименование функционального филиала	Неграфиковые остановки		Задержки у запрещающего сигнала		Временные ограничения скорости		Простой в ожидании работы		Простой на путях отстоя в ожидании ремонта, модернизации или ТО		Нагон графикового времени	
	количество потерь электроэнергии, кВт·ч	непроизводительные потери на ущерб, руб.	количество потерь электроэнергии, кВт·ч	непроизводительные потери на ущерб, руб.	количество потерь электроэнергии, кВт·ч	непроизводительные потери на ущерб, руб.	количество потерь электроэнергии, кВт·ч	непроизводительные потери на ущерб, руб.	количество потерь электроэнергии, кВт·ч	непроизводительные потери на ущерб, руб.	количество потерь электроэнергии, кВт·ч	непроизводительные потери на ущерб, руб.
ЦДИ	В											
	П											
	Ш											
	Э											
ЦД	ДПМ											
	ДИЦДМ											
ЦТ	Д											
	М											
	ЦТ											
	ЦТР											
	ЦДРП											
	ЦСС											
	ГВЦ											
	ЦДМВ											
	ЦДПО											
	ДОСС											
	ФПК											
	ВРК1											
	ВРК2											
ВРК3												
Сторонние организации												

В таблице 4 к основным функциональным филиалам относятся: ЦДИ – Центральная дирекция инфраструктуры (службы: В – вагонного хозяйства, П – пути и сооружений, Ш – автоматики и телемеханики, Э – электрификации и электроснабжения, ДПМ – механизации, ДИЦДМ – диагностики и мониторинга), ЦД – центральная дирекция управления движением (службы: Д – движения, М – управления терминально-складским комплексом), ЦТ – дирекция тяги, ЦТР – дирекция по ремонту тягового подвижного состава, ЦДРП – Центральная дирекция по ремонту пути, ЦСС – Центральная станция связи, ГВЦ – главный вычислительный центр, ЦДМВ – Центральная дирекция мотор-вагонного подвижного состава, ЦДПО – Центральная дирекция пассажирских обустройств, ДОСС – дирекция скоростного сообщения, ФПК – «Федеральная пассажирская компания», ВРК 1, 2, 3 – вагоноремонтные компании.

Реализация описанного алгоритма (см. рисунок) позволит повысить объективность расследования невыполнения локомотивной бригадой удельной нормы электрической энергии на поездку и уровень ответственности всех участников перевозочного процесса за рациональное использование тягово-энергетических ресурсов ОАО «РЖД».

Список литературы

1. Гапанович, В. А. Энергетическая стратегия и электрификация российских железных дорог [Текст] / В. А. Гапанович, С. Н. Епифанцев, В. А. Овсейчук. – М.: Эко-Пресс, 2012. – 196 с.
2. Черемисин, В. Т. Автоматизированный мониторинг энергетической эффективности работы электроподвижного состава ОАО «РЖД» [Текст] / В. Т. Черемисин, Д. В. Пашков, С. Ю. Ушаков // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2014. – № 3 (19). – С. 87 – 91.
3. Черемисин, В. Т. Контроль нерационального использования электрической энергии на тягу поездов с применением бортовых информационно-измерительных комплексов учета электроэнергии [Текст] / В. Т. Черемисин, С. Ю. Ушаков, С. Г. Истомина // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2015. – № 1 (21). – С. 69 – 74.
4. Якунин, В. И. Положение по учету, расследованию и проведению анализа случаев отказов в работе технических средств на инфраструктуре ОАО «РЖД» с использованием автоматизированной системы КАС АНТ № 2852р [Текст] / В. И. Якунин / ОАО «РЖД». М., 2013. – 136 с.
5. Якунин, В. И. Положение о порядке учета, расследования и проведения анализа случаев технологических нарушений в перевозочном процессе на инфраструктуре ОАО «РЖД» с использованием автоматизированной системы КАСАТ №2851р [Текст] / В. И. Якунин / ОАО «РЖД». М., 2014. – 122 с.
6. Иванов, П. А. Положение о порядке учета, расследования и анализа случаев задержек поездов у запрещающих показаний входных светофоров станций № 236р [Текст] / П. А. Иванов / ОАО «РЖД». – М., 2014. – 6 с.
7. Гапанович, В. А. Инструкция о порядке учета и классификации инцидентов, вызывающих нарушения графика движения поездов № 47р [Текст] / В. А. Гапанович / ОАО «РЖД». – М., 2014. – 10 с.
8. Соколов, М. Ю. Положение о классификации, порядке расследования и учета транспортных происшествий и иных событий, связанных с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта №344 [Текст] / М. Ю. Соколов / ОАО «РЖД». – М., 2014. – 8 с.
9. Тишанин, А. Г. Положение о порядке учета транспортных происшествий и иных связанных с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта событий в автоматизированной системе управления безопасностью движения № 2251р [Текст] / А. Г. Тишанин / ОАО «РЖД». – М., 2010. – 9 с.

10. Гапанович, В. А. Положение о порядке служебного расследования, учета и анализа сбоев в работе устройств автоматической локомотивной сигнализации и систем автоматического управления торможением поезда № 634р [Текст] / В. А. Гапанович / ОАО «РЖД». – М., 2012. – 15 с.

References

1. Gapanovich V. A., Epifancev S. N., Ovsejchuk V. A. *Jenergeticheskaja strategija i jelektrifikacija rossijskih zheleznyh dorog* (Energy Strategy and the electrification of the Russian railways). Moscow: Jeko–Press Publ., 2012, 196 p.

2. Cheremisin V. T., Pashkov D. V., Ushakov S. Y. Automated monitoring of energy efficiency operation of the electric rolling stock of JSC «Russian Railways» [Avtomatizirovannyiy monitoring energeticheskoy effektivnosti raboty elektropodvizhnogo sostava ОАО «RZhD»]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2014, no. 3 (19), pp. 87 – 91.

3. Cheremisin V. T., Ushakov S. Y., Istomin S. G. Controlling the irrational electricity consumption for train traction by the use of information-measuring systems of electricity metering on the rolling stock [Kontrol neratsionalnogo ispolzovaniya elektricheskoy energii na tyagu poezdov s primeneniem bortovyih informatsionno-izmeritelnyih kompleksov ucheta elektroenergii]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2015, no. 1 (21), pp. 69 – 74.

4. Yakunin V. I. *Regulations on accounting, investigation and analysis of cases of failures in the hardware infrastructure for JSC «Russian Railways» with the automated system KAS ANT № 2852r* (Polozhenie po uchetu, rassledovaniyu i provedeniyu analiza sluchaev otkazov v rabote tehnicheskikh sredstv na infrastrukture ОАО «RZhD» s ispolzovaniem avtomatizirovannoy sistemy KAS ANT № 2852r). Moscow, 2013, 136 p.

5. Yakunin V. I. *Regulation on the registration, investigation and analysis of cases of violations of the technological process in the transportation infrastructure in the JSC «Russian Railways» with the automated system of touching № 2851r* (Polozhenie o poryadke ucheta, rassledovaniya i provedeniya analiza sluchaev tehnologicheskikh narusheniy v perevozochnom protsesse na infrastrukture ОАО «RZhD» s ispolzovaniem avtomatizirovannoy sistemy KASAT № 2851r). Moscow, 2014, 122 p.

6. Ivanov P. A. *Regulation on the registration, investigation and analysis of cases delays trains in prohibiting reading the input traffic stations № 236r* (Polozhenie o poryadke ucheta, rassledovaniya i analiza sluchaev zaderzhek poezdov u zapreschayuschih pokazaniy vhodnyih svetoforov stantsiy № 236r). Moscow, 2014, 6 p.

7. Gapanovich V. A. *Instructions on the treatment and classification of incidents disrupting train schedule № 47r* (Instruktsiya o poryadke ucheta i klassifikatsii intsidentov, vyizyvayuschih narusheniya grafika dvizheniya poezdov № 47r). Moscow, 2014, 10 p.

8. Sokolov M. Y. *Regulation on classification, investigation and registration procedure accidents and other events related to the violation of safety rules and operation of railway transport № 344* (Polozhenie o klassifikatsii, poryadke rassledovaniya i ucheta transportnyh proisshestviy i inyyih sobyitiy, svyazannyih s narusheniem pravil bezopasnosti dvizheniya i ekspluatatsii zheleznodorozhnogo transporta № 344). Moscow, 2014, 8 p.

9. Tishanin A. G. *Regulation on the accounting and other accidents related to the violation of safety rules and operation of railway transport events in the automated system of safety management № 2251r* (Polozhenie o poryadke ucheta transportnyh proisshestviy i inyyih svyazannyih s narusheniem pravil bezopasnosti dvizheniya i ekspluatatsii zheleznodorozhnogo transporta sobyitiy v avtomatizirovannoy sisteme upravleniya bezopasnostyu dvizheniya № 2251r). Moscow, 2010, 9 p.

10. Gapanovich V. A. *Regulations on the internal investigation, recording and analysis of failures of automatic locomotive signaling and automatic train braking control № 634r* (Polozhenie o porjadke sluzhebnogo rassledovaniya, ucheta i analiza sboev v rabote ustrojstv avtomaticheskoy lokomotivnoj signalizatsii i sistem avtomaticheskogo upravleniya tormozheniem poezda № 634r). Moscow, 2012, 15 p.

ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЗАДАЧАХ РАСПОЗНАВАНИЯ

В статье рассмотрен программный модуль обработки изображений, позволяющий повысить качество контурного анализа изображения, распознавания и оценки графических образов, неоднородностей различного вида. Применение программного модуля позволит повысить достоверность оценки состояния внутренней поверхности замкнутых емкостей в условиях отсутствия доступа для контроля.

В технологическом процессе ремонта подвижного состава и вагонного парка, а также при организации перевозочного процесса нередко приходится сталкиваться с задачей диагностики внутренней поверхности металлических емкостей высокого давления. Как правило, это замкнутые емкости, и работы по выявлению дефектов внутренней поверхности приходится выполнять в условиях отсутствия доступа для контроля.

При качественной диагностике повышается безопасность перевозочного процесса. В свою очередь обоснованная отбраковка только тех узлов, которые действительно исчерпали свой ресурс, повышает эффективность эксплуатационной деятельности. Поэтому вопросы повышения эффективности перевозочного процесса являются первоочередными.

Для определения коррозионного состояния замкнутых емкостей существует множество методов, отличающихся друг от друга точностью получаемых результатов и трудоемкостью проведения исследований [1].

Визуальное освидетельствование является одним из наиболее достоверных методов определения коррозионного состояния внутренней поверхности замкнутых емкостей. Автоматизация этого процесса путем использования интеллектуальной системы распознавания образов позволит, с одной стороны, снизить трудоемкость диагностики, а с другой – повысить точность оценки за счет выявления дефектов на более ранних этапах их образования.

Способность «распознавать» считается основным свойством высокоразвитых биологических существ [2]. Образ представляет собой изложение объекта. Мы опознаем окружающие нас объекты и в соответствии с этим перемещаемся и делаем определенные действия. Мы можем заметить в толпе друга и понять, что он говорит, можем узнать голос приятеля, прочесть рукопись и идентифицировать отпечатки пальцев, можем отличить улыбку от злобной гримасы. Человеческое существо представляет собой очень сложную информационную систему, в определенной степени это определяется исключительно развитыми у человека способностями распознавать образы.

В соответствии с нравом распознаваемых образов акты распознавания можно поделить на два основных типа: идентификация определенных объектов и идентификация абстрактных объектов. Мы распознаем символы, рисунки, музыку и предметы, нас окружающие. Процесс, включающий в себя распознавание зрительных и слуховых образов, можно определить как «сенсорное» распознавание. Процессы этого типа обеспечивают идентификацию и систематизацию пространственных и временных образов. Примерами пространственных образов служат символы, отпечатки пальцев, синоптические карты, физические объекты и рисунки. С другой стороны, мы в состоянии с закрытыми ушами и глазами опознать старый аргумент либо обнаружить решение задачи. Подобные процессы обеспечивают идентификацию абстрактных объектов, и их можно определить как «понятийное» идентификация в отличие от зрительного либо слухового распознавания.

Использование системы распознавания образов и соответствующая автоматизация визуального анализа позволяют исследовать состояние поверхностей в местах затрудненного доступа (например, вследствие ограниченного объема) и повысить эффективность выполняемых работ и достоверность результатов анализа.

Для автоматизации визуального метода разработан программный модуль обработки изображения, позволяющий выполнить контурный анализ изображения. Основными задачами разрабатываемого модуля являются распознавание, сравнение и поиск графических образов, например, различных дефектов поверхности: трещин, сколов, коррозионных повреждений.

Множество произвольных элементов, которые используются для описания границ и остовов, получаются по схеме цепного кодирования, предложенной Фрименом [3]. На двумерное изображение накладывается прямоугольная сетка, и узлы сетки, которые наиболее близки к точкам изображения, соединяют отрезками прямых. Каждому такому отрезку в соответствии с наклоном присваивают восьмеричное число. Таким образом, изображение представляется цепью (последовательностью) или цепями восьмеричных чисел, кодов.

На рисунке 1 показаны множество начальных элементов и кодовая цепочка, описывающая кривую. Эта схема характеризуется рядом полезных свойств.

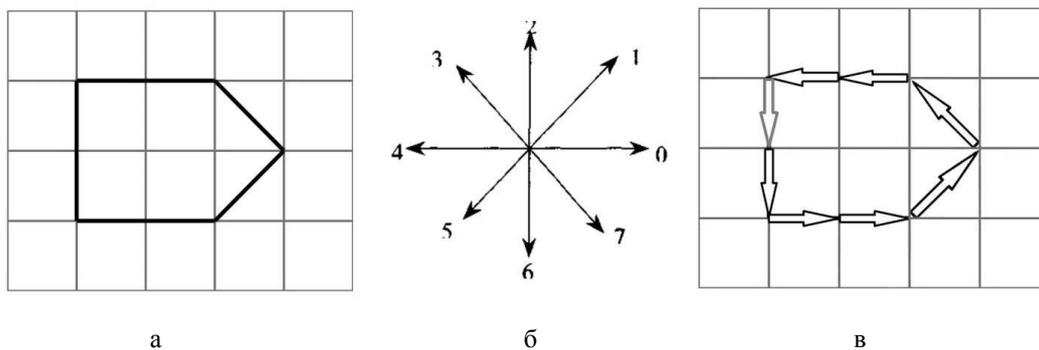


Рисунок 1 – Цепной код Фримена (а), производные элементы (б) и кодовая цепочка кривой 66001344 (в)

Скажем, поворот изображения на угол, кратный 45° , сводится к прибавлению восьмеричного числа (сложение по модулю 8) к всем числам цепочки. Безусловно, при этом изображение может исказиться. Только поворот на угол, кратный 90° , никогда не приводит к искажениям изображения. Изменяя шаг сетки, накладываемой на изображение, можно получить любое желаемое разрешение. Метод цепного кода Фримена не лимитирован изображениями с односвязными замкнутыми границами. Его можно использовать для описания произвольных двумерных фигур, составленных из прямых и кривых линий и отрезков. Ключевым моментом для удачного распознавания образов является информативность анализируемых изображений.

Одним из особенно распространенных недостатков изображений является слабый контраст [2, 3]. Дефект во многом обусловлен ограниченностью диапазона воспроизводимых яркостей. Под контрастом воспринимается разность максимального и минимального значений яркости. Контрастность изображения можно повысить за счет регулируемого изменения яркости каждого элемента изображения и увеличения диапазона яркостей. Существует несколько способов повышения качества изображения, основанных на вычислении и анализе гистограммы.

Гистограмма – это график статистического распределения элементов цифрового изображения с разной яркостью, в котором по горизонтальной оси представлена яркость, а по вертикали – относительное число точек с определенным значением яркости.

Изучив гистограмму, можно получить общее представление о правильности экспозиции, контрасте и цветовом насыщении снимка, оценить требуемую коррекцию, разрешающую повысить качество контурного анализа изображения. На рисунке 2 приведен пример гистограммы.

В каждой точке изображения содержится цвет, который образован некоторой комбинацией первичных цветов: красного (R), зеленого (G) и синего (B). При разрядности цифрового изображения 8 бит любая точка каждого канала принимает значения яркости в диапазоне от

a до b , где $a \geq 0$ и $b \leq 255$. RGB-гистограмма формируется отдельно по каждому каналу путем подсчета количества точек с каждым из значений яркости. В этом случае для каждого канала гистограмма яркости будет представлять собой одномерный целочисленный массив из 256 элементов:

$$Hist = Array(n_i), i = 0..255, \quad (1)$$

где n_i – количество точек изображения, яркость которых равна значению i .

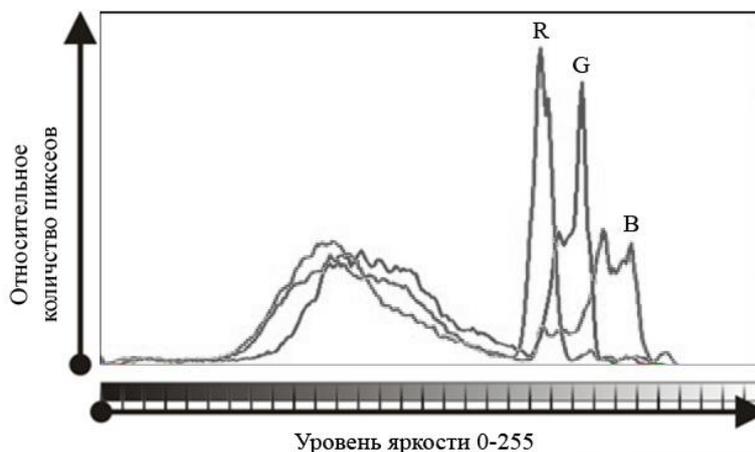


Рисунок 2 – Пример гистограммы изображения

Визуально гистограмма традиционно отображается как обыкновенный график одномерной функции. Гистограмма позволяет оценить яркость изображения, его контрастность, площадь изображения, которую занимают светлые, темные и другие яркостные элементы, и, наконец, помогает определить, где на плоскости изображения находятся отдельные области (объекты), соответствующие тем или другим диапазонам значений яркости.

