

научно-технический

ISSN 2220-4245
журнал

ИЗВЕСТИЯ

№ 4(44)

2020

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. Ведрученко Виктор Родионович – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС, д.т.н., профессор.
6. Глинка Тадеуш – доктор, профессор Силезского политехнического университета (Гливице, Польша).
7. Горюнов Владимир Николаевич – зав. кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГУ, д.т.н., профессор (Омск).
8. Зыкина Анна Владимировна – зав. кафедрой «Прикладная математика и фундаментальная информатика» ОмГУ, д.ф.-м.н., профессор (Омск).
9. Исаков Александр Леонидович – зав. кафедрой «Исследования, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог» СГУПС, д.т.н., профессор (Новосибирск).
10. Карагольцев Сергей Константинович – ректор ИрГУПС, д.т.н., профессор (Иркутск).
11. Косарев Александр Борисович – первый зам. генерального директора АО «ВНИИЖТ», д.т.н., профессор (Москва).
12. Лю Цзянькунь – доктор, профессор, зам. декана Школы гражданского строительства Университета Сунь Ятсена (Чжухай, Китай).
13. Лебедев Виталий Матвеевич – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС, д.т.н., профессор.
14. Парамонов Александр Михайлович – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУ, д.т.н., доцент (Омск).
15. Сидоров Олег Алексеевич – зав. кафедрой «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПС, д.т.н., профессор.
16. Солоненко Владимир Гельевич – профессор кафедры «Подвижной состав» КазАТК, д.т.н., профессор (Алматы, Республика Казахстан).
17. Файзибаев Шерзод Сабирович – зав. кафедрой «Вагоны и вагонное хозяйство» ТГТУ, д.т.н., профессор (Ташкент, Республика Узбекистан).
18. 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. Vedruchenko Victor Rodionovich – professor of the department «Heat-power» of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
6. Glinka Tadeusz – Ph. D., professor of Silesian University of Technology (Gliwice, Poland).
7. Goryunov Vladimir Nikolaevich – head of the department «Power supply of industrial enterprises» of OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
8. Zykina Anna Vladimirovna – head of the department «Applied mathematics and fundamental computer science» of OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
9. Isakov Alexander Leonidovich – head of the department «Railway and Highway Surveying and Design Engineering» of STU, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
10. Kargapoltsev Sergey Konstantinovich – rector of ISTU, D. Sc., professor (Irkutsk, Russia).
11. Kosarev Alexander Borisovich – senior deputy of general director of JSC «VNIIZhT» (Railway Research Institute), D. Sc., professor (Moscow, Russia).
12. Liu Jiankun – Ph. D., professor of Sun Yat-sen University, the associate dean of the School of Civil Engineering (Zhuhai, China).
13. Lebedev Vitaliy Matveyevich – professor of the department «Heat-power» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
14. Paramonov Alexander Mikhailovich – professor of the department «Heat-power» of OmSTU, D. Sc., associate professor (Omsk).
15. Sidorov Oleg Alexeevich – head of the department «Power supply of rail transport» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
16. Solonenko Vladimir Gelyevich – professor of the department «Rolling stock» of KazATC, D. Sc., professor (Almaty, Kazakhstan).
17. Fayzibaev Sherzod Sabirovich – head of the department «Wagons and wagon facilities» of ISTU, D. Sc., professor (Tashkent, Uzbekistan).
18. Kharlamov Viktor Vasilyevich – head of the department «Electrical machines and common electrotechnic» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).