Яркостными преобразованиями изображения называются преобразования двумерных функций яркости $I(x,y)$ – это яркость точки с координатами $(x;y)$.

Функция отображения яркости $f(I)$ никак не зависит от расположения точки. Простейшим случаем яркостных преобразований изображения являются линейные преобразования яркости [4], в которых функция отображения яркости имеет вид:

$$f(I) = aI + b, \quad (2)$$

где a – показатель, определяющий изменение контраста изображения;

b – показатель, определяющий изменение средней яркости изображения;

I – яркость текущей точки изображения.

На практике гистограммы применяются, чтобы получить статистическую картину о распределении каких-либо данных (пикселей, векторов признаков, направлений градиента во всех точках изображения и т. п.).

Например, гистограмма недоэкспонированного изображения будет иметь максимальные значения в темной области и минимальные значения (или полное отсутствие точек) в светлой области. При переэкспонированном изображении ситуация будет диаметрально противоположной. Гистограмма изображения с недостаточным динамическим диапазоном будет иметь большие значения в узкой области яркостей и нулевые в остальной части графика.

Классическое представление идеальной формы гистограммы изображения – пологая гауссиана, в которой мало темных и ярких участков, а по мере приближения к средним значениям яркости количество точек увеличивается.

Рисунок 3 показывает гистограмму темного изображения, без деталей в тенях, практически черного. Гистограмма прижата к левому краю графика, что говорит о существенной потере в тенях.

На рисунке 4 изображена гистограмма светлого изображения. Большинство тонов слишком светлые, фактически темных тонов на изображении нет. Большая часть изображения

полностью белая, без деталей в этих областях. Гистограмма, смещена вправо и касается правого края графика, что только подтверждает переэкспонированность кадра.

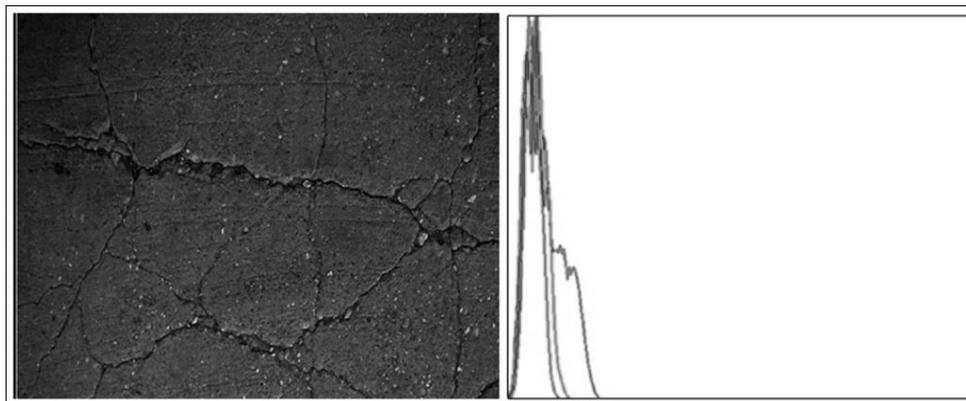


Рисунок 3 – Пример недоэкспонированного изображения и его гистограммы

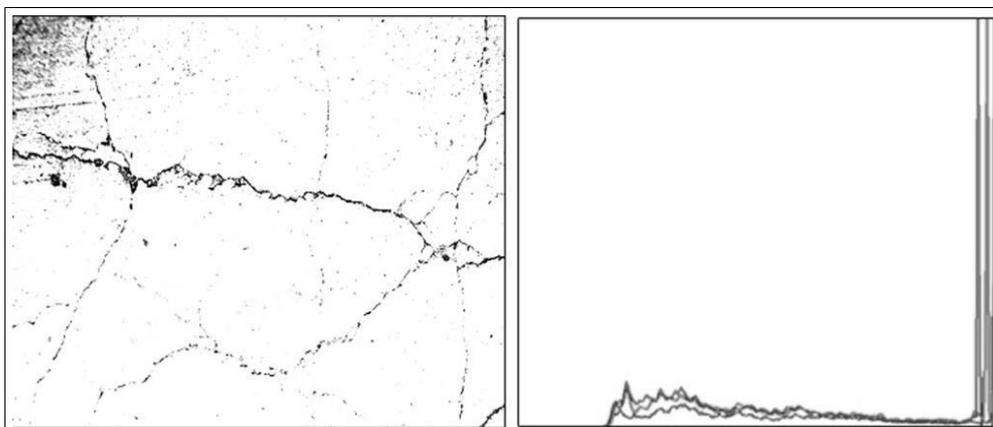


Рисунок 4 – Пример переэкспонированного изображения и его гистограммы

Пере- и недоэкспонированные изображения (см. рисунки 3 и 4) могут быть обработаны с целью повышения информативности, однако часть информации восстановлению не подлежит. В таких случаях предпочтительнее повторить процесс получения изображения, например, с отличными условиями освещенности.

На рисунке 5 гистограмма изображения достаточно широкая и сосредоточена в центральной области, что говорит об отсутствии потерь информации. При этом изображение выглядит правильно, корректно отображая реальные цвета и полутона. Несущественными недостатками приведенного изображения являются небольшое касание в левой части и удаление от правого края гистограммы.

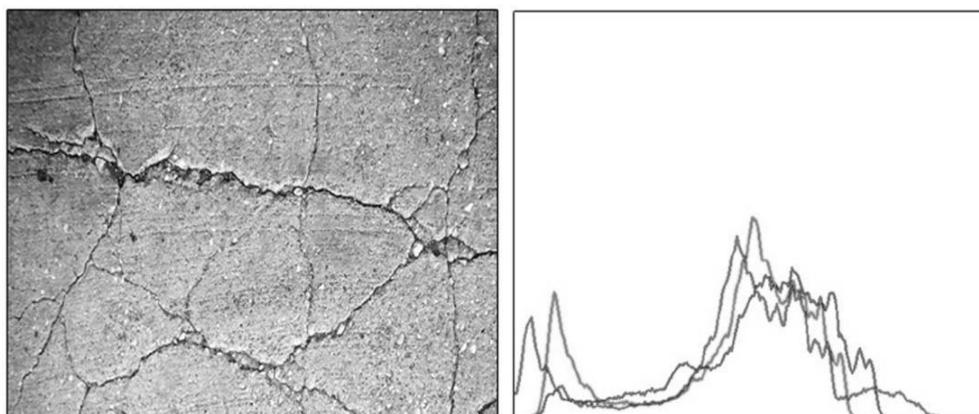


Рисунок 5 – Пример изображения с нормальной экспозицией и его гистограммы

С целью автоматизации процесса анализа изображений разработан программный модуль определения качества изображений, полученных с web-камеры. Блок-схема программного модуля представлена на рисунке 6.

Программный модуль реализован на C/C++ с подключением библиотеки компьютерного зрения OpenCV, которая содержит алгоритмы компьютерного зрения, обработки изображений и численных алгоритмов общего назначения с открытым кодом.

При создании программного модуля применялись встроенные функции библиотеки OpenCV [5]. С помощью функции `split()` изображение разделяется на три канала – R, G, B. Расчет гистограммы для каждого канала осуществляется с применением функции `callHist()`. Нормализация массивов гистограмм выполняется с применением функции `normalize()`. В результате выполнения программы в новом окне совершается вывод гистограмм трех каналов – R, G, B.

В настоящее время анализ гистограммы является наиболее эффективным способом достижения лучшей экспозиции.

Применение программно-аппаратного модуля позволяет повысить достоверность оценки коррозионного состояния замкнутых емкостей на наличие трещин и выхода продуктов коррозии арматуры, а именно повысить точность и уменьшить трудоемкость при определении коррозионного состояния подземной части железобетонной опоры контактной сети без ее откопки.



Рисунок 6 – Блок-схема программного модуля определения качества изображений

Список литературы

1. Котельников, А. В. Блуждающие токи и эксплуатационный контроль коррозионного состояния подземных сооружений систем электроснабжения железнодорожного транспорта [Текст] / А. В. Котельников, В. А. Кандаев / Учебно-методический центр по образованию на ж.-д. трансп. – М., 2013. – 552 с.
2. Кручинин, А. В. Распознавание образов с использованием OpenCV [Текст] / А. В. Кручинин. – М.: Феникс, 2011. – 171 с.
3. Фу, К. Структурные методы в распознавании образов [Текст] / К. Фу. – М.: Мир, 1977. – 319 с.
4. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения [Текст] / Ю. В. Визильтер, С. Ю. Желтов и др. – М.: Физматкнига, 2010. – 672 с.
5. Леденёв, М. А. Программный модуль первичной обработки изображений, полученных в условиях ограниченного объема [Текст] / М. А. Леденёв, А. В. Пономарев // Повышение энергетической эффективности наземных транспортных систем: Материалы междунар. науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2014. – С. 223 – 228.

References

1. Kotelnikov A. V., Kandaev V. A. *Bluzhdajushhie toki i jekspluatacionnyj kontrol korrozionnogo sostojanija podzemnyh sooruzhenij sistem jelektrosnabzhenija zheleznodorozhnogo transporta* (Stray currents and operational control of corrosion of underground structures of power supply systems of railway transport). Moscow, 2013, 552 p.
2. Kruchinin A. V. *Raspoznavanie obrazov s ispolzovaniem OpenCV* (Pattern recognition with OpenCV). Moscow, 2011, 171 p.
3. Fu K. *Strukturnye metody v raspoznavanii obrazov* (Structural methods in recognition of images). Moscow, 1977, 319 p.

4. Vizilter Ju. V., Zheltov S. Ju., Bondarenko A. V. *Obrabotka i analiz izobrazhenij v zadachah mashinnogo zrenija* (Image processing and analysis tasks in machine vision). Moscow, 2010, 672 p.

5. Ledenev M. A., Ponomarev A. V. *Programmnyj modul pervichnoj obrabotki izobrazhenij, poluchennyh v uslovijah ogranichennogo obema* (A software module initial processing of images obtained under conditions in a limited volume). Omsk, 2014, pp. 223 –228.

УДК 625.144.5:625.173.2/5

С. В. Базилевич, А. В. Зайцев, С. М. Кузнецов

ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВЫПРАВочно-ПОДБИВочно-РИХТОВОчных МАШИН ЦИКЛИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Разработаны модели комплексных организационно-технологических показателей эксплуатации выправочно-подбивочно-рихтовочных машин циклического действия на примере ВПП-02 и ВППС-02 с использованием вероятностной оценки надежности их работы. Для ее обоснования проводились два этапа проверки: логическая и математическая. После формирования выборки в соответствии с ГОСТ 8.207-76 проверялась ее принадлежность закону нормального распределения с помощью критерия согласия Пирсона. Далее рассчитывались надежность и риск незавершения запланированного объема работ машинными системами, комплексами, комплектами и отдельными машинами в планируемый промежуток времени.

Модели созданы на основе баз фактических натурных испытаний, технических и экономических показателей машин, комплектов и систем в реальных условиях работы. Данные модели способствует оптимизации путевых работ с заданной надежностью при строительстве, всех видах ремонта и текущем содержании железнодорожного пути, а также дают возможность определения более рациональных режимов эксплуатации путевых машин для выправки, подбивки и рихтовки железнодорожного пути, что способствует повышению годовых выработок данных машин. Они дают возможность организациям, эксплуатирующим данные машины, более обоснованно рассчитывать требуемое количество машин, энергоемкость технологических процессов путевых работ, их стоимость и трудоемкость.

Предложенные модели метода количественной оценки технической надежности работы выправочно-подбивочно-рихтовочных машин позволяют прогнозировать основные комплексные организационно-технологические показатели работы конкретной машины еще на стадии проектирования технологических процессов путевых работ. Этот метод является универсальным и его можно использовать для оценки технической надежности любых машинных систем, комплектов и отдельных машин.

В современных условиях становятся востребованными новые методы, технологии и модели, которые могут способствовать снижению себестоимости строительной продукции и повышению рентабельности работы организаций. Одним из основных факторов повышения эффективности при строительстве, ремонте и текущем содержании пути является формирование технологических комплексов машин.

Целью любой организации является разработка мероприятий, обеспечивающих сооружение объектов и сдачу их в эксплуатацию в проектные сроки с высоким качеством и адекватными денежными, трудовыми и материальными затратами. При строительстве, ремонте и текущем содержании пути необходимо перемещать средства механизации и ресурсы через определенный промежуток времени на новые участки пути. Это вызывает дополнительные затраты, связанные с уточнением организации и технологии производства работ, составов специализированных комплектов и комплексов машин, дальности и времени доставки путевых машин, материалов, полуфабрикатов и готовых изделий.

Создание информационных баз фактических натурных испытаний, технических и экономических показателей машин, комплектов и систем в реальных условиях эксплуатации способствует оптимизации путевых работ с заданной надежностью при строительстве, ремонте и текущем содержании железнодорожного пути [1 – 4].

Создаваемая авторами база данных основана на результатах натурных испытаний выправочно-подбивочно-рихтовочных машин ВПР-02 и ВПРС-02, применяемых при строительстве, ремонте и текущем содержании пути для выправки железнодорожного пути в продольном и поперечном профиле и в плане (рихтовки), а также для уплотнения (подбивки) балласта. Показатели работы машин приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Показатели эксплуатации машин

Показатель	Обозначение	Поле
Марка машины	Марка	<i>Marka</i>
Заводской номер машины	<i>Nз</i>	<i>No</i>
Месяц	Месяц	<i>Mes</i>
Календарный фонд времени	T_{ϕ}	<i>Tf</i>
Время работы, ч	T_p	<i>Tr</i>
Продолжительность технологических перерывов, ч	$T_{тп}$	<i>Ttp</i>
Продолжительность простоев, ч	$T_{п}$	<i>Tp</i>
Коэффициент использования по времени	$K_{в}$	<i>Kv</i>
Коэффициент готовности	$K_{г}$	<i>Kg</i>
Коэффициент технического использования	$K_{ти}$	<i>Kti</i>
Коэффициент эффективности	$K_{э}$	<i>Ke</i>

Для анализа работы машин собрана информация об их работе в реальных производственных условиях (время работы, технологических перерывов и простоев машин). При этом для случайных величин была проведена логическая и математическая обработка статистической информации, хранящейся в базе данных [5 – 8].

В таблице 2 приведены параметры выборок времени работы, времени технологических перерывов, времени простоев и коэффициентов использования по времени машин ВПР-02 и ВПРС-02.

Таблица 2 – Характеристика выборки времени работы, технологических перерывов и простоев машин

Показатель	Величина			
	T_p	$T_{тп}$	$T_{п}$	$K_{в}$
Фактор				
Количество опытов	1296	1296	1296	1296
Количество связей	3	3	3	3
Уровень значимости	0,05	0,05	0,05	0,05
Минимальное значение фактора	77	5,1	13,2	0,3105
Максимальное значение фактора	121	12,3	51,1	0,5042
Выборочное среднее значение фактора	98,3	8,90	29,3	0,4006
Среднее линейное отклонение фактора	5,961	0,959	4,895	0,0247
Среднее квадратическое отклонение фактора	7,436	1,233	6,070	0,03071
Стандартное отклонение фактора	7,439	1,234	6,102	0,03072
Средняя квадратическая ошибка фактора	0,207	0,034	0,170	0,00085
Ошибка, % от среднего значения фактора	0,210	0,385	0,578	0,213
Эмпирическая дисперсия выборки	55,33	1,52	37,24	0,00094
Вариации отклонения от среднего значения (<i>V</i>)	35,53	0,921	23,96	0,00061
Риск отклонения от среднего значения (<i>r</i>)	5,96	0,960	4,895	0,025
Коэффициент вариации	0,076	0,139	0,208	0,077
Вычисленное значение критерия Пирсона	6,23	7,73	7,89	7,25
Табличное значение критерия Пирсона	8,13	8,13	8,13	8,13
Количество интервалов	10	10	10	10

Одним из основных показателей выборки являются показатели вариации. Показатели вариации бывают абсолютными и относительными. К абсолютным показателям вариации можно отнести размах (разница между максимальным и минимальным значениями), среднее линейное и среднеквадратичное отклонения, дисперсию.

К относительным показателям вариации следует отнести относительные размах и отклонение, коэффициент вариации.

Следует отметить, что вариация имеет такую же размерность, как рассматриваемый фактор. Не вариация, а коэффициент вариации определяется как отношение стандартного отклонения к математическому ожиданию и является безразмерной величиной.

По данным таблицы 2 можно сделать вывод о том, что время работы, продолжительность простоев, продолжительность технологических перерывов и коэффициент использования машин по времени подчиняются закону нормального распределения, так как вычисленные значения критерия Пирсона для этих показателей меньше соответствующих табличных значений.

В таблице 3 приведены параметры выборок коэффициентов использования по времени, готовности, технического использования и эффективности работы машин ВПР-02 и ВПРС-02.

Таблица 3 – Характеристика выборки коэффициентов использования по времени, готовности, технического использования и эффективности работы машин ВПР-02 и ВПРС-02

Показатель	Величина		
	K_T	$K_{Тн}$	K_3
Фактор			
Количество опытов	1296	1296	1296
Количество связей	3	3	3
Уровень значимости	0,05	0,05	0,05
Минимальное значение фактора	0,6148	0,4435	0,6752
Максимальное значение фактора	0,8219	0,6792	1,0000
Выборочное среднее значение фактора	0,7205	0,5563	0,9123
Среднее линейное отклонение фактора	0,0307	0,0304	0,0568
Среднее квадратическое отклонение фактора	0,0377	0,0383	0,0680
Стандартное отклонение фактора	0,0377	0,0383	0,0680
Средняя квадратическая ошибка фактора	0,0010	0,0011	0,00189
Ошибка, % от среднего значения фактора	0,1452	0,1913	0,2072
Эмпирическая дисперсия выборки	0,0011	0,0014	0,00463
Вариации отклонения от среднего значения (v)	0,0009	0,0009	0,0032
Риск отклонения от среднего значения (r)	0,0307	0,0304	0,0568
Коэффициент вариации	0,0523	0,0689	0,0746
Вычисленное значение критерия Пирсона	7,32	4,83	8,08
Табличное значение критерия Пирсона	8,13	8,13	8,13
Количество интервалов	10	10	10

Из представленных в таблице 3 результатов следует, что рассматриваемые факторы подчиняются закону нормального распределения, так как вычисленные значения критерия Пирсона для них меньше соответствующих табличных значений.

На рисунках 1 и 2 показаны риск и плотность распределения вероятности времени работы машин (T_p), полученные при ежемесячном анализе результатов натурных испытаний (см. таблицу 2).

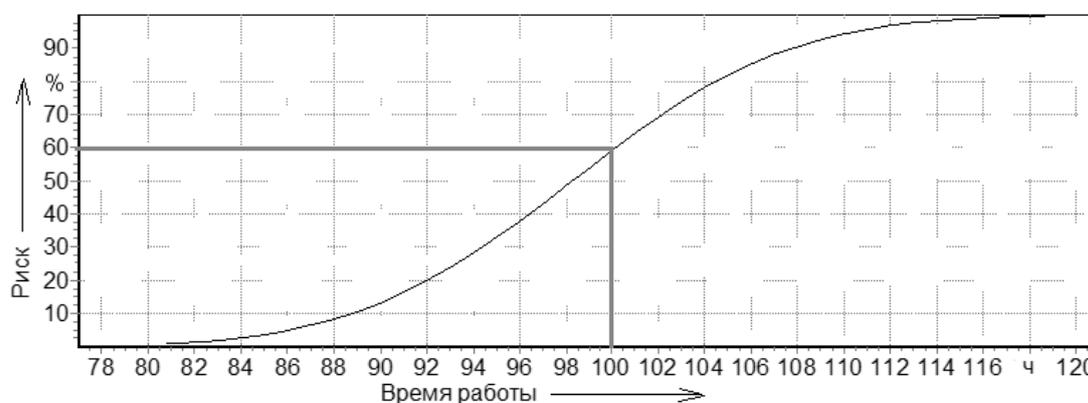


Рисунок 1 – Риск работы машин

На всех графиках под риском любого показателя по оси абсцисс понимается вероятность того, что рассматриваемый показатель не превысит заданного на оси абсцисс значения.

Например, риск того, что время работы машин ВПР-02 и ВПРС-02 не превысит 100 ч, составляет около 60 %, а следовательно, надежность времени работы машин более 100 ч составит всего около 40 % (см. рисунок 1). Другими словами, риск равен площади, ограниченной осью абсцисс и кривой нормального распределения слева от рассматриваемой точки (см. рисунок 2).

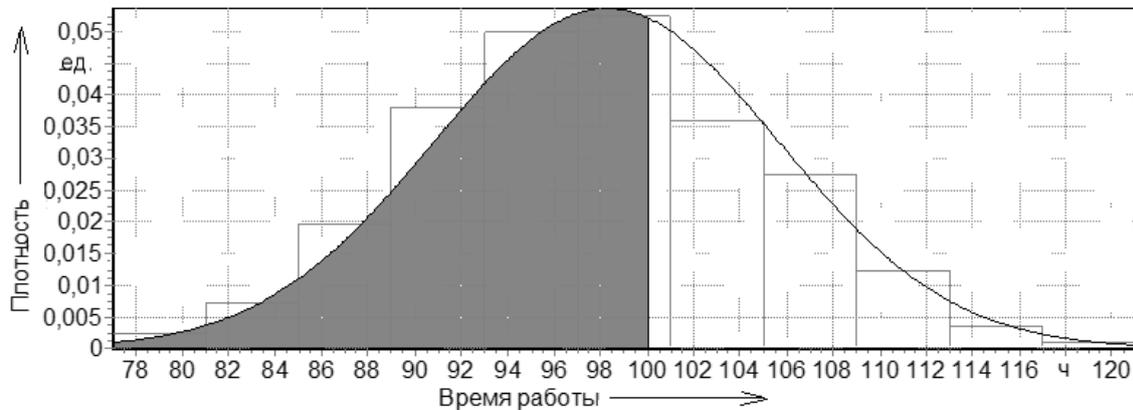


Рисунок 2 – Плотность распределения вероятности времени работы машин

Приведенные графики риска показателей по оси абсцисс позволяют оценить в любой точке оси абсцисс вероятность и риск рассматриваемого показателя работы машин ВПР-02 и ВПРС-02.

На рисунке 3 показан риск продолжительности технологических перерывов ($T_{т.п}$) в работе машин (см. таблицу 2).

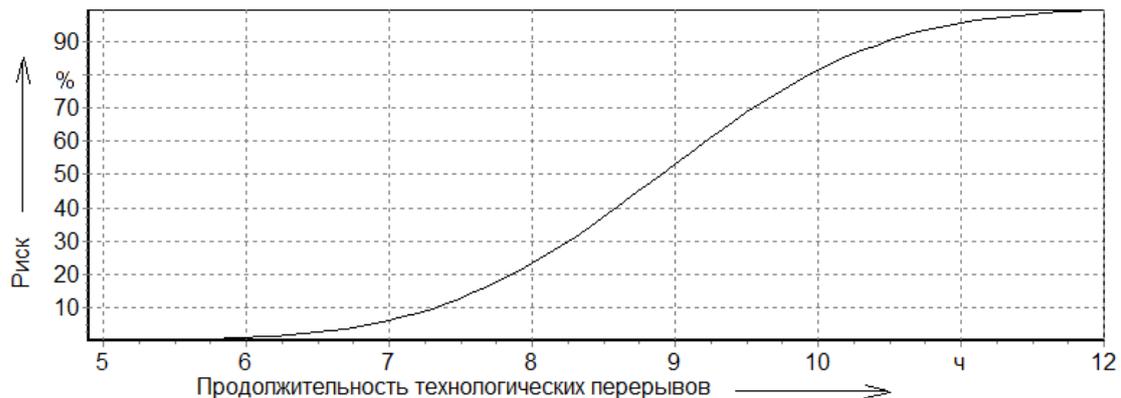


Рисунок 3 – Риск технологических перерывов в работе машин

На рисунке 4 показан риск продолжительности простоев машин ($T_{п}$).

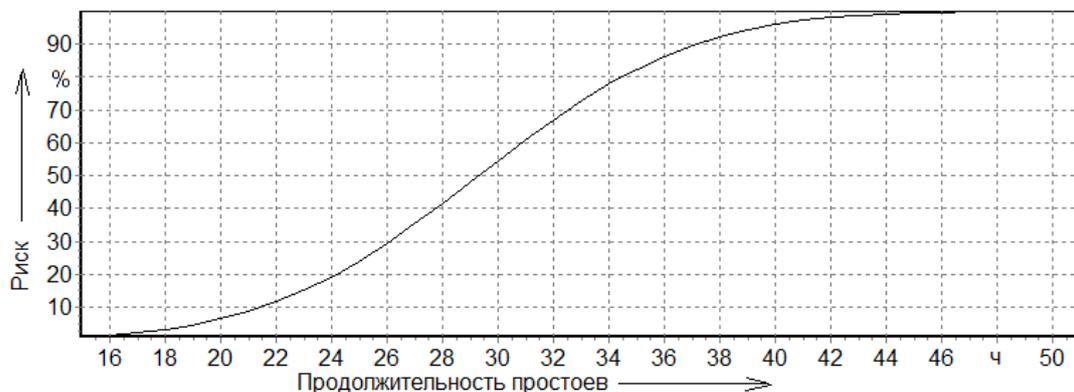


Рисунок 4 – Риск времени простоев машин

На рисунках 5 и 6 показаны риск и плотность распределения вероятности коэффициента использования (K_B) машин по времени (см. таблицу 2).

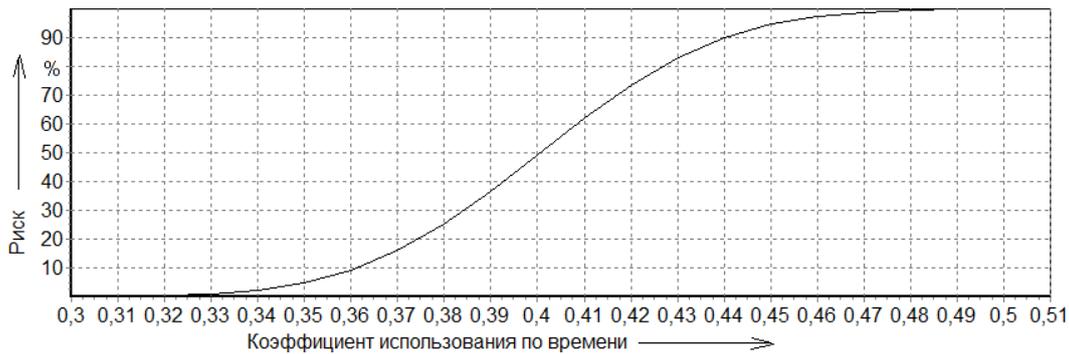


Рисунок 5 – Риск коэффициента использования машин по времени

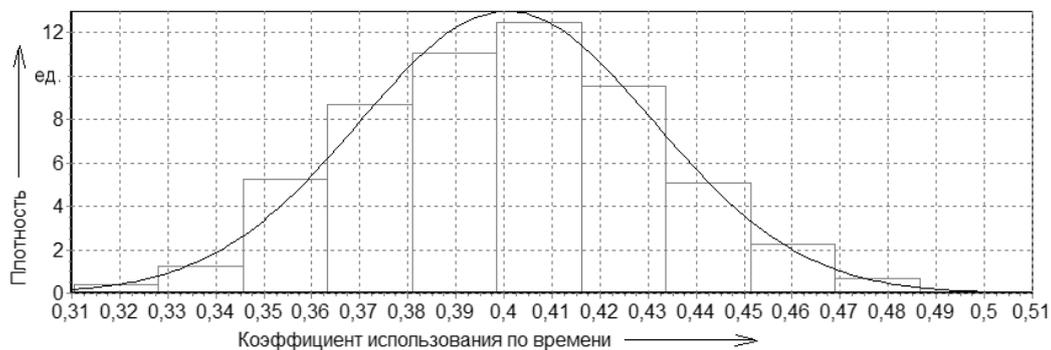


Рисунок 6 – Плотность распределения вероятности коэффициента использования машин по времени

По графикам на рисунках 5, 6 можно оценить показатель риска рассматриваемого коэффициента использования по времени машины при эксплуатации ее в реальных условиях работы.

Для минимизации риска рассматриваемых в статье показателей работы машин воспользуемся рекомендациями [9].

Показатель риска машин определяется по формуле:

$$r = \sqrt{V}, \quad (1)$$

где V – вариация отклонения от среднего значения рассматриваемого показателя работы машины [10]. В таблицах 2 и 3 этот показатель называется риском отклонения от среднего значения.

При определении времени работы машины с минимальным риском следует воспользоваться формулой:

$$T_p = \bar{T}_p - r, \quad (2)$$

где \bar{T}_p – среднее время исправной работы машины, ч; r – риск отклонения от среднего значения времени работы машины, ч.

Например, время работы машины с минимальным риском, вычисленное по данным таблицы 2, будет равно 92,34 (98,3 – 5,96) ч.

При определении продолжительности простоев и технологических перерывов работы машины с минимальным риском следует воспользоваться формулой:

$$T_{II} = \bar{T}_{II} + r, \quad (3)$$

где \bar{T}_{II} – средняя продолжительность простоев машины, ч; r – риск отклонения от среднего значения продолжительности простоя машины, ч.

Например, продолжительность простоя машины с минимальным риском, вычисленная по таблице 4.2, будет равна 34,195 (29,3 + 4,895) ч.

При определении коэффициента использования машины по времени с минимальным риском следует воспользоваться формулой:

$$K_B = \overline{K_B} - r, \quad (4)$$

где $\overline{K_B}$ – коэффициент использования машины по времени; r – риск отклонения от среднего значения коэффициента использования машины по времени.

Например, коэффициент использования машины по времени с минимальным риском, вычисленный по данным таблицы 2, будет равен 0,3756 (0,4006 – 0,025).

На рисунке 7 показан риск коэффициента готовности (K_G) машины (см. таблицу 3), полученный при ежемесячном анализе результатов натурных испытаний машин ВПР-02 и ВПРС-02 [10].

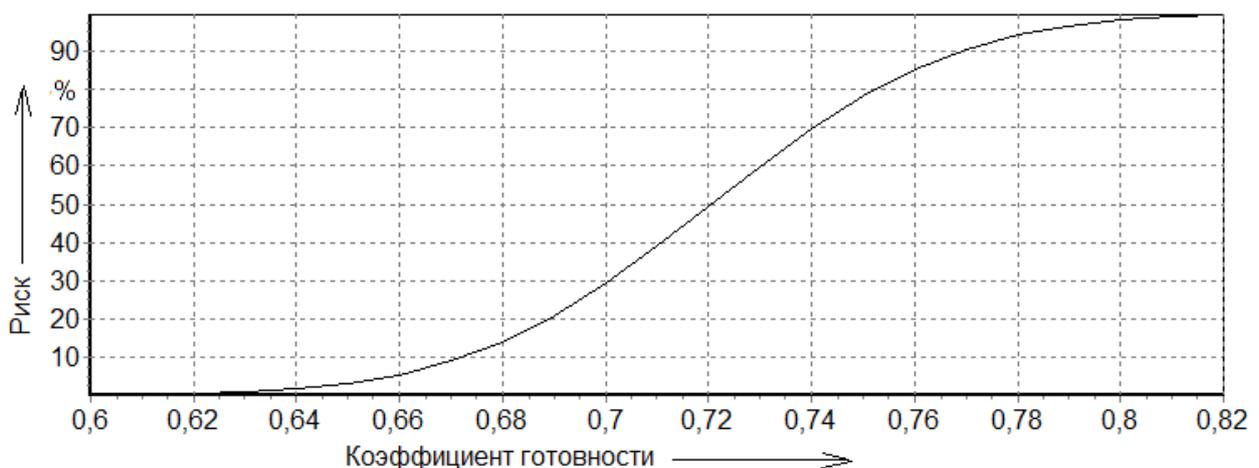


Рисунок 7 – Риск коэффициента готовности машины

Приведенная на рисунке 7 информация позволяет оценить риск коэффициента готовности.

На рисунке 8 показан риск коэффициента технического использования ($K_{т.и}$) машины, полученный при ежемесячном анализе результатов натурных испытаний работы последней (см. таблицу 3).

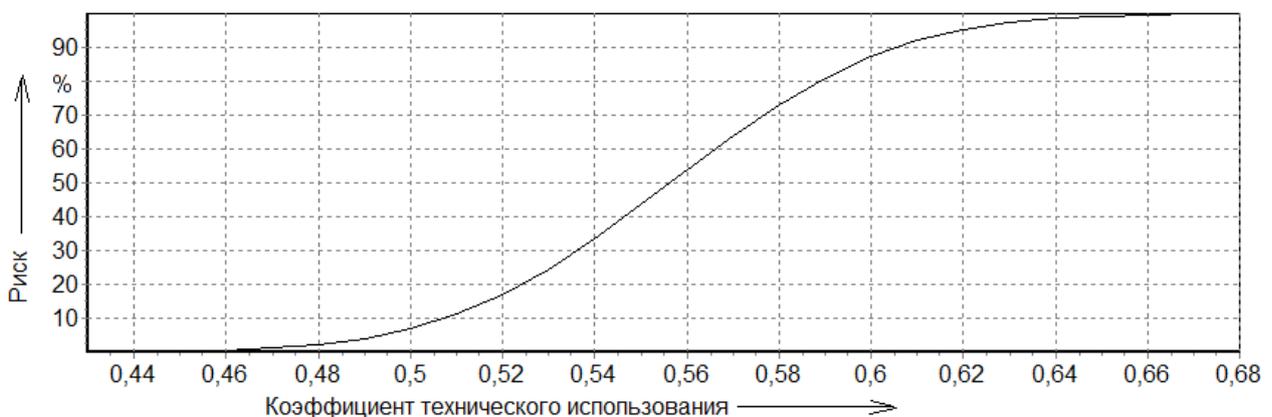


Рисунок 8 – Риск коэффициента технического использования машины

Коэффициент сохранения эффективности (см. таблицу 3), показывает эффективность использования (K_3) машины за конкретный промежуток времени (рисунок 9).

Предложен метод обоснования показателей работы машин типа ВПР-02 и ВПРС-02, позволяющий прогнозировать основные показатели работы конкретной машины. Этот метод

является универсальным, и его можно использовать для обоснования показателей работы любых машинных систем, комплектов и отдельных машин.