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

СОДЕРЖАНИЕ

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

- Лакин И. К., Семенов А. П. Расчет вероятности категорий отказов по надежности оборудования локомотивов.....2
- Томилова О. С., Михеев В. А. Математическая модель комплексной оценки эксплуатационной эффективности инновационных вагонов в грузовом движении.....8
- Каштанов А. Л., Никифоров М. М., Плотников Ю. В. Влияние уставок срабатывания системы резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока на потери электроэнергии.....19
- Харламов В. В., Попов Д. И., Петров П. Г. Совершенствование схем испытаний асинхронных тяговых двигателей с применением метода взаимной нагрузки.....28
- Кузнецов К. Б., Пазуха А. А. Координатная система контроля и оповещения об опасных электрических потенциалах при эксплуатации и технологии ремонта устройств электроснабжения ОАО «РЖД».....37
- Гаранин М. А., Фроленков С. А. Методика бесконтактной диагностики положения проводов контактной сети электрифицированных железных дорог.....48
- Шкодун П. К. Разработка комплекса диагностических параметров оценки технического состояния тяговых электродвигателей подвижного состава.....56
- Бакланов А. А., Шиляков А. П., Раздобаров А. В. Принципы классификации влияющих факторов на расход энергии электроподвижным составом.....65
- Кривошея Ю. В., Кривошея Д. С. Коэффициент трения покоя дискового тормоза.....75
- Пудовиков О. Е., Жухин Н. О. Новые подходы к разработке систем автоматического управления скоростью длинносоставных поездов.....81
- Сахаров Р. А., Ким К. К., Ватулин Я. С. Оценка критических состояний металла поверхности катания железнодорожных колес.....90
- Осипов В. А., Логунова П. А. Определение методической погрешности при измерении потерь активной энергии в тяговой сети постоянного тока.....97
- Кобулов Ж. Р., Баротов Ж. С. Организация движения сборных поездов между техническими станциями при доставке грузов.....104

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

- Асонов А. М., Кузнецов И. И. Усовершенствование очистки щебня балластной призмы железнодорожных путей от нефтепродуктов щебнеочистительной машиной...112

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

- Худяков П. Ю., Кисельников А. Ю., Старцев И. М. Программная компенсация инерции промышленных датчиков температуры в программируемых контроллерах.....120
- Чепцов М. Н., Сорокин В. Е. Расчет максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи в системах интервального регулирования движения поездов на базе цифрового радиоканала.....127

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

Учредитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

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

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35

И. К. Лакин, А. П. Семенов

ОАО «Научно-исследовательский институт технологии, контроля и диагностики железнодорожного транспорта» (ОАО «НИИТКД»), г. Омск, Российская Федерация

РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТИ КАТЕГОРИЙ ОТКАЗОВ ПО НАДЕЖНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ЛОКОМОТИВОВ

Аннотация. В статье рассмотрены особенности использования показателей надежности локомотивов в ОАО «РЖД». Приведены примеры показателей надежности оборудования локомотивов и показатели, используемые в ОАО «РЖД» при заключении договоров на сервисное обслуживание, в том числе по контракту жизненного цикла. Предложен метод перехода от показателей ГОСТа к принятым в ОАО «РЖД». Сделан вывод о возможности автоматизации этих процедур.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, локомотивы, надежность, отказы, мониторинг.

Igor K. Lakin, Alexander P. Semenov

Research Institute for Rail Transport Technology, Control and Diagnostics, Omsk, the Russian Federation

THE PROBABILITY CALCULATING OF FAILURE CATEGORIES OF THE LOCOMOTIVE EQUIPMENT RELIABILITY

Abstract. The article discusses the specifics of the locomotive reliability indicators use in the Russian Railways. Examples of locomotive reliability indicators and the indicators used in the Russian Railways in the conclusion of service contracts, including under the life cycle contract are given. A method of transition from national standard to Russian Railways has been proposed. It is concluded that these procedures can be automated.

Keywords: railway transport, locomotives, reliability, failures, monitoring.

В ОАО «РЖД» большое внимание уделяется управлению надежностью тягового подвижного состава. Основные принципы управления соответствуют ГОСТ 27.002-2015 и ГОСТ 32192-2013 [1, 2], где надежность определена как «способность железнодорожной техники выполнять предусмотренные техническими требованиями функции в течение определенной наработки или периода эксплуатации при установленных в нормативной и (или) технической документации условиях применения, технического содержания, хранения и транспортирования». Отказ понимается как «событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния». При этом техническое состояние локомотива может быть исправным/неисправным, работоспособным/неработоспособным, частично работоспособным/неработоспособным.