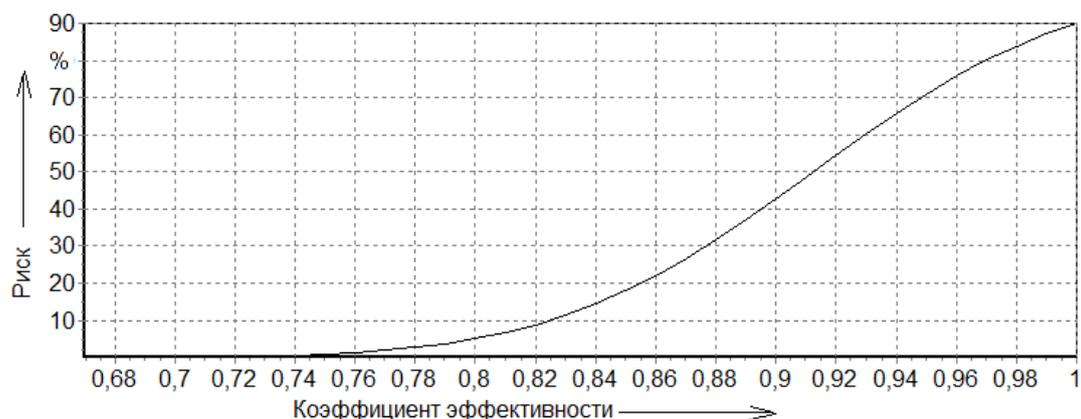


Рисунок 9 – Риск коэффициента эффективности работы машины

Список литературы

1. Кузнецов, С. М. Вероятностная модель работы многоступенчатых гидротранспортных систем [Текст] / С. М. Кузнецов, Е. В. Лизунов, А. В. Щербаков // Известия вузов. Строительство. – 2006. – № 9. – С. 33 – 41.
2. Кузнецова, К. С. Формирование ресурсосберегающего парка машин [Текст] / К. С. Кузнецова, С. М. Кузнецов // Путь и путевое хозяйство. – 2006. – № 8. – С. 11, 12.
3. Исаков, А. Л. Формирование ресурсосберегающего комплекса машин для строительства зданий и сооружений [Текст] / А. Л. Исаков, К. С. Кузнецова, С. М. Кузнецов // Механизация строительства. – 2013. – № 9. – С. 14 – 17.
4. Кузнецов, С. М. Системотехника ресурсосберегающей технологии строительства зданий и сооружений [Текст] / С. М. Кузнецов // Известия вузов. Строительство. – 2005. – № 3. – С. 110 – 117.
5. Кузнецов, С. М. Оценка значимости факторов организационно-технологической надежности работы земснарядов [Текст] / С. М. Кузнецов, В. Б. Пермьяков, П. А. Хабарова // Экономика железных дорог. – 2009. – № 7. – С. 56 – 61.
6. Кузнецов, С. М. Оценка технической надежности работы гидротранспортных систем [Текст] / С. М. Кузнецов // Экономика железных дорог. – 2013. – № 10. – С. 77 – 87.
7. Кузнецов, С. М. Обработка результатов натурных испытаний при техническом и тарифном нормировании [Текст] / С. М. Кузнецов, К. С. Кузнецова // Экономика железных дорог. – 2010. – № 7. – С. 88 – 99.
8. Кузнецов, С. М. Совершенствование обработки результатов натурных испытаний при техническом и тарифном нормировании [Текст] / С. М. Кузнецов // Экономика железных дорог. – 2013. – № 7. – С. 90 – 97.
9. Повысим надежность строительства объектов [Текст] / С. В. Базилевич, И. Л. Чулкова и др. // Механизация строительства. – 2009. – № 6. – С. 12 – 14.
10. Базилевич, С. В. Повышение организационно-технологической надежности проектирования строительных объектов [Текст] / С. В. Базилевич, В. Н. Анферов и др. // Известия вузов. Строительство. – 2013. – № 8. – С. 51 – 63.

References

1. Kuznecov S. M., Lizunov E. V., Shcherbakov A. V. A probabilistic model of multistage hydro – systems [Veroyatnostnaya model' raboty mnogostupenchatykh gidrotransportnykh system]. *Izvestiia vuzov. Stroi-tel'stvo – Proceedings of the universities. Building*, 2006, no. 9, pp. 33 – 41.

2. Kuznecov K. S., Kuznecov S. M. Formation of conservation fleet [Formirovanie resursosberegayushchego parka mashin]. *Put' i putevoe khoziaistvo – Path and track facilities*, 2006, no 8, pp. 11 – 12.
3. Isakov A. L., Kuznecov K. S., Kuznecov S. M. Formation of conservation complex machines for the construction of buildings and structures [Formirovanie resursosberegayushchego kompleksa mashin dlya stroitel'stva zdaniy i sooruzhenij]. *Mekhanizatsiia stroitel'stva – Mehani-zatsiya construction*, 2013, no 9, pp. 14 – 17.
4. Kuznecov S. M. Systems engineering resource-saving technology of construction of buildings [Sistemotekhnika resursosberegayushchej tekhnologii stroitel'stva zdaniy i sooruzhenij]. *Izvestiia vuzov. Stroi-tel'stvo – Proceedings of the universities. Building*, 2005, no 3, pp. 110 – 117.
5. Kuznecov S. M., Permyakov V. B., Habarova P. A. Assessment of the importance of organizational and technological factors, the reliability of the dredgers [Ocenka znachimosti faktorov organizacionno-tekhnologicheskoy nadezhnosti raboty zemsnyadov]. *Ekonomika zheleznikh dorog – Economy railways*, 2009, no 7, pp. 56 – 61.
6. Kuznecov S. M. Assessment of the technical reliability of hydro-systems [Ocenka tekhnicheskoy nadezhnosti raboty gidrotransportnyh sistem]. *Ekonomika zheleznikh dorog – Economy railways*, 2013, no 10, pp. 77 – 87.
7. Kuznecov S. M., Kuznecov K. S. Processing of the results of field tests with the technical and tariff rationing [Obrabotka rezul'tatov naturnyh ispytaniy pri tekhnicheskome i tarifnom normirovanii]. *Ekonomika zheleznikh dorog – Economy railways*, 2010, no 7, pp. 88 - 99.
8. Kuznecov S. M. Improving the processing of the results of field tests with the technical and tariff rationing [Sovershenstvovanie obrabotki rezul'tatov naturnyh ispytaniy pri tekhnicheskome i tarifnom normirovanii]. *Ekonomika zheleznikh dorog – Economy railways*, 2013, no 7, pp. 90 - 97.
9. Bazilevich S. V., Chulkova I. L., Kuznecov S. M., Sirotkin N. A. Increase reliability of the facilities construction [Povysim nadezhnost' stroitel'stva ob"ektov]. *Mekhanizatsiia stroitel'stva – Building equipment*, 2009, no 6, pp. 12 – 14.
10. Bazilevich S. V., Anferov V. N., Vasil'ev S. I., Kuznecov S. M. Improvement of organizational and technological reliability of the design of construction projects [Povyshenie organizacionno-tekhnologicheskoy nadezhnosti proektirovaniya stroitel'nyh ob"ektov]. *Izvestiia vuzov. Stroi-tel'stvo – Proceedings of the universities. Building*, 2013, no. 8, pp. 51 – 63.

УДК 331

И. Г. Хаманов, А. Н. Щетинин, А. А. Евстегнеева

ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ К ПОНЯТИЮ «БИОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКТОР» ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМУ ТРАНСПОРТУ

Данная статья посвящена вопросам, касающимся производственно-профессионального риска воздействия «биологического фактора» на работников железнодорожного транспорта. В статье приведены результаты работы, цель которой заключалась в совершенствовании системы охраны труда на железнодорожном транспорте при воздействии на работников патогенных микро- и макроорганизмов. На основании материала, полученного в ходе изучения нормативных документов существующей системы санитарно-гигиенической оценки условий труда и многолетней практической деятельности в этой области, представлены основные методологические трудности при оценке «биологического фактора». Сформулирован термин «биологический фактор», обоснована необходимость оценки риска воздействия этого вредного фактора, расширен перечень источников и профессиональных групп работников железнодорожного транспорта, потенциально подверженных воздействию «биологического фактора». Применительно к железнодорожному транспорту, обоснована необходимость разработки дополнительных средств защиты и профилактики для снижения риска воздействия этого вредного производственного фактора, представлено устройство, разработанное для этих целей. Принцип действия устройства основан на комплексном использовании способов ультразвуко-

вого воздействия и ионизации с целью обеззараживания атмосферного воздуха в помещениях железнодорожных вокзалов, автовокзалов, станций метрополитена. По результатам детального изучения нормативной документации в области перевозки опасных грузов железнодорожным транспортом, действующей на территории Российской Федерации, выявлены основные существующие проблемы и пути их решения, с точки зрения биологической безопасности. Сформулирован термин «биологически опасные грузы», обоснована необходимость дополнения действующих классификаций опасных грузов «биологически опасными грузами», представлен примерный перечень таких грузов, неучтенных ранее, обоснована возможность воздействия этих грузов на работников железнодорожного транспорта.

Аттестация рабочих мест по условиям труда на предприятиях ОАО «РЖД» показала, что из 450 тыс. рабочих мест (около 1 млн работников) с вредными условиями труда на долю воздействия «биологического фактора» приходится 1350 (0,3 % от общего количества, с числом работников не менее 5 тыс. человек) [1, с. 97].

Количество рабочих мест, имеющих вредные производственные факторы по железным дорогам России, и число работающих на них

Вредный производственный фактор	Количество рабочих мест, %	Количество работающих, %
Химический	2,3	2,2
Биологический	0,3	0,5
Шум	5,4	5,9
Инфразвук	–	–
Ультразвук	–	–
Вибрация	2,4	2,9
Запыленность	2,0	1,7
Электромагнитные излучения	0,8	0,7
Ионизирующие излучения	0,02	0,02
Микроклимат	3,4	3,5
Освещенность	2,9	2,7
Тяжесть труда	5,0	7,0
Напряженность труда	6,7	9,0

Объективный анализ воздействия «биологического фактора» на работника ограничен вследствие ряда причин.

Существуют причины, не позволяющие объективно определить наличие «биологического фактора» и оценить его воздействие:

отсутствие достаточной нормативной базы;

методологическая несостоятельность оценки риска на существующем принципе дозо-эффектной зависимости;

отсутствие или наличие «на бумаге» специализированных микробиологических лабораторий у организаций, проводящих санитарно-гигиеническую оценку условий труда;

– узкий круг профессиональных групп железнодорожников с официально зарегистрированным наличием «биологического фактора» в технологическом регламенте [2, с. 144].

Так, в соответствии с нормативной документацией в области специальной оценки условий труда «биологический фактор» (его наличие) определяется только для воздуха рабочей зоны, оставляя за скобками все биологические объекты, имеющие непосредственный контакт с работником в процессе трудовой деятельности [3, с. 370].

В настоящее время в действующей документации, регламентирующей проведение санитарно-гигиенической оценки условий труда, отсутствует определение понятия «биологический фактор», отмечено лишь перечисление составляющих его элементов, реально воздействующих на работников. Авторам представлялось целесообразным дать более широкую методологическую трактовку понятия «биологический фактор» с учетом дополнительного потенциального воздействия, раздвигающего границы профилактических мероприятий в системе охраны труда: «биологический фактор» производственно-профессионального риска («биологический фактор») – процесс потенциального или реального взаимодействия патогенных биологических объектов с работником (человеком-оператором), последствия кото-

рого обусловлены мерой патогенности микро- и макроорганизмов, продуктов их метаболической деятельности, а также продуктов биологического синтеза наряду с уровнем биологической защиты организма человека в условиях техносферы [3, с. 370].

Основные методологические трудности существующей системы охраны труда связаны с тем, что под «биологическим фактором» подразумевается только реальное взаимодействие с патогенными микроорганизмами, а «биологический фактор» определяется преимущественно для работников специализированных медицинских и ветеринарных учреждений. Однако комплексному воздействию «биологического фактора» подвержена значительно большая группа железнодорожников:

- уборщики и мойщики пассажирских вагонов, вагонов для перевозки лекарственных препаратов, скоропортящихся продуктов и вагонов для перевозки животных и т. д.;
- приемосдатчики;
- проводники пассажирских вагонов;
- работники, осуществляющие текущее содержание и ремонт железнодорожного пути;
- сотрудники дистанций гражданских сооружений водоснабжения, водоотведения и канализации;
- сотрудники служб по ремонту и обслуживанию биотуалетов пассажирских вагонов;
- обслуживающий персонал (уборщики);
- работники грузового и складского хозяйства, взаимодействующие с опасными биологическими грузами.

Массовыми источниками вредного «биологического фактора» производственной среды на железнодорожном транспорте являются подвижной состав и тара для перевозки скота, лекарственных препаратов, вакцин, токсинов, ядов; пассажирский подвижной состав; перевозимые животные и продукты животного происхождения; системы водоснабжения и канализации; балласт путевой призмы и т.д.

Таким образом, сдерживающими факторами на пути оптимизации «биологического фактора» в системе охраны труда являются методологическая недооценка «потенциально возможного» воздействия «биологического фактора»; воздействие патогенных макроорганизмов на работников (насекомые, животные, люди); проведение работ в районах с неблагоприятной эпидемиологической и эпизоотической обстановкой, в районах распространения некоторых специфических патогенных видов насекомых; недостаточный биологический контроль транспорта инфицированных животных, грузов и пассажиров через государственную границу в пунктах таможенного досмотра поездов.

Замеры концентрации патогенных микроорганизмов проводятся только в воздухе рабочей зоны и только для одной составляющей «биологического фактора» – микроорганизмов-продуцентов, живых клеток и спор, содержащихся в бактериальных препаратах. Для этой составляющей не предусмотрены классы условий труда 3.4 и 4. Для всех остальных составляющих, а это патогенные микроорганизмы четырех групп, не проводится никаких замеров, а автоматически устанавливается класс условий труда 2, 3.1, 3.3 и 4 соответственно. Отсутствуют нормированные величины времени воздействия «биологического фактора» на работников.

Важным на пути к идентификации «биологического фактора» в рамках введенной с 2014 г. специальной оценки условий труда стало то, что в штате аккредитованных организаций должно быть не менее одного эксперта, имеющего профильное образование по одной из специальностей – врач по общей гигиене, врач по гигиене труда, врач по санитарно-гигиеническим лабораторным исследованиям.

Из реестра воздействия «биологического фактора» видно, что ведущим фактором его производственно-профессионального риска являются патогенные микроорганизмы (вирусы, бактерии, риккетсии), на долю которых приходится около 40 – 60% общей заболеваемости и заболеваемости с временной утратой трудоспособности (ЗВУТ) [4, с. 16]. Поэтому снижение уровня ЗВУТ в значительной степени зависит от обеззараживающих мероприятий в системе

охраны труд на железнодорожном транспорте, направленных на подавление вирусно-микробных ассоциаций, распространяющихся воздушно-капельным путем от больного к здоровому в воздушной среде производственных и административно-бытовых помещений. Следовательно, профилактическая (заблаговременная) санитарно-гигиеническая деятельность по обеззараживанию воздушной среды производственных помещений позволит значительно снизить медицинские потери от ЗВУТ и эффективно сохранить трудовой потенциал.

На основании проведенного патентного поиска в области обеззараживания воздушной среды в помещениях (изучены способы и технические устройства) был сделан вывод о перспективности разработки столь важного направления в системе охраны труда. Так, авторами было разработано «Устройство для обеззараживания атмосферного воздуха в помещении» [5, с.1]. По данному устройству получен патент на полезную модель.

Разработанное устройство относится к области промышленной санитарии и гигиены, а именно, к техническим устройствам для обеззараживания воздуха в закрытых помещениях, и может найти применение при обеззараживании воздуха в рабочих и жилых помещениях, в частности, в производственных цехах и административных зданиях на авиа-, авто-, железнодорожных вокзалах, станциях метрополитена, в образовательных учреждениях и других закрытых помещениях с большим скоплением людей.

Известно устройство для стерилизации жидкости и (или) твердого объекта, содержащее систему перемещения жидкого продукта и пункт стерилизации, установленный по длине перемещения и включающий в себя источник электроэнергии, и ультразвуковой генератор, обеспечивающий нагрев жидкости до пороговой температуры обработки (см. патент РФ № 2275826, МПК А23L3/32, А23L3/30, А61L2/03, С02F1/48, опубл. 10.05.2006).

Однако использование ультразвука в составе указанного устройства практически неприемлемо для обеззараживания воздуха в закрытом помещении, так как по физическим характеристикам в газовой среде ультразвук способен проникать лишь на глубину до 1 – 1,5 см. Вследствие процессов акустической релаксации ультразвук в газах, в частности, в воздухе, распространяется с большим затуханием, а жидкости и твердые тела представляют собой хорошие проводники, поэтому области использования ультразвука относятся почти исключительно к жидкостям и твердым телам [6, с. 133]. Процесс ультразвуковой очистки обусловлен рядом явлений в жидкости, вызванных действием интенсивного ультразвука: кавитацией, акустическим давлением, звукокапиллярным эффектом и энергичными микропотоками. Качество очистки зависит от частоты колебаний, плотности акустической энергии и формы поля, свойств моющей жидкости и прочности связи загрязняющих веществ с очищаемой поверхностью. Ультразвук повышает активность микроорганизмов, токсических для соединений, что позволяет на один – два порядка снизить концентрацию антибактериальных препаратов при санитарной обработке поверхностей. Ультразвуковая очистка осуществляется, как правило, в ваннах различной емкости с встроенными в дно излучателями. Ультразвуковая очистка поверхностей не всегда сопровождается их полной санацией. Для решения этой задачи чаще используют комбинированное воздействие ультразвуком и наиболее подходящим для решения конкретной задачи веществом, обладающим бактерицидным действием. При комбинированной очистке концентрацию бактерицидного вещества в растворе можно существенно понизить [7, с. 181]. Существует и широко применяется способ обеззараживания поверхности скорлупы куриных яиц, суть которого состоит в комбинированном применении ультразвукового воздействия и дезинфицирующего раствора. Данный способ обеспечивает смывание с поверхности и разрушение суспендированных в жидкости живых клеток, был проверен в ходе исследований с применением в качестве загрязнителей (патогенных микроорганизмов на скорлупе) двух наиболее стойких к внешним воздействиям штаммов сальмонелл – тифимуреума и дублина. Скорость очистки имеет прямую зависимость от плотности ультразвуковой энергии в среде [7, с. 182].

Известно устройство для ионизации атмосферного воздуха (см. ав. св. СССР № 115834 МПК Н01j от 31.01.1955), содержащее сосуд с жидкостью, высасываемой через подающий

патрубок крыльчаткой, приводимой во вращение электродвигателем, смонтированным на крышке аэроионизатора, и поступающей затем через выходные патрубки в атмосферу. Данное техническое устройство характеризуется тем, что для приобретения электрических зарядов раздробляемую в воздухе механическим или иным устройством и циркулирующую в замкнутом объеме жидкость в процессе отвода ионизированного воздуха насыщают ионами посредством многократного принудительного возврата раздробленных капель в основную массу жидкости, позволяющим повысить униполярность и интенсивность насыщения воздуха электрически заряженными ионами.

Недостатком рассматриваемого устройства является слабая обеззараживающая способность распыляемых в воздухе аэроионов.

Техническая задача, для решения которой авторами разработана полезная модель, заключается в усилении обеззараживающей способности ионизированного воздуха с помощью ультразвука.

Поставленная задача решается следующим образом. В устройстве для обеззараживания атмосферного воздуха в помещении с помощью электрически заряженных аэроионов путем его ионизации, содержащем сосуд с жидкостью и входным и выходным патрубками, вентилятор, приводимый во вращение электродвигателем, смонтированным на крышке ионизатора, дополнительно устанавливаются ультразвуковой газоструйный излучатель, подсоединенный к выходному патрубку ионизатора и состоящий из камеры с находящимся в ней ротором и выходного патрубка. Таким образом, в разработанном устройстве применяется комбинированное воздействие двух способов на обеззараживаемую среду - ионизации и ультразвукового воздействия.

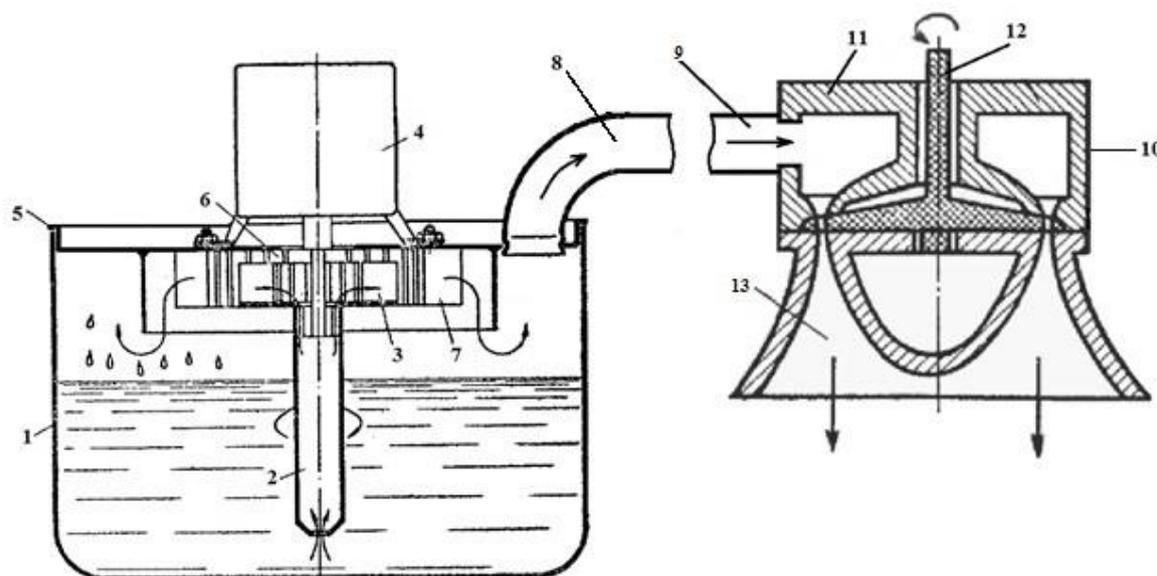
В ходе изучения существующих способов распыления жидкости (гидравлического, механического, пневматического, ультразвукового и др.) авторы пришли к выводу о том, что для уменьшения размера капли жидкости необходимо увеличивать затраты используемой при этом энергии. Увеличить долю энергии, затрачиваемой именно на распыление, решить проблемы инженерного характера, стоящие перед распыляющей техникой, позволяют применять новые, перспективные способы распыления, к которым относится ультразвуковое распыление [8, с. 40].

Ультразвуковой способ диспергирования жидкости в системах «жидкость – газ» применяется для перевода жидкости в аэрозольное состояние. Это происходит за счет увеличения поверхностной энергии пленки жидкости, которое достигается за счет наложения на нее механических колебаний высокой интенсивности ультразвуковой частоты. Основными преимуществами такого диспергирования жидкостей по сравнению с другими часто применяемыми способами (гидравлическим, механическим, пневматическим), являются низкая энергоемкость, высокая производительность и возможность осуществлять мелкодисперсное диспергирование [8, с. 29].

Ультразвуковой способ диспергирования жидкости, т. е. диспергирование жидкости в фонтане (высокочастотные ультразвуковые колебания), реализуется при помощи ультразвуковых газоструйных излучателей (ультразвуковых свистиков) – устройств, способных преобразовывать электрическую энергию в звуковые волны высокой частоты. Такие устройства способны дробить жидкости захваченной струей воздуха на капли микронных размеров, образующие стабильное облако аэрозоля. В активную зону ультразвукового газоструйного излучателя подается жидкость, подвергаемая распылению. Одним из недостатков ультразвукового способа распыления жидкости является высокий разброс диаметров капель распыла [8, с. 42]. В разработанной авторами полезной модели в активную зону ультразвукового излучателя будет подаваться не жидкость, а аэрозоль, капли воды в котором под воздействием ультразвука будут переходить в гораздо мелкую фракцию, а диаметры капель будут иметь наименьший разброс, т. е. распыл будет однородным. Устройства для ультразвукового распыления жидкости наиболее эффективны в тех случаях, когда необходима высокая производительность, для получения аэрозолей в больших

количествах для большеобъемных производственных помещений (ферм, птицефабрик и т. д.) [8, с. 44], поэтому применять данный способ (как одно из составляющих разработанного устройства) логично для обеззараживания воздуха большеобъемных помещений, в том числе железнодорожных вокзалов и станций метрополитена.

Разработанная полезная модель представлена на рисунке. Устройство работает следующим образом. Сосуд 1 заполняют жидкостью (например, дистиллированной водой). Включают электродвигатель 4, смонтированный на крышке 5 сосуда и загрязненный воздух вентилятором 3 засасывается через входные щели для засасывания атмосферного воздуха 6, одновременно, жидкость из сосуда 1, высасываемая через подающий патрубок для всасывания жидкости 2, срываясь под действием центробежных сил, попадает на распылительные лопатки вентилятора 7, с которых многократно распыляется, приобретая при этом электрический заряд. Срывающийся вместе с жидкостью с кромок лопаток вентилятора воздух подхватывает средние и легкие аэрогидроионы и во взвешенном состоянии выносит их через выходной патрубок 8 во входной патрубок 9 ультразвукового газоструйного излучателя 10, где, проходя через камеру 11 и попадая на ротор 12 в виде водяной аэрозольной пыли, подвергается разрушающей микроорганизмы ультразвуковой вибрации, при этом осуществляется интенсивное окисление примесей, микробов и вирусов, находящихся в воздухе, а также уменьшение диаметра капель аэрозоля, затем обеззараженный воздух попадает через выходной раструб 13 в помещение.



Устройство для ультразвукового обеззараживания воздуха в помещении: 1 – сосуд с жидкостью; 2 – подающий патрубок для всасывания жидкости; 3 – вентилятор; 4 – электродвигатель; 5 – крышка сосуда; 6 – входные щели для засасывания атмосферного воздуха; 7 – распылительные лопатки вентилятора; 8 – выходной патрубок; 9 – входной патрубок ультразвукового газоструйного излучателя; 10 – ультразвуковой газоструйный излучатель; 11 – камера; 12 – ротор; 13 – выходной раструб

Заявленное устройство в сравнении с прототипом на основе перечисленной совокупности признаков позволяет усилить обеззараживающую способность ионизируемого воздуха. К одному из главных преимуществ разработанного устройства можно отнести то, что при его применении не требуется вносить изменений в существующий трудовой распорядок (нет необходимости вводить профилактические или санитарные часы), устройство работает в присутствии людей, процесс обеззараживания абсолютно безвреден.

В ОАО «РЖД», дочерних и зависимых подразделениях находится 1199 объектов, включенных в технологический процесс перевозки опасных грузов железнодорожным транспортом, в том числе 1072 грузовые станции, 80 сортировочных станций, 27 промывочно-пропарочных станций, 8 дезинфекционно-промывочных предприятий, 12 комплексных

пунктов подготовки крытых вагонов. Из числа этих объектов 83,1 % относится ко II и III группам санитарно-эпидемиологического благополучия (т. е. не соответствует действующим государственным санитарно-эпидемиологическим правилам и гигиеническим нормативам, в них регистрируется превышение ПДК и ПДУ по результатам лабораторных и инструментальных методов исследования, регистрируются групповые инфекционные заболевания, пищевые отравления, профессиональные заболевания) [9, с. 38]. Источником «биологического фактора» в III группе объектов являются «биологически опасные грузы», подвижной состав после перевозки «биологически опасных грузов», продукты промывки, пропарки, очистки.

В ходе работы был проведен анализ действующей на территории Российской Федерации документации в области перевозки опасных грузов, выявлены проблемные места по работе с грузами, способными оказывать негативное биологическое воздействие на работников, окружающую среду и животных в процессе погрузки, разгрузки, хранения, перевозки, переработки и т. д.

В действующем регламенте по перевозке опасных грузов железнодорожным транспортом нет определения понятия «биологически опасные грузы», так как нет отдельного класса, объединяющего в себе все составляющие такого рода грузов. Это затрудняет формирование регламента системы охраны труда для групп железнодорожников, потенциально или реально контактирующих с данными грузами.

К выявленным методологическим недоработкам существующей системы перевозки и маркировки «биологически опасных грузов» можно отнести следующие:

в действующих на территории России правилах перевозок опасных грузов по железным дорогам не предусмотрено наименование «биологически опасные грузы»;

классификации грузов, представленные в действующих правилах, разнятся;

в действующих классификациях классы, связанные с «биологическим фактором», включают в себя разные составляющие.

К числу неучтенных биологически опасных и потенциально опасных грузов предложено отнести инфицированных пассажиров, продукты их жизнедеятельности, тела умерших пассажиров, некоторые виды ручной клади и т. д. Кроме того, перевозимые животные (в том числе инфицированные) и продукты их жизнедеятельности, туши падших животных, продукты животного происхождения и т. д. тоже являются «биологически опасными грузами», не учтенными документально в настоящее время.

Исходя из результатов анализа можно сделать вывод о том, что при маркировке тары и вагонов возможны трудности, неточности, а также при санитарно-гигиенической оценке условий труда не учитывается воздействие «биологического фактора» на работников железнодорожного транспорта, взаимодействующих с ранее не учитываемыми «биологически опасными грузами». Детальная проработка представленных предложений позволит оптимизировать систему защиты работников железнодорожного транспорта в процессе перевозки «биологически опасных грузов».

Целесообразно представить разработанную на основе представленного выше понятия «биологический фактор» и общепринятого «опасные грузы» формулировку: «биологически опасные грузы» – грузы, прямое или косвенное взаимодействие с которыми в процессе перевозки и грузовых операций ведет или может привести к вредному биологическому воздействию на работников, животных, окружающую среду и жителей близлежащих населенных пунктов.

Итак, для обеспечения охраны жизни и здоровья людей, животных и защиты окружающей среды при перевозке «биологически опасных грузов» необходимо создание единой системы классификации опасных грузов; с точки зрения «биологического фактора» – дополнение существующих классов опасными и потенциально опасными биологическими грузами или вынесение «биологически опасных грузов» в отдельный класс, подкласс; дополнение аварийных карточек перечнем «биологически опасных грузов»; разработка дополнительной маркировки тары и вагонов для «биологически опасных грузов».

В целом результаты проведенной работы позволяют сделать следующие выводы:

- 1) новый методологический подход к понятию «биологический фактор» оптимизирует систему охраны труда с большим участием профилактической составляющей на железнодорожном транспорте;
- 2) усиление внимания к «биологическому фактору» способствует эффективной разработке новых технических средств борьбы с патогенными микроорганизмами;
- 3) новая методологическая сущность понятия «биологически опасные грузы» совершенствует регламент системы охраны труда при железнодорожной перевозке.

Список литературы

1. Производственно – профессиональный риск железнодорожников [Текст] / В. А. Капцов, А. П. Мезенцев и др. – М.: Реинфор, 2002. – 287 с.
2. Хаманов, И. Г. Проблемы оценки риска воздействия «биологического фактора» на работников ОАО «РЖД» [Текст] / И. Г. Хаманов, А. Н. Щетинин // Технические науки – от теории к практике // Сб. ст. по материалам XXX междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск: СибАК, 2014. – № 1 (26). – С. 142 – 150.
3. Хаманов, И. Г. Исследование «биологического фактора» для оптимизации системы защиты работников ОАО «РЖД» [Текст] / И. Г. Хаманов, А. Н. Щетинин // Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах // Материалы X междунар. науч.-практ. конф. / Кузбасский госуд. технич. ун-т. – Кемерово, 2013. – С. 370 – 373.
4. Щетинин, А. Н. Организационно-функциональная модель первичной профилактики неинфекционных заболеваний у работников железнодорожного транспорта [Текст]: Автореф. дис... доктора мед. наук, Новосибирск, 2006. – 31 с.
5. Пат. 150551 Российская Федерация. Устройство для обеззараживания атмосферного воздуха в помещении [Текст]. № 2014115041/15 ; заявл. 15.04.2014 ; опубл. 20.02.2015, Бюл. № 5. – 1 с.
6. Физические величины: Справочник [Текст] / Под. ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 133 с.
7. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве: монография [Текст] / В. Н. Хмелев, Г. В. Леонов и др. / Алтайский гос. техн. ун-т. – Бийск, 2007. – 400 с.
8. Хмелев, В. Н. Ультразвуковое распыление жидкостей: Монография [Текст] / В. Н. Хмелев, А. В. Шалунов, А. В. Шалунова / Алтайский гос. техн. ун-т. – Бийск, 2010. – 272 с.
9. Каськов, Ю. Н. Современное состояние и решение вопросов санэпидблагополучия на объектах железнодорожного транспорта России [Текст] / Ю. Н. Каськов, Ю. И. Подкорытов // Гигиена и санитария. – 2012. – № 5. – С. 37 – 40.

References

1. Kapstov V. A., Mezentsev A. P., Pankova V. B. *Proizvodstvenno-professionalniy risk gzeleznodorognikov* (Production – an occupational risk of railwaymen). Moscow: Reinfor, 2002, 287 p.
2. Khamanov I. G., Shetinin A. N. Problems of risk assessment «biological factor» for employees of JSC «Russian Railways» [Problemi otsenki riska vozdeistvia «biologicheskogo faktora» na rabotnikov «RGD»]. *Sbornik statei po materialam XXX mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsi «Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike»* (Collection of articles on materials of XXX International scientific-practical conference «Engineering – from theory to practice»). – Novosibirsk, 2014, pp. 142 – 150.
3. Khamanov I. G., Shetinin A. N. The study «biological factor» to optimize the system of protection of workers JSC «Russian Railways» [Issledovanie «biologicheskogo faktora» dlya optimi-

zatsii sistemi zashiti rabotnikov «RGD»]. *Materialy X mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Bezopasnost' zhiznedeiatel'nosti predpriiatii v promyshlennno razvitykh regionakh»* (Materials X International scientific-practical conference «Safety of enterprises in industrialized regions»). – Kemerovo, 2013, pp. 370 – 373.

4. Shetinin A. N. *Organizatsionno-fyunksionalnaya model pervichnoi profilaktiki neinfektsionnix zabolevanii y rabotnikov geleznodorognogo transporta* (Organizational and functional model of primary prevention of non-communicable diseases in railway workers). Doctor's thesis, Novosibirsk, 2006, 31 p.

5. Shetinin A. N., Khamanov I. G., Latyshov D. A., Evstegneeva A. A. *Patent RU 2014115041/15*, 2014.

6. Babichev A. P., Babushkina N. A., Bratkovskii A. M. *Fizicheskie velichini* (Physical quantities). Moscow: Energoatomizdat, 1991, 133 p.

7. Khmelev V. N., Leonov G. V., Barsykov R. V., Tsyganok S. N., Shalynov A. V. *Ultrazvykovie mnogofunksionalnie i spetsializirovannie apparati dlya intensivatsii tekhnologicheskix protsessov v promyshlennosti, selskom i domashnem khozyaistve: monografiia* (Ultrasonic multifunctional and specialized devices for intensification of technological processes in industry, agriculture and household: monograph). Biisk: ASTU, 2006, 400 p.

8. Khmelev V. N., Shalynov A. V., Shalynova A. V. *Yltrazvykovoe raspylenie gidkostej: monografiia* (Ultrasonic atomization of liquids: monograph). Biisk: ASTU, 2010, 272 p.