Надежность локомотива – это совокупность надежности его оборудования, которое как производится на локомотивостроительном заводе, так и закупается у поставщиков этого оборудования, каждый из которых самостоятельно проводит анализ, моделирование, испытания, подконтрольную эксплуатацию и другие мероприятия, в процессе которых определяет согласно ГОСТ основные нормируемые показатели надежности и фиксирует их в Технических условиях на изделие (ТУ) и его паспорте. Например, выпрямительно-инверторные преобразователи (ВИПы) типа ВИП-4000М электровозов переменного тока «Ермак» (Э5К, 2ЭС5К, 3ЭС5К, 4ЭС5К) производства Новочеркасского электровазостроительного завода (НЭВЗа) [3] имеют в ТУ следующие показатели надежности, которые обеспечиваются при соблюдении режимов эксплуатации ВИПов:

- средняя наработка на отказ: не менее 66 тыс. ч (3,3 млн км);
- 95 %-ный ресурс: не менее 80 тыс. ч;
- 95 %-ный срок службы: не менее 20 лет;
- среднее время восстановления: не более 2,5 ч.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Интенсивность отказов можно вычислить как $\lambda = 1/3,3 = 0,3$ отказа на 1 млн км. На электровозах серии 2ЭС5К установлено четыре ВИПа – по два в каждой секции. Следовательно, интенсивность отказов ВИПов у 2ЭС5К составляет $0,33 \cdot 4 = 1,2$ отказа на 1 млн км. Фактическую надежность ВИПов по данным за месяц их эксплуатации можно определить по формуле:

$$\lambda = n / (N \cdot L), \quad (1)$$

где n – число отказов ВИПов за заданный период времени;

N – общее число рассматриваемых ВИПов;

L – средний пробег одного локомотива, млн км.

Например, если среднесуточный пробег тысячи электровозов ($N = 1000$) серии 2ЭС5К был $L = 700$ км, то суммарный пробег локомотивов за месяц $L_{\text{эл}} = 1000 \cdot 700 \cdot 30/1000000 = 21$ млн км, а работа ВИПов $L_{\text{ВИП}} = 21 \cdot 4 = 84$ млн км. Если за это время произошло 17 отказов ($n = 17$) ВИПов, то

$$\lambda = 17 / 84 = 0,202 \text{ отказа/млн км} < 0,3 \text{ (в пределах допуска).}$$

Тот же результат можно получить по-другому: средний пробег ВИПов за месяц $L = 700 \cdot 30 = 21$ тыс. км, число ВИПов $N = 1000 \cdot 4 = 4000$. Тогда

$$\lambda = 17 / (4000 \cdot 21000/1000000) = 0,202 \text{ отказа/млн км.}$$

Примечание: в качестве N следует брать не 4000 ВИПов, а $(4000 + 4000 - 17)/2 = 3991,5$ ВИПа. Тогда $\lambda = 0,203$. Ошибка составляет менее 0,21 %, поэтому можно воспользоваться предложенной упрощенной формулой.

В 2014 г. техническое обслуживание и ремонт локомотивов в ОАО «РЖД» переданы сервисным компаниям СТМ-Сервис и ТМХ-Сервис (новое название – ЛокоТех-Сервис). Согласно договорам сервисного обслуживания [4] основным показателем надежности является коэффициент технической готовности (КТГ), снижение которого ниже установленного норматива в виде понижающего коэффициента влияет на ставку (руб./км). На вновь поставляемые локомотивы в ОАО «РЖД» по контракту жизненного цикла (КЖЦ) [5] используется аналогичный КТГ показатель – коэффициент готовности к эксплуатации (КГЭ).

Показатели надежности КТГ и КГЭ являются интегральными и достаточно просты в применении, но есть проблема разнесения ответственности за низкий коэффициент по видам оборудования и производителям. Например, если отказы колесно-моторного блока (КМБ) и ВИПа привели к снижению КТГ ниже допустимого $0,9 < 0,95$, а исключение одного из видов отказа приводит КТГ в допуск, то невозможно обвинить одного из производителей в потерях из-за низкого КТГ. Решения этой задачи нет, хотя оно важно для определения ответственности за низкую надежность: КЖЦ предусматривает возмещение потерь вследствие просрочки доставки грузов и пассажиров, нарушения безопасности, загрязнения окружающей среды и др. Задача усложняется еще тем, что у оборудования разные производители: у КМБ типа НБ-514 – сам НЭВЗ, у ВИПа – ПАО «Электропрямитель» (г. Саранск). Нет механизма отнесения ответственности по производителям за низкие КТГ и КГЭ. В результате при заключении аутсорсинговых договоров по отдельным видам оборудования невозможно аналогично сформулировать требования КЖЦ.

В ОАО «РЖД» плюс к показателям согласно ГОСТам [1, 2] введены дополнительные показатели, которые согласно общепромышленному ГОСТу [1] можно интерпретировать как «последствия отказа». В ОАО «РЖД» утверждено Положение [6], которое делит отказы на три категории в зависимости от их последствий:

1-я категория: отказы, приведшие к задержке поезда на 1 ч и более либо приведшие к транспортным происшествиям или событиям, связанным с нарушением правил безопасности движения;

2-я категория: отказы, приведшие к задержке пассажирского поезда продолжительностью от 6 мин до 1 ч, грузового поезда – продолжительностью от 15 мин до 1 ч;

3-я категория: все отказы, не вошедшие в категории 1 и 2.

В КЖЦ предусмотрена уплата сервисной компанией штрафов за отказы 1-й, 2-й категорий, причем штраф за четвертый и последующие однотипные отказы в три раза больше исходного. Предусмотрены штрафы за превышение числа отказов 3-й категории, нормированного в ТУ. При этом отказы считаются как число отказов на 1 млн км, что по сути является интенсивностью отказов. Но в ТУ на оборудование нет норматива на отказы по категориям. Приведем пример.

При отказе одного ВИПа на электровозе переменного тока серии 2ЭС5К собирается аварийная схема с падением мощности локомотива на 25 %. Если при этом локомотив следовал с поездом установленной весовой нормы на руководящий подъем, то произойдет остановка поезда с необходимостью вызывать вспомогательный локомотив – это будет отказ 1-й категории. Если масса состава не была максимально возможной или не было на маршруте руководящего подъема, то произойдет только задержка поезда – это будет отказ 2-й категории. Возможна ситуация, когда удастся довести поезд без опозданий, а отказ ВИПа устранить на плановом техническом обслуживании и ремонте (ТОиРе) – это будет отказ 3-й категории. Таким образом, один и тот же отказ может привести к разным последствиям и попасть в любую из трех категорий. Пример наглядно показывает, что производитель оборудования, определяя «классические» показатели надежности своих изделий, не в состоянии заранее определить, сколько будет отказов и какой они будут категории. В примере с ВИПом производитель может гарантировать число отказов у одного электровоза серии 2ЭС5К не более $0,3 \cdot 4 = 1,2$ отказа на 1 млн км, но какой категории они будут, рассчитать не сможет.

Отказ ВИПа будет 1-й категории, если в момент его наступления масса поезда соответствовала весовой норме и поезд следовал по руководящему (критическому) подъему. Анализируя статистику эксплуатации локомотивов на конкретном полигоне (например, по данным информационных систем «ГИД Урал» или «ИСУЖТ» [7]), можно рассчитать вероятность возникновения отказа 1-й категории P_1 . Аналогично можно рассчитать вероятность отказа второй категории P_2 . Тогда вероятность отказов третьей категории можно определить как $P_3 = 1 - P_1 - P_2$. Тогда ожидаемое число отказов n по категориям отказов n_1, n_2, n_3 можно прогнозировать как

$$n_1 = n \cdot P_1; \quad (2)$$

$$n_2 = n \cdot P_2; \quad (3)$$

$$n_3 = n \cdot P_3 = n - n_1 - n_2, \quad (4)$$

где общее число отказов n за заданный период определяется из статистики отказов [6] или рассчитывается теоретически как произведение интенсивности отказов и пробега: $n = \lambda \cdot L$. В приведенном ранее примере $n = 0,3 \cdot 84 = 25,2$ отказа. Если вероятность отказа 1-й категории составляет $P_1 = 0,2$, 2-й категории $P_2 = 0,3$, то ожидаемое (нормируемое) число отказов (среднее) по категориям будет таким:

$$n_1 = 25,2 \cdot 0,2 = 5,04 \text{ отказа};$$

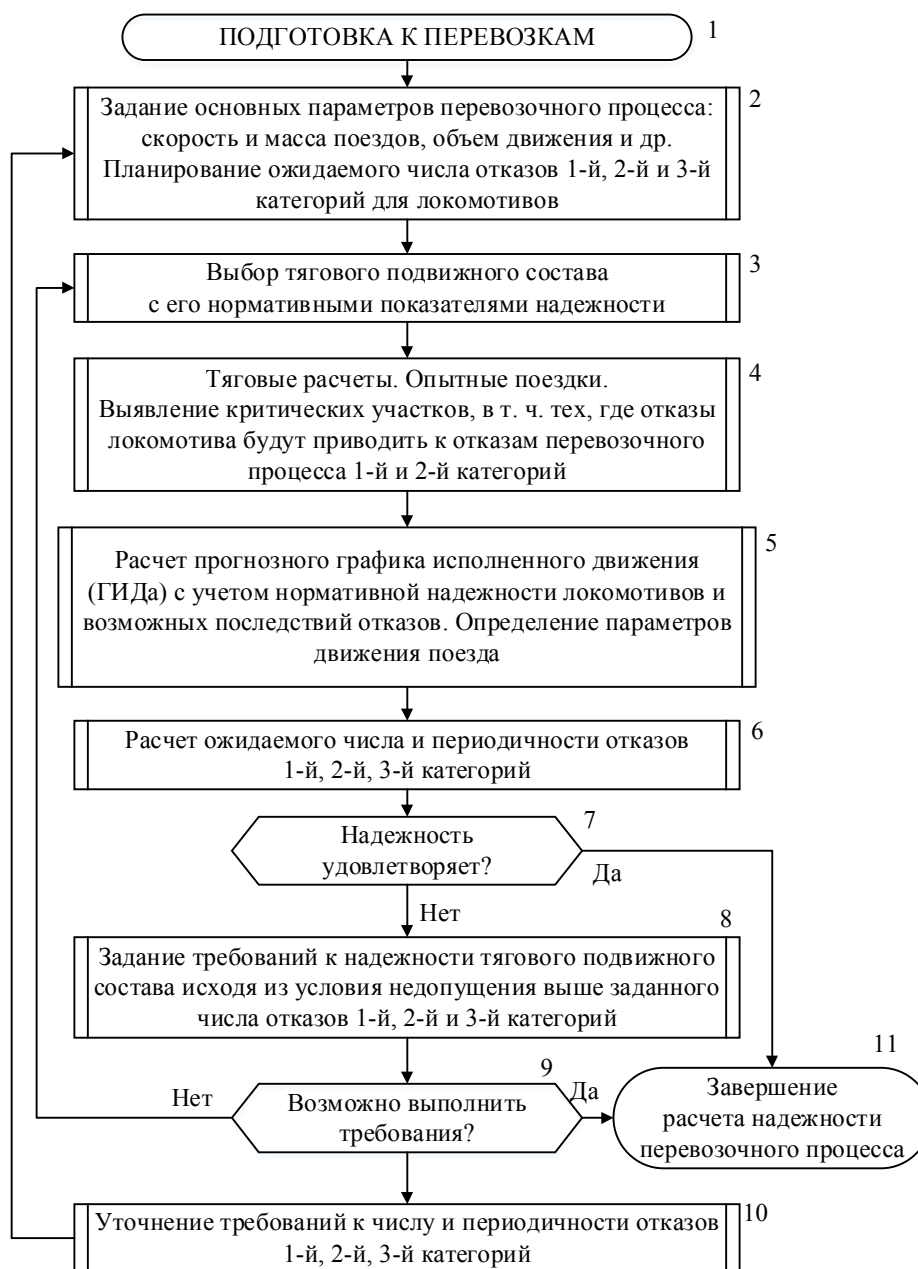
$$n_2 = 25,2 \cdot 0,3 = 7,56 \text{ отказа};$$

$$n_3 = 25,2 \cdot 0,5 = 12,6 \text{ отказа}.$$

Таким образом, по статистке эксплуатации локомотивов на полигоне и паспортным показателям надежности оборудования можно предварительно рассчитать ожидаемое число отказов за период по категориям. Сделать такой расчет производитель оборудования и локо-

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

мотивов в целом без данных «РЖД» не может. На рисунке приведен предлагаемый алгоритм расчета показателей надежности локомотивов и перевозочного процесса, по которому следует произвести подготовку к нормированию надежности локомотива в контракте жизненного цикла, заключаемого на 30 – 40 лет.