9. Kaskov U. N., Podkorytov U. I. Current state and addressing health and disease in railway transport in Russia [Sovremennoe sostoyanie i reshenie voprosov sanepidblagopoluchiya na obektax geleznodorognogo transporta Rossii]. *Gigiena i sanitariia – Hygiene and sanitation*, 2012, pp. 37 – 40.

УДК 629.4 (23.3:.064.5)

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ АСИНХРОННЫХ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МАШИН

Иванов Павел Юрьевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.
Ассистент кафедры «Электроподвижной состав», ИрГУПС.
E-mail: Savl.ivanov@mail.ru

Дульский Евгений Юрьевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.
Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Электроподвижной состав», ИрГУПС.
Тел.: 8-983-403-46-43.
E-mail: E.Dulskiy@mail.ru

Худонов Анатолий Михайлович

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Электроподвижной состав», ИрГУПС.
E-mail: hudonogov@irgups.ru

В данной статье представлен анализ надежности асинхронных вспомогательных машин (АВМ) типа НВА-55 электровозов серии «Ермак» по депо ст. Вихоревка (ВСЖД) и ст. Смоляниново (ДВЖД) за 2009 – 2011 гг. Выявлены наиболее слабые с точки зрения надежности узлы и проанализированы основные виды и причины неисправностей данных типов АВМ. Одной из целей исследования надежности АВМ типа НВА-55 является определение средней наработки на отказ, позволяющей предотвратить отказы в работе при организации обслуживания и ремонта, а также продлить ресурс машины. Определение объективного математического ожидания отказа АВМ для эффективного корректирования межремонтных пробегов не представляется возможным, так как отказы имеют во многом случайный и непостоянный характер.

Ключевые слова: асинхронные вспомогательные машины, надежность, изоляция, ресурс, отказ, ремонт.

STATE QUESTION RELIABILITY AND DURABILITY INSULATION INDUCTION AUXILIARY MACHINES

Ivanov Pavel Urievich

Irkutsk State Transport University (ISTU).
15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, Russia.
Assistant of the department «Electrorolling composition», ISTU.
E-mail: Savl.ivanov@mail.ru

Dulsky Evgeny Urievich

Irkutsk State Transport University (ISTU).
15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, Russia.

Ph. D., teacher of the department «Electrorolling composition», ISTU.
Phone: 8-983-403-46-43.
E-mail: E.Dulskiy @ mail.ru

Khudonogov Anatoliy Mihaylovich

Irkutsk State Transport University (ISTU).

15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, Russia.

Dr. Sci. Tech., professor of the department «Electrorolling composition», ISTU.

E-mail: hudonogov@irgups.ru

This article presents an analysis of the reliability of asynchronous auxiliary machines (AAM) type NVA-55 electric locomotives «Ermak» in custody Art. Vihorevka (East-Siberian Railway) and Art. Smolyaninovo (Far Eastern) for the 2009-2011 year. Identified the weakest in terms of reliability components and analyzes the main types and causes of these types of faults AAM. One of the research objectives reliability AAM type NVA-55 is to determine the mean time between failures that could prevent failures in the organization of maintenance and repair, as well as extend the life of the machine. Defining the objective mathematical expectation of failure AAM for effective correcting the overhaul life mileage is not possible, since failures are largely have random and not permanent.

Keywords: asynchronous auxiliary machines, reliability, insulation, resource, failure, repair.

УДК 629.45/46

ИСПЫТАНИЕ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ НА ТЕПЛОУСТОЙЧИВОСТЬ

Клюка Владислав Петрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ОмГУПС.

Тел: (3812) 31-22-84.

E-mail: vvh@omgups.ru

Стариков Александр Петрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Теплоэнергетика», ОмГУПС.

E-mail: omskstar2003@mail.ru

Кузьменко Дмитрий Юрьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.

E-mail: legolas-omsk@yandex.ru

Попов Алексей Анатольевич

Омский центр стандартизации, метрологии и сертификации.

644116, г. Омск, ул. 24-я Северная, 117а.

Кандидат технических наук, начальник отдела метрологического обеспечения и перспективного развития, Омский ЦСМ.

Тел.: (3812) 68-16-30.

В статье рассмотрен наиболее эффективный способ выявления тепловых потерь, связанных с неплотностью ограждающих конструкций. Предлагается метод по использованию аэродинамических и термодинамических исследований с возможностью применения на железнодорожном транспорте.

Ключевые слова: вагон, теплоизоляция, тепловизор, аэродинамика.

TEST PASSENGER CARS RAILWAYS TO HEAT RESISTANCE

Klyuka Vladislav Petrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., senior lecturer, head of the department «Railway cars and car enterprise», OSTU.

Phone: (3812) 31-22-84.

E-mail: vvh@omgups.ru

Starikov Alexander Petrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., associate professor, head of the department «Power system», OSTU.

E-mail: omskstar2003@mail.ru

Kuzmenko Dmitry Yurevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Post-graduate student of the department «Power system», OSTU.

E-mail: legolas-omsk@yandex.ru

Popov Alexey Anatolievich

Omsk center for standardization, metrology and certification.

117,a, 24 North st., Omsk, 644116, Russia.

Ph. D., head of the department of metrological support and long-term development of the FSI «Omsk SMC».

Phone.: (3812) 68-16-30.

In the article the most effective way to detect heat losses associated with loose-Stu walling. A method for use of aerodynamic and thermodynamic – cal research with the possibility of the use of rail transport.

Keywords: car, heat insulation, thermal imager, aerodynamics.

УДК 629

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА УЗЛОВ И ДЕТАЛЕЙ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Матяш Юрий Иванович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-72.

Сосновский Юрий Михайлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика и химия», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-53-68.

E-mail: sosnovskiyum@mail.ru

Петракова Анна Геннадьевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-72.

Показано, что в процессе эксплуатации под воздействием повышенных знакопеременных нагрузок происходит изменение физико-механических свойств металлов, которое приводит к снижению ударной вязкости. Предлагается новый подход для оценки остаточного ресурса тяжело нагруженных деталей и узлов грузовых вагонов железнодорожного транспорта на основе изучения структурных изменений металлов в процессе их эксплуатации. На основе контроля структурных изменений металлов в процессе их эксплуатации может быть создана эффективная система оценки остаточного ресурса.

Ключевые слова: диагностика, остаточный ресурс, рыхлость.

PHYSICAL AND CHEMICAL FOUNDATIONS OF ESTIMATION RESIDUAL RESOURCE COMPONENTS FREIGHT WAGONS RAILWAYS TRANSPORT

Matjash Yury Ivanovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Dr. Sci. Tech, professor of the department «Cars and Cars Economy», OSTU.

Phone: (3812) 31-06-72.

Sosnovsky Yury Mikhailovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., associate professor of the department «Physic and Chemistry», OSTU.

Phone: (3812) 31-53-68.

E-mail: sosnovskiyum@mail.ru.

Petrakova Anna Gennadyevna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., associate professor of the department «Cars and Cars Economy», OSTU.

Phone: (3812) 31-06-72.

It was shown that during operation, under the influence of high alternating loads is change of physical and mechanical properties of the metal, which leads to decrease in toughness. New method

for estimate residual resource of components freight cars railway transport is presented. This method is based on the study of structural changes metals during their exploitation. On the basis of monitoring structural changes in metals during their exploitation may be developed effective system estimate of residual resource.

Keywords: *diagnostics, residual resource, friability.*

УДК 621.001.2:629.4.023.018

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ГЛАВНОЙ РАМЫ ЭЛЕКТРОВОЗА С УЧЕТОМ УСТАНОВКИ ДЕМПФИРУЮЩЕГО ПОГЛОЩАЮЩЕГО АППАРАТА В АВТОСЦЕПКЕ

Мухамедова Зиеда Гафурджановна

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ТашИИТ).
100167, г. Ташкент, Миробадский район, Республика Узбекистан, ул. Адылходжаева, 1.
Ассистент кафедры «Транспортная логистика и сервис», ТашИИТ.
E-mail: ziyoda87@yahoo.com

В данной статье предлагается динамическая модель для численных исследований колебаний главной рамы электровоза с учетом воздействия продольных усилий, возникающих в автосцепке.

Ключевые слова: *автосцепка, демпфирующее устройство, продольные колебания, численные исследования, метод Фурье, упругие перемещения, модернизация.*

DYNAMIC MODEL FOR RESEARCH LONGITUDINAL OSCILLATIONS OF ELECTRIC LOCOMOTIVES MAIN FRAME INCLUDING INSTALLATION DAMPENS ABSORBING DEVICES IN THE COUPLER

Mukhamedova Syeda Gafurdzanovna

Tashkent institute of railway transport engineering (TashIET).
1, Adilhodjaev str., Tashkent, Mirobad region, 100167, Republik of Uzbekistan.
Assistant of the department «Transport and logistics and service», TashIET.
E-mail: ziyoda87@yahoo.com

This article presents dynamic model for numerical researches of oscillations of the main frame of an electric locomotive taking into account the impact of longitudinal efforts arising in the automatic coupler.

Keywords: *automatic coupling, damping device, the longitudinal oscillations, numerical study, Fourier method, elastic movement, modernization.*

УДК 629.4

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ЭКИПАЖ ОТ СТЫКОВ РЕЛЬСОВ

Нехаев Виктор Алексеевич

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

Доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая механика», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-16-88.
E-mail: nehaevVA@omgups.ru

Николаев Виктор Александрович

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

Доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая механика», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-16-88.
E-mail: nikolaevVA@omgups.ru

Челтыгмашев Евгений Павлович

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

Аспирант кафедры «Теоретическая механика», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-16-88.

Минжасаров Марат Хайергельдаевич

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

Аспирант кафедры «Теоретическая механика», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-16-88.

Сформирована методика исследования оценки влияния импульсного воздействия со стороны стыков рельсового пути на показатели динамических качеств железнодорожного экипажа. Получена зависимость коэффициента влияния повторности импульса от уровня диссипации энергии в системе и скорости движения экипажа.

Ключевые слова: *обобщенный экипаж, импульсное воздействие со стороны стыка рельсов модель колебаний, матрица преобразований, диссипация энергии, скорость экипажа, коэффициент повторности импульса, ускорения кузова.*

THE RESEARCH TECHNIQUE OF PULSE DISTURBANCE FROM RAIL JOINTS RAILWAY CREW

Nehaev Victor Alekseevich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Dr. Sci. Tech., professor of the departament «Theoretical mechanics», OSTU.
Phone: (3812) 31-16-88.

E-mail: nehaevVA@omgups.ru

Nikolaev Victor Aleksandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Dr. Sci. Tech., professor of the departament «Theoretical mechanics», OSTU.
Phone: (3812) 31-16-88.

E-mail: nikolaevVA@omgups.ru

Cheltygmashev Eugene Pavlovich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Post-graduate of the department «Theoretical mechanics», OSTU.
Phone: (3812) 31-16-88.

Minzhasarov Marat Khajergeldajevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Post-graduate of the department «Theoretical mechanics», OSTU.

Phone: (3812) 31-16-88.

Formed research methodology of assessing the impact of pulsed exposure with the one-hundred-Rhone joints of rails on the performance of the dynamic characteristics of the train crew. The dependence of the coefficient of the effect of pulse repetition on the level of energy dissipation in the system and the speed of the crew.

Keywords: *generalized crew, the current pulse from the junction ryul-Sov model of oscillations, the transformation matrix, energy dissipation, speed of the crew, co-factor pulse repetition, acceleration of the body.*

УДК 629.424:621.001.5

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ФИЛЬТРА МАСЛЯНОЙ СИСТЕМЫ ДИЗЕЛЯ

Овчаренко Сергей Михайлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Доктор технических наук, ректор университета, заведующий кафедрой «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-34-17.

Денисов Игорь Николаевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-34-17.

Минаков Виталий Анатольевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Преподаватель кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-34-17.

Надежность работы тепловозного дизеля в основном определяется надежностью работы деталей цилиндрично-поршневой группы и кривошипно-шатунного механизма. Качественная очистка моторного масла в процессе эксплуатации от механических примесей, обеспечиваемая фильтрами грубой и тонкой очистки и центробежными фильтрами, снижает скорость износа деталей. В статье приведены результаты моделирования работы центробежного фильтра, позволяющие оценить эффективность его работы и качество отсева частиц разных размеров в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: *тепловозный дизель, очистка моторного масла, масляные фильтры, центробежный фильтр, эффективность работы дизеля.*

CALCULATION OF SETTINGS CENTRIFUGAL FILTER OF DIESEL OIL SYSTEM

Ovcharenko Sergey Mikhailovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Dr. Sci. Tech., rector, head of the department «Locomotives», OSTU.

Phone: (3812) 31-34-17.

Denisov Igor Nikolaevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Post-graduate student of the department «Locomotives», OSTU.

Phone: (3812) 31-34-17.

Minakov Vitaliy Anatolievich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Teacher student of the department «Locomotives», OSTU.

Phone: (3812) 31-34-17.

The reliability of diesel engines is mainly determined by the reliability of operation parts of the cylinder-piston group and crank mechanism. High-quality cleaning of engine oil during operation of mechanical impurities, provided filters coarse, fine filter and centrifugal filter, reduces the rate of wear and tear. The results of simulation of a centrifugal filter to assess its efficiency and the quality of screenings of particles of different sizes in the process of exploitation.

Keywords: *diesel locomotive engines, clean motor oil, oil filters, centrifugal filters, the efficiency of the diesel engine.*

УДК 620.192.63

ТЕСТИРОВАНИЕ МЕЖВИТКОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ЯКОРНОЙ ОБМОТКИ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПО МЕТОДУ ВОЛНОВОГО ОТКЛИКА

Харламов Виктор Васильевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru.

Шкодун Павел Константинович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru.

Шестаков Игнат Валентинович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru.

Целью работы, результаты которой приведены в данной статье, является установление пригодности метода волнового отклика для диагностирования межвитковой изоляции якорной обмотки тягового электродвигателя постоянного тока, а также разработка адекватной модели тестируемой обмотки для последующего исследования сложных физических процессов, происходящих в процессе диагностирования. В статье приведена методика фиксации волновой затухающей характеристики (отклика) в якорной обмотке электродвигателя постоянного тока. Предложена схема замещения якорной обмотки применительно к рассматриваемому методу диагностирования. Приведен волновой отклик, полученный экспериментально при испытаниях на физической модели. Представлен волновой отклик, полученный при моделировании эксперимента в программной среде MATLAB. Выполнен анализ результатов реального и имитационного моделирования, который позволяет судить об адекватности предложенной схемы замещения якорной обмотки. Впоследствии данная схема замещения будет использована для имитационного моделирования поврежденной изоляции тягового электродвигателя применительно к методу волнового отклика.

Ключевые слова: *метод волнового отклика, диагностирование межвитковой изоляции, имитационное моделирование, волновые затухающие колебания, схема замещения.*

TRACTION ENGINES TURN-TO-TURN ARMATURE COIL INSULATION TESTING PROCESS USING THE METHOD OF WAVE RESPONSE READOUT

Harlamov Victor Vasilevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Dr. Sci. Tech., professor, head of the department «Electrical machines and common electro-technic», OSTU.

Phone: (381-2) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru.

Shkodun Pavel Konstantinovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., senior lecturer of the department «Electrical machines and common electrotechnic», OSTU.

Phone: (381-2) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru.

Shestakov Ignat Valentinovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Post-graduate student of the department «Electrical machines and common electrotechnic», OSTU.

Phone: (381-2) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru.

The article deals with the suitability of wave response method aptitude for traction engines turn-to-turn armature coil insulation testing and development of testing coil adequate model for further researching of physical processes occurring while testing. The method of wave response readout in armature coil reported is described in the article. The equivalent circuit of armature coil relating to wave response method is given. The wave responses got during physical model testing, simulating in MATLAB are shown. The real and simulating results analysis allows you to approve the proposed equivalent circuit adequacy. This equivalent circuit may be used for simulating of traction engines insulation fails relating to wave response method.

Keywords: wave response method, turn-to-turn armature coil insulation testing, simulating, wave damped oscillations, equivalent circuit.

УДК 621.313

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛОВИЗИОННОГО МЕТОДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЗОНЕ КОЛЛЕКТОРНО-ЩЕТОЧНОГО УЗЛА ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Хлопцов Андрей Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru

Долгова Анна Владимировна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Информатика, прикладная математика и механика», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-18-27.

E-mail: pmm@omgups.ru

Ахунов Данил Асгатович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru

Целью работы, результаты которой приведены в данной статье, является выявление эффективного диагностического параметра процесса нагрева в зоне коллекторно-щеточного узла тягового электродвигателя подвижного состава. В статье предложена развернутая эквивалентная тепловая схема замещения коллекторно-щеточного узла тягового электродвигателя. Проведен эксперимент на лабораторной установке согласно теории планирования эксперимента при центральном ротатабельном плане второго порядка с анализом полученных результатов. Предложена методика обработки результатов термографического исследования машины. Составлены уравнения регрессии, отражающие степень влияния параметров режимов работы машины на интенсивность нагрева в зоне коллекторно-щеточного узла тягового электродвигателя. Корректность использования математиче-

ского аппарата подтверждается количественным расчетом t -критерия Стьюдента при оценке значимости коэффициентов уравнений и F -критерия Фишера для 5 % уровня значимости. Результаты исследования могут быть использованы для дополнения методики диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла тягового электродвигателя.

Ключевые слова: тяговый двигатель, термографические исследования, температура, коллекторно-щеточный узел, диагностирование, критерий значимости.

THE THERMOVISION METHOD APPLICATION FOR THE DC TRACTION MOTOR COLLECTOR-BRUSH UNIT AREA THERMAL PROCESSES RESEARCH

Khloptsov Andrey Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Post-graduate student of the department «Electrical machines and common electrotechnics», OSTU.