Блок-схема алгоритма определения норматива на отказы 1-й, 2-й и 3-й категорий

Коммерческие службы совместно со службой управления перевозочным процессом задают основные параметры процесса перевозок: объем перевозок, массу поезда, участковую и техническую скорости и др. (блок 1), в том числе планируют ожидаемое число отказов 1-й, 2-й и 3-й категорий. На втором этапе (блок 3) выбирается тяговый подвижной состав, с помощью которого планируется выполнить весь объем перевозок. Для этих локомотивов осуществляют тяговые расчеты, опытные поездки и другие мероприятия (блок 4). Это достаточно длительные процедуры, но без них нельзя составить графики движения поездов. Типовые тяговые испытания проводятся достаточно редко. В результате определяются возможные маршруты («графиковые нитки»), которые становятся основой моделирования перевозочно-

го процесса (блок 5) с учетом надежности локомотивов и их оборудования, заявленного в их технических условиях.

Важно отметить, что у производителя локомотивов и их оборудования не указано число отказов по категориям – их число и периодичность определяются в процессе моделирования перевозочного процесса (блок 6). Только после моделирования можно оценить, достигнута заданная надежность перевозочного процесса или нет (блок 7).

Если ожидаемая надежность не достигнута, то возможно несколько вариантов действий. Первый – предъявить заводам-изготовителям более высокие требования по надежности локомотивов в «классических» параметрах, установленных ГОСТом (блок 8). Если новые требования по надежности выполнимы и соответствующая новая цена локомотива устраивает заказчика, то на этом процесс заканчивается (блок 11).

Если требуемые показатели надежности локомотива невыполнимы, то возможны несколько вариантов действий. Первый – выбрать другого поставщика локомотивов. Если это невозможно, то возможны два других пути. Можно понизить требования к числу отказов по категориям (второй путь). Если это не приведет к критической потере пропускной способности участка, то это лучший вариант из всех трех. Если надежность локомотива критически влияет на объемы перевозок, то возможно повышение надежности перевозочного процесса:

резервирование секций локомотива на случай отказа; например, осуществлять тягу пассажирского поезда двухсекционным локомотивом при достаточности одной – это дорогой вариант решения проблемы;

установка на критических участках вспомогательных резервных локомотивов, позволяющих понизить категоричность отказа; такой вариант решения проблемы гораздо дешевле;

предъявление повышенных требований к организации перевозочного процесса с облегчением условий эксплуатации локомотивов, например, не пропускать перед руководящим подъемом поезд по боковому пути, тем самым дав ему разогнаться и понизить риск отказа из-за критической нагрузки.

После внесения изменений в требования к тяговому подвижному составу (блоки 9, 10) следует заново произвести расчеты и моделирование (переход к блокам 2 или 3).

Таким образом, на базе информационных систем ОАО «РЖД» имеется возможность автоматизировать расчет параметров надежности оборудования локомотивов как по показателям ГОСТа, так и по принятым в системе КАСАНТ ОАО «РЖД», что создаст предпосылки для автоматизации взаимодействия с сервисными компаниями, осуществляющими сервисное обслуживание локомотивов, в том числе по контракту жизненного цикла.

Список литературы

1. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 63 с. – Текст : непосредственный.
2. ГОСТ 32192-2013. Надежность в железнодорожной технике. Основные понятия. Термины и определения. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 71 с. – Текст : непосредственный.
3. Преобразователь выпрямительно-инверторный ВИП-4000М-УХЛ2. Технические условия ТУ16-91 ИЖРФ 435511.021 ТУ. – URL : <https://electro.mashinform.ru/agregaty-vypryamitelno-invertornye/preobrazovatel-vyprjamitelno-invertornyj-tipa-vip-4000-m-uhl2-obj2366.html> (дата обращения: 10.12.2020). – Текст : электронный.
4. Договоры ОАО «РЖД» с СТМ-Сервис (№ 284) и ТМХ-Сервис (№ 285) от 30.04.2014 на сервисное обслуживание локомотивов. – Москва : ОАО «РЖД», 2014. – Текст : непосредственный.
5. Договор на поставку локомотивов ОАО «РЖД» и ЗАО «Рослокомотив» с обязательством обеспечения их сервисного обслуживания в период жизненного цикла (КЖЦ) № 2833180 от 29.03.2018. – Москва : ОАО «РЖД», 2018 – Текст : непосредственный.
6. Положение об учете, расследовании и анализе отказов в работе технических средств на инфраструктуре ОАО «РЖД» с использованием автоматизированной системы КАСАНТ