Phone: (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru

Dolgova Anna Vladimirovna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., senior lecturer of the department «Informatics, applied mathematics and mechanics», OSTU.

Phone: (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru

Ahunov Danil Asgatovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., senior lecturer of the department «Electrical machines and common electrotechnics», OSTU.

Phone: (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru

The aim of the work, the results of which are presented in this article, is to identify effective parameter of the heating process in the collector-brush unit of DC traction motor. The article suggests a detailed equivalent thermal equation of DC traction collector-brush unit. An experiment in a laboratory according to the theory of experimental design in the central rotatable terms of the second order are held, and the analysis of the results are presented. A method for processing the results of thermographic study of the machine is described. The regression equation, reflecting the degree of influence of the mode parameters of the machine on the intensity of the heating area of traction motor collector-brush unit, is compiled. The correct use of mathematical apparatus is confirmed by quantitative calculations Student's criteria assessing the significance of the coefficients of equations and F-Fisher criterion within the 5 % significance level. The results can be used to supplement the methods of DC traction motors and collector-brush unit technical condition diagnostics.

Keywords: traction motor, thermographic studies, temperature, collector-brush unit, diagnosis, significance test.

УДК 629.4.02

ОСОБЕННОСТИ ТОКОСЪЕМА В КОЛЛЕКТОРНО-ЩЕТОЧНОМ УЗЛЕ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВЗОВ 2ЭС6

Шантаренко Сергей Георгиевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Доктор технических наук, доцент, проректор по научной работе, заведующий кафедрой «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-13-44.

E-mail: nauka@omgups.ru

Кузнецов Виктор Федорович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Высшая математика», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-18-11.

Юрасов Олег Дмитриевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-18-11.

E-mail: yurasov_oleg@mail.ru

Работа коллекторно-щеточного узла во многом влияет на эксплуатационную надежность тяговых электродвигателей постоянного тока. В статье приведены результаты моделирования контактного взаимодействия «щетка – коллектор» в тяговом электродвигателе электровоза 2ЭС6. Рассмотрено влияние конструктивных особенностей щеткодержателя, условий и режимов эксплуатации на качество коммутации ТЭД. На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований предложены рекомендации по повышению качества контакта «щетка – коллектор» и обеспечению эксплуатационной надежности тяговых электродвигателей.

Ключевые слова: щеткодержатель, математическая модель, реверс, контактирующая пара «щетка – коллектор», тяговый электродвигатель.

FEATURES CURRENT COLLECTION IN THE COLLECTOR-BRUSH UNIT TRACTION MOTORS ELECTRIC LOCOMOTIVES 2ES6

Shantarenko Sergey Georgievich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Dr. Sci. Tech., associate professor, vice-rector for research, head of the department «Technology of transport engineering and repair rolling stock», OSTU.

Phone: (3812) 31-13-44.

E-mail: nauka@omgups.ru

Kuznetsov Viktor Fedorovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., associate professor of the department «Higher mathematics», OSTU.

Phone: (3812) 31-18-11.

Yurasov Oleg Dmitrievich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Post-graduate student of the department «Technology of transport engineering and repair rolling stock», OSTU.

Phone: (3812) 31-18-11.

E-mail: yurasov_oleg@mail.ru

Work collector-brush assembly largely affects the operational reliability of the DC traction motors. The article presents results of the simulation of contact interaction «brush-collector» in the 2ES6 electric locomotive traction motors. Reviewed influence of the design features of the brush holder, conditions and modes of operation on the quality of switching traction motors. On the basis of theoretical and experimental studies offered recommendations to improve the quality of contact «brush-collector» and to ensure the operational reliability of the traction motors.

Keywords: brush holder, mathematical model, reverse, contacting a pair of «brush-collector», the drive motor.

УДК 629.424.14.004:621.436

РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ТОПЛИВОПОДАЧИ ТЕПЛОВОЗНОГО ДИЗЕЛЯ НА МАЛОВЯЗКОМ ТОПЛИВЕ

Ведрученко Виктор Родионович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-23.

E-mail: VedruchenkoVR@omgups.ru

Крайнов Василий Васильевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

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

Тел.: (3812) 31-06-23.

E-mail: KrainovVV@omgups.ru

Жданов Николай Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

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

Тел.: (3812) 31-06-23.

Выполнен анализ способов расчета топливоподачи в дизелях, учитывающих свойства топлива. Предложена методика, позволяющая расчетом оценить влияние физических и энергетических свойств на мощность и экономические показатели дизельного двигателя. Сформулированы условия эффективной работы дизеля на маловязких сортах и марках топ-

лива, включающие в себя как регулировочные, так и конструктивные изменения в системах топливоподачи.

Ключевые слова: топливо, топливоподача, дизель, впрыск.

ABOUT CALCULATING OF FUEL SUPPLY PROCESS IN LOCOMOTIVE DIESELS WORKING ON LOW-VISCOSITY FUELS

Vedruchenko Viktor Rodionovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Dr. Sci. Tech., professor of the department «Power system», OSTU.

Phone: (3812) 31-06-23.

E-mail: VedruchenkoVR@omgups.ru

Krajnov Vasily Vasilevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., associate professor of the department «Power system», OSTU.

Phone: (3812) 31-06-23.

E-mail: KrainovVV@omgups.ru

Jdanov Nikolay Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., associate professor of the department «Power system», OSTU.

Phone: (3812) 31-06-23.

The analyze of fuel supplying methods in diesels with respect of fuel properties was implemented. The new method was suggested, which can estimate impact of physical and energy fuel properties on power and economic indexes of a diesel. The diesel effective work conditions on low-viscosity fuels are formulated, including regulation and constructive changes in fuel supply system.

Keywords: fuel, fuel supply, diesel engine, injection.

УДК 004.942

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТРУКТУР НЕЧЕТКОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ В СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Гателюк Олег Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Высшая математика», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 44-23-57.

E-mail: GatelukOV@omgups.ru

Комяков Александр Анатольевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 44-39-23.

E-mail: tskom@mail.ru

Эрбес Виктор Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 44-39-23.

E-mail: erbes-viktor@mail.ru

В настоящее время нечеткие нейронные сети нашли широкое применение при моделировании сложных производственных процессов. В статье рассмотрено применение нечеткой логики для формирования математической модели электропотребления на железнодорожном транспорте на примере тяговой подстанции Дорогино. Представлен алгоритм выбора структуры нечеткой нейронной сети, в том числе вида и количества функций принадлежности на входе и количества циклов обучения. Выполнен сравнительный анализ полученных структур путем оценки средней квадратической ошибки.

Ключевые слова: нечеткие нейронные сети, система тягового электроснабжения, функция принадлежности, средняя квадратическая ошибка.

COMPARATIVE ANALYSIS OF FUZZY NEURAL NETWORK STRUCTURES FOR FORMATION MODEL OF ELECTRICITY CONSUMPTION IN THE TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM

Gatelyuk Oleg Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., the senior lecturer of the department «Higher mathematics», OSTU.

Phone: (3812) 44-23-57.

E-mail: GatelukOV@omgups.ru

Komyakov Alexandr Anatolievich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., the senior lecturer of the department «Theoretical the electrical engineer», OSTU.

Phone: (3812) 44-39-23.

E-mail: tskom@mail.ru

Erbes Viktor Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

The post-graduate student of the department «Theoretical the electrical engineer», OSTU.

Phone: (3812) 44-39-23.

E-mail: erbes-viktor@mail.ru

Nowadays fuzzy neural networks are widely used for modeling of complex industrial processes. The paper considers the application of fuzzy logic to generate a mathematical model of electricity consumption in rail transport for example, traction substation Dorogino. Algorithm for choice of

the structure of fuzzy neural network including the species and number of membership functions for input and the number of training cycles is presented. Comparative analysis of the structures by evaluating the mean square error is made.

Keywords: *fuzzy neural network, traction power system, root mean squared error, membership function.*

УДК 621.372.21: 681.3.068

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В КОНТАКТНОЙ СЕТИ И ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Ковалева Татьяна Владимировна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-88.

E-mail: tatevgeniy@list.ru

Пашкова Наталья Викторовна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-88.

E-mail: nvp78@mail.ru

Контактная сеть и линии электропередачи, являющиеся составными частями системы электроснабжения железных дорог, с точки зрения электротехнических расчетов представляют собой цепи с распределенными параметрами. Волновые процессы в контактной сети оказывают отрицательное влияние на электрические линии передачи энергии, проложенные вблизи от железной дороги, увеличивают потери электроэнергии в системе тягового электроснабжения. Для исследования волновых процессов предложен способ математического моделирования прохождения несинусоидальных сигналов по однородной двухпроводной линии с распределенными параметрами. Математическая модель построена на основе известных дифференциальных уравнений линии (телеграфных уравнений) с использованием рядов Фурье. Линия электропередачи представляет собой трехпроводную линию. В статье представлен алгоритм приведения уравнений линии электропередачи к виду уравнений двухпроводной линии. Для оценки корректности математической модели проведены исследования на физической модели линии. Приведены результаты исследования различных режимов работы цепей с распределенными параметрами с помощью математической модели. Предложенный способ математического моделирования прохождения сигналов различной формы по линии с распределенными параметрами адекватно отражает явления, происходящие в линии, и может применяться для анализа электромагнитных процессов в контактной сети и линиях электропередачи.

Ключевые слова: *волновые процессы, линия электропередачи, цепь с распределенными параметрами, ряды Фурье, волновое сопротивление, коэффициент распространения.*

THE WAVE PROCESSES STUDY IN THE OVERHEAD SYSTEM AND POWER LINES

Kovaleva Tatiana Vladimirovna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., the senior lecturer of the department «Theoretical the electrical engineer», OSTU.

Phone: (3812) 31-06-88.

E-mail: tatevgeniy@list.ru

Pashkova Natalia Viktorovna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., the senior lecturer of the department «Theoretical the electrical engineer», OSTU.

Phone: (3812) 31-06-88.

E-mail: nvp78@mail.ru

According to electric calculations, the overhead system and power lines being the part of the railway power supply are distributed parameters circuits. Wave processes in the overhead system have a negative impact on the power supply lines, laid in the vicinity of the railway, and increase the power losses in the traction power supply system. For the study of wave processes the method of mathematical modeling of non-sinusoidal signals transmission to the uniform two-wire distributed parameters line is provided. The mathematical model is based on the well-known line differential equations (telegraph equations) using Fourier series. The power line is a three-wire line. The paper presents an algorithm to bring the power line equations to the form of two-wire line equations. To assess the correctness of the mathematical model the research was carried out on the physical model of the line. Using the mathematical model there were given the findings of distributed parameters circuits various modes. The proposed method of mathematical modeling of different shape signals transmission to the distributed parameters line adequately reflects the phenomena occurring in the line and can be used for the analysis of electromagnetic processes both in the overhead system and power lines.

Keywords: wave processes, power line, distributed parameters line, Fourier series, impedance, coefficient of distribution.

УДК 621.331.5

ВЫБОР МОЩНОСТИ И МЕСТА РАЗМЕЩЕНИЯ УСТРОЙСТВ ПОПЕРЕЧНОЙ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Кондратьев Юрий Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-34-46.

E-mail: juvk.omgups.egt@mail.ru

Тарасенко Александр Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-34-46.

E-mail: alessandro-tar@yandex.ru

Крупномасштабные инвестиционные проекты ОАО «РЖД» по увеличению грузооборота предполагают увеличение нагрузки на существующие участки электрифицированных железных дорог, в связи с чем актуальной является проблема обеспечения пропускного количества пар поездов по участкам железных дорог. Электропотребление на железных дорогах переменного тока характеризуется достаточно высоким потреблением реактивной мощности, обусловленным спецификой электроподвижного состава переменного тока, что приводит к повышенному уровню потерь напряжения и мощности и, как следствие, к снижению энергетической эффективности и потенциальной пропускной и провозной способности железных дорог. Одним из наименее капиталоемких, а в некоторых случаях и единственно возможным рациональным способом усиления системы тягового электроснабжения переменного тока является использование устройств поперечной компенсации реактивной мощности. В статье рассмотрена методика определения мощности и выбора места размещения на участке железной дороги регулируемых и нерегулируемых устройств поперечной компенсации реактивной мощности в системах тягового электроснабжения 25 кВ и 2×25 кВ. Приведены расчет входного индуктивного сопротивления системы внешнего и тягового электроснабжения, основные варианты схем питания и секционирования тяговой сети и размещения устройств поперечной компенсации реактивной мощности, проверка обеспечения минимального уровня напряжения на токоприемнике электроподвижного состава. Результаты работы могут быть использованы как при проектировании новых участков железной дороги, так и при решении вопросов увеличения пропускной способности участков, находящихся в эксплуатации.

Ключевые слова: *тяговое электроснабжение, реактивная мощность, устройство компенсации, параметры, место размещения.*

THE POWER SELECTION AND PLACEMENT OF DEVICES CROSS-REACTIVE POWER COMPENSATION

Kondratyev Yuri Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., associate professor of the department «Power supply of rail transport», OSTU.

Phone: (3812) 31-34-46.

E-mail: juvk.omgups.egt@mail.ru

Tarassenko Aleksandr Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., associate professor of the department «Power supply of rail transport», OSTU.

Phone: (3812) 31-34-46.

E-mail: alessandro-tar@yandex.ru

Global investment projects of JSC "Russian Railways" to increase turnover suggest an increase in the load on the existing areas of electrified railways, in connection with what is urgent problem of passing the required number of pairs of trains at railway stations. Electricity consumption in railways AC characterized by a rather high consumption of reactive power due to the specifics of

electric rolling alternating current, which leads to increased levels of stress and loss of power and, consequently, reduce the energy efficiency and the potential capacity and carrying capacity of the railways. One of the least capital-intensive, and in some cases the only possible rational way to strengthen the system of traction power supply AC is the use of transverse devices for reactive power compensation. The article describes the method of determining the power and choice of accommodations in the area of the railway regulated and unregulated devices transverse reactive power compensation systems, traction power supply 25 kV and 2×25 kV. The calculation of the input impedance of the external inductance and traction power supply, the main options for power supply circuits and sectioning traction network devices and placing transverse compensation of reactive power, check to ensure a minimum level of voltage at the pantograph of electric rolling stock. The results can be used as the design of new railway sections, and in dealing with increasing the capacity of sites in operation.

Keywords: *traction power, reactive power, compensation device, the parameters, placement.*

УДК 621.311:621.331

МОНИТОРИНГ ВЫПОЛНЕНИЯ НОРМ УДЕЛЬНОЙ РЕКУПЕРАЦИИ В ГРАНИЦАХ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ЗОНЫ МОНИТОРИНГА УЧАСТКА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Незевак Владислав Леонидович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник научно-производственной лаборатории «Энергосберегающие технологии и электромагнитная совместимость», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 44-39-23.

E-mail: NezevakWL@mail.ru

Шатохин Андрей Петрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант, инженер-проектировщик научно-производственной лаборатории «Энергосберегающие технологии и электромагнитная совместимость», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 44-39-23.

E-mail: Shatohin_ap@mail.ru

В статье рассматривается проблема повышения эффективности рекуперативного торможения на участках железных дорог постоянного тока. Для выявления причин снижения уровня удельной рекуперации на участке предлагается алгоритм, позволяющий определять причины снижения уровня удельной рекуперации на произвольном участке мониторинга с учетом определения работоспособности локомотива, параметров работы системы тягового электроснабжения и исполненного графика движения поездов. Рассмотрены основные этапы работы алгоритма на примере одного из участков железной дороги.

Ключевые слова: *рекуперативное торможение, локомотив, система тягового электроснабжения, график движения, удельная рекуперация, система мониторинга.*

THE MONITORING OF THE EXECUTION OF THE SPECIFIC REGENERATION'S NORMS WITHIN THE AMBIT OF THE ARBITRARY MONITORING'S AREA OF THE DC AREA

Nezevak Vladislav Leonidovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., assistant professor, senior staff scientist of research-and-production laboratory «Energy-efficient technologies and electromagnetic compatibility», OSTU.

Phone: (3812) 44-39-23.

E-mail: NezevakWL@mail.ru

Shatokhin Andrew Petrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Post-graduate student, designing engineer of research-and-production laboratory «Energy-efficient technologies and electromagnetic compatibility», OSTU.

Phone: (3812) 44-39-23.

E-mail: Shatokhin_ap@mail.ru

The article discusses a problem of the efficiency of the regenerative braking's increase on the DC railway section. For the detection of the causes of the decrease of the specific regeneration's level on the area an algorithm is offered, which enables to determine the causes of the decrease of the specific regeneration's level on the arbitrary monitoring's area in view of the determination of the locomotive's capacity for work, work parameters of the electric traction system and the executed graphic time-table. In the article the main phases of the algorithm's work were considered by the example of the one of the railway sections.

Keywords: regenerative braking, locomotive, traction power supply system, the timetable, the specific recovery monitoring system.

УДК 621.332:621.315

ОЦЕНКА УСЛОВИЙ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ ЗАЗЕМЛЕНИЯ НА РЕЛЬС УСТРОЙСТВ ТЯГОВОЙ СЕТИ В УСЛОВИЯХ ПРИМЕНЕНИЯ ИЗОЛИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ КАПИТАЛЬНОМ РЕМОНТЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОЛОТНА

Скоков Руслан Борисович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

E-mail: skokovrb@ya.ru

Кремлев Иван Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

E-mail: ivkreml@mail.ru

Тарабин Игорь Валерьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

E-mail: igor_tarabin@mail.ru

Терёхин Илья Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант ОмГУПС.