(Распоряжение от 01.11.2018 № 2160/р). – Москва : ОАО «РЖД», 2018. – Текст : непосредственный.

7. Единая интеллектуальная система управления и автоматизации производственных процессов на железнодорожном транспорте ИСУЖТ. – www.vniias.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://www.vniias.ru/isuzht> (Дата обращения: 10.12.2020).

8. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. – 3-е изд., перераб. и доп. / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – Москва : Академия, 2003. – 464 с. – Текст : непосредственный.

9. Мониторинг технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов. Теория и практика / К. В. Липа, А. А. Белинский [и др.]. – Москва : Локомотивные технологии, 2015. – 212 с. – Текст : непосредственный.

10. Лакин, И. К. Разработка теории и программно-технических средств комплексной автоматизированной справочно-информационной и управляющей системы локомотивного депо : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Лакин Игорь Капитонович ; Московский гос. университет путей сообщения. – Москва, 1997. – 377 с. – Текст : непосредственный.

References

1. *Nadezhnost v tekhnike. Terminu i opredelenia* GOST 27.002-2015 (Reliability in technology. Terms and definitions National Standard 27.002-2015). Moscow, Standartinform, 2016, 63 p.

2. *Nadezhnost na zheleznodorozhnom transporte. Osnovnie ponyatia. Terminu i opredelenia* GOST 32192-2013 (Reliability in railway equipment. Concepts. Terms and definitions National Standard 32192-2013). Moscow, Standartinform, 2014, 71 p.

3. *Vipryamitelno-Invertorniy preobrazovatel VIP4000M-UHL2* (The converter is straighten-inverter VIP-4000M-UHL2), Available at: <https://electro.mashinform.ru/agregaty-vypriamitelno-invertornye/preobrazovatel-vypriamitelno-invertorniy-tipa-vip-4000-m-uhl2-obj2366.html> (accessed 10 December 2020).

4. *Dogovory OAO «RZhD» s STM-Servis (№ 284) i TMKh-Servis (№ 285) ot 30.04.2014 na servisnoe obsluzhivanie lokomotivov* (Contracts JSC «RZD» with STM-Service (№ 284) и ТМХ-Service (№ 285), 30.04.2014 for locomotive service), Moscow: JSC «RZD», 2014.

5. *Dogovor na postavku lokomotivov OAO «RZhD» i ZAO «Roslokomotiv» s obiazatel'stvom obespecheniia ikh servisnogo obsluzhivaniia v period zhiznennogo tsikla (KZhTs) № 2833180 ot 29.03.2018* (Contract JSC «RZD» with «Roslokomotiv» commitment to provide their service during the life cycle № 2833180, 29.03.2018), Moscow: JSC «RZD», 2018.

6. *Polozhenie ob uchete, rassledovanii i analize otkazov v rabote tekhnicheskikh sredstv na infrastrukture OAO «RZhD» s ispol'zovaniem avtomatizirovannoi sistemy KASANT (Rasporiazhenie ot 01.11.2018 № 2160/r)* (Regulation on accounting, investigation and analysis of failures in the work of technical means on the infrastructure of «Russian Railways» using an automated system KASANT (Disposal 01.11.2018 № 2160/к)), Moscow: JSC «RZD», 2018.

7. *Edinaia intellektual'naia sistema upravleniia i avtomatizatsii proizvodstvennykh protsessov na zheleznodorozhnom transporte ISUZhT* (A single intelligent system of management and automation of production processes on railways ISUZhT), Available at: <http://www.vniias.ru/isuzht> (accessed 10 December 2020).