E-mail:terekhin_ilya@mail.ru

В настоящее время при капитальном ремонте железнодорожного полотна используются новые материалы, которые вносят существенные изменения в электрическую структуру балластной призмы, существенно повышая переходное сопротивление «рельс – земля» и, как следствие, потенциал рельсов относительно удаленной земли. В статье предложена методика оценки условий электробезопасности заземления на рельс устройств тяговой сети при капитальном ремонте железнодорожного полотна, подтверждена высокая опасность поражения электрическим током устройств, присоединенных к тяговому рельсу.

Ключевые слова: *контактная сеть, заземление, рельсовая сеть, потенциал, сопротивление рельсов, электробезопасность, замыкание.*

EVALUATION OF ELECTRICAL GROUND FOR RAIL TRACTION NETWORK DEVICES IN THE APPLICATION INSULATING MATERIALS AT MAJOR RAILWAY REPAIRS

Skokov Ruslan Borisovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., assistant professor of the department «Electricity railway transport», OSTU.

E-mail: skokovrb@ya.ru

Kremlev Ivan Alexandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., assistant professor of the department «Electricity railway transport», OSTU.

E-mail: ivkreml@mail.ru

Tarabin Igor Valeryevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., assistant professor of the department «Electricity railway transport», OSTU.

E-mail: igor_tarabin@mail.ru

Terekhin Ilya Alexandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Post-graduate student of OSTU.

E-mail:terekhin_ilya@mail.ru

Recently, during overhaul of the railway track using modern materials such as geotextiles and penoplex. In turn, they make significant changes to the structure of the ballast, t. To. Are almost insulators. OSTU experimentally it has been ascertained that the contact resistance in the case of using a new type of cloth can be raised to 45 – 150 $\Omega \cdot \text{km}$. Obviously, this leads to a significant increase in the capacity of the rail relative to a distant ground and can cause injury to personnel operating the traction members network.

To determine the capacity of the rail at any point area must take into account the redistribution of power in the elements of the rail network, ie. E. In the rail and the transition resistance «rail – the land». The rail network is characterized by longitudinal rails Z_p kilometricheskim resistance, transition resistance «rail – land» r_p -s, and the characteristic impedance Z_B kilometricheskim spreading factor γ rail network.

Analysis of the results lead to the following conclusions:

1) contact resistance «rail-to-earth» has a significant impact on the value of the potentials arising on the elements of reverse current flow circuit;

2) the growth of the resistance «rail-to-earth», associated with seasonal fluctuations in soil resistivity, as well as in recent times, with the capital reconstruction of the roadbed, resulting in a significantly longer (up to several tens of kilometers) area, for which the potential can reach hazardous the value of human life;

3) in the circuit mode on a rail (m. E. When a metal short circuit) almost always rail network will occur potentials exceeding admissible values for several kilometers in both directions from the point of fault, which leads to removal of the dangerous potential at all metal construction connected with the rail and therefore requires a review of the principles of grounding structures.

Keywords: contact network, grounding resistance spreading, rail network capacity, the resistance of the rails, electrical, circuit.

УДК 621.331:621.311

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИЧИН УЩЕРБА И ОТВЕТСТВЕННЫХ ЗА НЕГО УЧАСТНИКОВ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА ПРИ НЕВЫПОЛНЕНИИ ЛОКОМОТИВНОЙ БРИГАДОЙ УДЕЛЬНОЙ НОРМЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПОЕЗДКУ

Черемисин Василий Титович

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

Доктор технических наук, профессор, директор НИИ энергосбережения на железнодорожном транспорте, заведующий кафедрой «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-34-19.

E-mail: cheremisinvt@gmail.com

Истомин Станислав Геннадьевич

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

Аспирант кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 44-39-23.

E-mail: istomin_sg@mail.ru

В статье рассмотрены мероприятия по повышению энергоэффективности перевозочного процесса. Обоснована необходимость создания автоматизированной системы мони-

торинга энергетической эффективности работы электроподвижного состава. Приведен алгоритм, позволяющий определять причины невыполнения локомотивной бригадой удельной нормы электроэнергии на поездку. Разработаны формы протоколов, отражающих информацию по потерям электроэнергии по итогам поездки с указанием времени и места их возникновения.

Ключевые слова: электроподвижной состав, автоматизированная система учета электроэнергии, мониторинг энергоэффективности перевозочного процесса, протоколы о непроизводительных потерях электрической энергии.

DEVELOPMENT ALGORITHM FOR DETERMINING CAUSE OF THE DAMAGE AND RESPONSIBILITY FOR PARTICIPANTS OF THE TRANSPORTATION PROCESS AT UNSATISFIED LOCOMOTIVE CREWS SPECIFIC NORMS POWER TO TRAVEL

Cheremisin Vasily Titovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Dr. Sci. Tech., professor, director of energy research Institute of railway transport, head of department «Rolling stock electric railways», OSTU.

Phone: (3812) 31-34-19.

E-mail: cheremisinvt@gmail.com

Istomin Stanislav Gennadevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

The post-graduate student of the department «Rolling stock of electric railways», OSTU.

Phone: (3812) 44-39-23.

E-mail: istomin_sg@mail.ru

The article deals with measures to improve the energy efficiency of the transportation process. The necessity of creation of an automated system for monitoring the energy efficiency of the electric rolling stock. The algorithm, which allows to determine the reasons for non-locomotive crew specific rules of electricity on the trip. Developed form of protocols, reflecting the information on losses of electricity on the basis of a trip with the time and place of their origin.

Keywords: rolling stock, automatic electric power measuring system, traction process efficiency monitoring, protocols of unproductive losses of electricity.

УДК 621.316.97

ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЗАДАЧАХ РАСПОЗНАВАНИЯ

Леденёв Максим Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант кафедры «Инфокоммуникационные системы и информационная безопасность», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-94.

В статье рассмотрен программный модуль обработки изображений, позволяющий повысить качество контурного анализа изображения, распознавания и оценки графических образов, неоднородностей различного вида. Применение программного модуля позволит повысить достоверность оценки состояния внутренней поверхности замкнутых емкостей в условиях отсутствия доступа для контроля.

Ключевые слова: повреждение, диагностика, визуальный метод, распознавание образов, метод Фримена, автоматизация, дефектоскопия, гистограмма яркости, качество изображения.

SOFTWARE MODULE OF IMPROVING QUALITY OF IMAGES IN RECOGNITION PROBLEMS

Ledenev Maxim Aleksandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Post-graduate of the department «Information and communication systems and information security», OSTU.

Phone: (3812) 31-06-94.

The article describes a software module of the initial image processing which allows to perform the contour image analysis in order to find, recognize and evaluate graphic images of various types of inhomogeneities. Application of software module will improve the accuracy of the evaluation of the internal surface of closed vessels in the absence of access control.

Keywords: damage, diagnostics, visual method, pattern recognition, Freeman's method, automation, flaw detection, luminance histogram, quality of image.

УДК 625.144.5:625.173.2/5

ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВЫПРАВочно-ПОДБИВочно-РИХТОВОчных МАШИН ЦИКЛИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Базилевич Светлана Викторовна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

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

Тел.: +7-906-991-61-65.

E-mail: bcv65@mail.ru

Зайцев Александр Васильевич

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).

630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191.

Старший преподаватель кафедры «Подъемно-транспортные, путевые, строительные и дорожные машины», СГУПС.

E-mail: zaitsev.zaw@yandex.ru

Кузнецов Сергей Михайлович

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).

630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология, организация и экономика строительства», СГУПС.

E-mail: ksm56@yandex.ru

Разработаны модели комплексных организационно-технологических показателей эксплуатации выправочно-подбивочно-рихтовочных машин циклического действия на примере ВПР-02 и ВПРС-02 с использованием вероятностной оценки надежности их работы. Для ее обоснования проводились два этапа проверки: логическая и математическая. После формирования выборки в соответствии с ГОСТ 8.207-76 проверялась ее принадлежность закону нормального распределения с помощью критерия согласия Пирсона. Далее рассчитывались надежность и риск незавершения запланированного объема работ машинными системами, комплексами, комплектами и отдельными машинами в планируемый промежуток времени.

Модели созданы на основе баз фактических натуральных испытаний, технических и экономических показателей машин, комплектов и систем в реальных условиях работы. Данные модели способствует оптимизации путевых работ с заданной надежностью при строительстве, всех видах ремонта и текущем содержании железнодорожного пути, а также дают возможность определения более рациональных режимов эксплуатации путевых машин для выправки, подбивки и рихтовки железнодорожного пути, что способствует повышению годовых выработок данных машин. Они дают возможность организациям, эксплуатирующим данные машины, более обоснованно рассчитывать требуемое количество машин, энергоемкость технологических процессов путевых работ, их стоимость и трудоемкость.

Предложенные модели метода количественной оценки технической надежности работы выправочно-подбивочно-рихтовочных машин позволяют прогнозировать основные комплексные организационно-технологические показатели работы конкретной машины еще на стадии проектирования технологических процессов путевых работ. Этот метод является универсальным и его можно использовать для оценки технической надежности любых машинных систем, комплектов и отдельных машин.

Ключевые слова: организационно-технологические показатели, выправочно-подбивочно-рихтовочная машина, железнодорожный транспорт, критерий Пирсона, рациональный режим эксплуатации путевых машин, надежность строительства, проектирование технологических процессов путевых работ, метод количественной оценки.

ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF OPERATION OF BEARING RAILWAY TRACK MACHINES CYCLIC ACTION

Bazilevich Svetlana Viktorovna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

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

Phone: +7-906-991-61-65.

E-mail: bcv65@mail.ru

Zaytsev Alexander Vasilievich

Siberian State Transport University (SSTU).

191, st. D. Kovalchuk, Novosibirsk, 630049, Russia.

Engineer master, senior lecturer of the department «Lifting-transport, travel, construction and road machines», SSTU.

E-mail: zaitsev.zaw@yandex.ru

Kuznetsov Sergey Mikhailovich

Siberian State Transport University (SSTU)

191, st. Dusi Kovalchuk, Novosibirsk, 630049, Russia

Ph. D., associate professor of the department «Technology, organization and economics of construction», SSTU.

E-mail: ksm56@yandex.ru

The models of complex organizational and technological parameters of operation of liner-straightening machines cyclic action on the example of the VPR-02 and VPRS-02 using a probabilistic assessment of the reliability of their work. For her study conducted two etapa checks: logical and mathematical. After sampling in accordance with GOST 8.207-76 inspect it belongs-rise normal distribution using Pearson's chi-squared test. Next calculated reliability and risk completion of the planned scope of work machine systems, complexes, components and individual machines in the planned period of time.

The models are based on actual field tests of databases, technical and economic indicators of machines, components and systems in real operating conditions. This model optimizes track works with a given reliability at stave-builder, all kinds of repair and current maintenance of railway track. And also give the opportunity to the WHO-define more rational modes of operation of track machines for you, edits, tamping and straightening the railway line, thereby increasing pa O-workings of these machines. They enable organizations operating these machines more reasonably expect the required number of cars processes track works, their cost and labor.

The proposed method models quantify the technical reliability of the liner-straightening machines; allow predicting the main complex organizational and technological performance of a particular machine at the design stage of technological processes track works. This method is versatile and can be used to evaluate the technical reliability of any machine systems, components and separate machines.

Keywords: organizational and technological indicators, liner-tamping-straightening machine, rail transport, Pearson criterion, rational mode of operation of track machines, the reliability of construction, designing of technological processes of track work, a method for quantitative evaluation.

УДК 331

ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ К ПОНЯТИЮ «БИОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКТОР» ПРИМИНИТЕЛЬНО К ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМУ ТРАНСПОРТУ

Хаманов Иван Геннадьевич

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).

630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191.

Аспирант кафедры «Безопасность жизнедеятельности», СГУПС.

E-mail: Ivanjimm@rambler.ru

Щетинин Александр Николаевич

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).

630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191.

Доктор медицинских наук, профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности», СГУПС.

E-mail: anshchetinin@ngs.ru

Евстегнеева Александра Александровна

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).

630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191.

Студентка кафедры «Безопасность жизнедеятельности», СГУПС.

E-mail: evstegneeva-aleksandra@rambler.ru

Данная статья посвящена вопросам, касающимся производственно-профессионального риска воздействия «биологического фактора» на работников железнодорожного транспорта. В статье приведены результаты работы, цель которой заключалась в совершенствовании системы охраны труда на железнодорожном транспорте при воздействии на работников патогенных микро- и макроорганизмов. На основании материала, полученного в ходе изучения нормативных документов существующей системы санитарно-гигиенической оценки условий труда и многолетней практической деятельности в этой области, представлены основные методологические трудности при оценке «биологического фактора». Сформулирован термин «биологический фактор», обоснована необходимость оценки риска воздействия этого вредного фактора, расширен перечень источников и профессиональных групп работников железнодорожного транспорта, потенциально подверженных воздействию «биологического фактора». Применительно к железнодорожному транспорту, обоснована необходимость разработки дополнительных средств защиты и профилактики для снижения риска воздействия этого вредного производственного фактора, представлено устройство, разработанное для этих целей. Принцип действия устройства основан на комплексном использовании способов ультразвукового воздействия и ионизации с целью обеззараживания атмосферного воздуха в помещениях железнодорожных вокзалов, автовокзалов, станций метрополитена. По результатам детального изучения нормативной документации в области перевозки опасных грузов железнодорожным транспортом, действующей на территории Российской Федерации, выявлены основные существующие проблемы и пути их решения, с точки зрения биологической безопасности. Сформулирован термин «биологически опасные грузы», обоснована необходимость дополнения действующих классификаций опасных грузов «биологически опасными грузами», представлен примерный перечень таких грузов, неучтенных ранее, обоснована возможность воздействия этих грузов на работников железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: условия труда, железнодорожный транспорт, специальная оценка условий труда, биологический фактор, обеззараживание, устройства для обеззараживания, риск, опасные грузы, охрана труда.

OPTIMIZATION OF METHODOLOGICAL APPROACHES TO THE CONCEPT OF «BIOLOGICAL FACTOR» PRIMINITELNO RAIL TRANSPORT

Khamanov Ivan Gennadievich

Siberian State Transport University (SSTU).

191, st. D. Kovalchuk, Novosibirsk, 630049, Russia.

Post-graduate student of the department «Labour safety», SSTU.

E-mail Ivanjimm@rambler.ru

Shetinin Alexander Nikolaevich

Siberian State Transport University (SSTU).

191, st. D. Kovalchuk, Novosibirsk, 630049, Russia.

Doctor of Medical Sciences, professor of the department of «Labour safety», SSTU.

E-mail anshchetinin@ngs.ru

Evstegneeva Alexandra Alexandrovna

Siberian State Transport University (SSTU).

191, st. D. Kovalchuk, Novosibirsk, 630049, Russia.

Student of the department of «Labour safety», SSTU.

E-mail evstegneeva-aleksandra@rambler.ru

Article is devoted to production and occupational exposure to «biological factor» for workers of railway transport. Purpose – improving the system of occupational safety in railway transport under the influence of workers pathogenic organisms. To identify gaps in the system of assessment «biological factor» has been studied Russian normative documentation for a special assessment of working conditions and carried out long-term work on hygienic assessment of working conditions. The article defines the term «biological factor», justify the need for of risk assessment of the harmful factor, expand the list of sources and professional group of railway workers potentially exposed to «biological factor». In this article presents a device for protection and prophylaxis railway workers from biological factor. The principle of operation of the device is based on the integrated use of methods of ultrasonic treatment and ionization to disinfect the indoor air of railway stations, bus stations, subway stations. According to the results of studying the Russian regulatory documentation in the transportation of dangerous goods by railway, identified the main problems and their solutions, in terms of biological safety: formulated the term «biologically dangerous goods»; the necessity of creating a class or sub-class «biologically dangerous goods» and its implementation in the existing rules; developed a simple list of «biologically dangerous goods»; the possibility of the impact of these goods on railway workers.

Keywords: *working conditions, railway transport, special assessment of working conditions, biological factor, disinfection, devices for disinfection, risk, dangerous goods, labour safety.*

Уважаемые коллеги!

Редакция научно-технического журнала «Известия Транссиба» приглашает Вас публиковать результаты научных исследований по тематическим направлениям журнала:

- подвижной состав железных дорог;
- транспортная энергетика;
- информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации;
- путь и искусственные сооружения;
- управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов;
- организация производства на транспорте.

Материалы просим высылать ответственному секретарю редакционной коллегии журнала Захаренко Елене Игоревне по электронной почте: izvestia_transsiba@mail.ru

Правила представления рукописей научных статей в научно-технический журнал «Известия Транссиба»

В редакцию журнала представляются:

текст 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;

название статьи, аннотация, ключевые слова (5 – 10 слов), название тематического раздела журнала, в который представляется статья (в отдельном файле – на русском и английском языках);

сведения об авторах в отдельном файле на русском и английском языках (фамилия, имя, отчество, ученая 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 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 (по центру, 11 пт), название статьи (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на русском 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* (не 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 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.

Редколлегия оставляет за собой право литературного редактирования статьи без согласования с авторами.

Научное издание

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

№ 2 (22) 2015

Научно-технический журнал «Известия Транссиба» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 3 июня 2009 г. Свидетельство о регистрации – ПИ № ФС77-36469.

Номер ISSN – 2220-4245.

Подписной индекс в общероссийском каталоге НТИ Агентства «Роспечать» – 66087.

Издание обрабатывается в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

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 (каждый квартал).

Редактор – Майорова Н. А.

Компьютерная верстка – Захаренко Е. И.

Адрес редакции (издательства): 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35;
тел.: (3812) 31-05-54; e-mail: izvestia_transsiba@mail.ru

Подписано в печать 20.06.2015.

Тираж 500 экз.

Отпечатано в ГП «Омская областная типография»: 644070, г. Омск, ул. Декабристов, 37.
Дата выпуска: 27.06.2015.