8. Ventcel E. S., Ovcharov V. A. *Teoriia veroiatnostei i ee inzhenernye prilozheniia* (Probability Theory and its engineering applications). Moscow: Akademiia Publ., 2003, 464 p.

9. Lipa K. V., Belinsky A. A., Pustovoy V. N., Lyangasov S. L., Lakin I. K., Abolmasov A. A. and others. *Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya i rezhimov expluatacii lokomotivov. Teoria i pracrica* (Monitoring the technical condition and modes of operation of locomotives. Theory and practice). Moscow: Locomotivniye Tekhnologii Publ., 2015, 212 p.

10. Lakin I. K. *Razrabotka teorii i programmno-tekhnicheskikh sredstv kompleksnoi avtomatizirovannoi spravochno-informatsionnoi i upravliaiushchei sistemy lokomotivnogo depo* (Development of theory and software tools of a comprehensive automated reference information and control system of the locomotive depot). Thesis the doctor of sciences in engineering, Moscow, Moscow Railway State University, 1997, 377 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лакин Игорь Капитонович

ОАО «Научно-исследовательский институт технологии, контроля и диагностики железнодорожного транспорта» (ОАО «НИИТКД»).

Избышева ул., д. 3, корп. 2, г. Омск, 644005, Российская Федерация.

Старший советник по науке, доктор технических наук.

Тел.: +7 (3812) 443-915.

E-mail: Lakini@yandex.ru

Семенов Александр Павлович

ОАО «Научно-исследовательский институт технологии, контроля и диагностики железнодорожного транспорта» (ОАО «НИИТКД»).

Избышева ул., д. 3, корп. 2, г. Омск, 644005, Российская Федерация.

Генеральный директор, кандидат технических наук.

Тел.: +7 (3812) 443-915.

E-mail: Corp@niitkd.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lakin Igor Kapitonovich

Research Institute for The Technology, Control and Diagnostics of Rail Transport NIITKD.

Izbyshchev street, 3, 2 Omsk, 644005, the Russian Federation.

Senior Science Advisor, Doctor of Sciences in Engineering.

Phone: +7 (3812) 443-915.

E-mail: Lakini@yandex.ru

Semenov Alexander Pavlovich

Research Institute for The Technology, Control and Diagnostics of Rail Transport NIITKD.

Izbyshchev street, 3, 2 Omsk, 644005, the Russian Federation.

CEO, Ph. D. in Engineering.

Phone: +7 (3812) 443-915.

E-mail: Corp@niitkd.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Лакин, И. К. Расчет вероятности категорий отказов по надежности оборудования локомотивов / И. К. Лакин, А. П. Семенов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 4 (44). – С. 2 – 8.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Lakin I. K., Semenov A. P. The probability calculating of failure categories of the locomotive equipment reliability. Journal of Transsib Railway Studies, 2020, no. 4 (44), pp. 2 – 8 (In Russian).

УДК 629.46

О. С. Томилова, В. А. Михеев

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

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИННОВАЦИОННЫХ ВАГОНОВ В ГРУЗОВОМ ДВИЖЕНИИ

Аннотация. В статье рассмотрен математический подход к модельной оценке эксплуатационной эффективности инновационных вагонов в грузовом движении. Приведены комплексные системы показателей эффективности эксплуатации инновационных вагонов, которые дают совокупный мультипликативный эффект увеличения производительности подвижного состава в грузовом движении при математическом моделировании. Составлена математическая модель комплексной оценки эксплуатационной эффективности грузового подвижного состава от эксплуатации инновационных полувагонов за один технологический цикл. Выполненные в работе исследования и полученные результаты моделирования показывают, что эффективность использования подвижного состава в грузовом движении должна рассматриваться с учетом факторов влияния от эксплуатации инновационных вагонов.

Ключевые слова: инновационный вагон, грузовой подвижной состав, масса состава поезда, среднесуточный пробег локомотива.

Olga S. Tomilova, Vladislav A. Mikheev

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

MATHEMATICAL MODEL FOR INTEGRATED EVALUATION OF THE INNOVATION CARS OPERATIONAL EFFICIENCY IN THE FREIGHT TRAFFIC

Abstract. The article consider the mathematical model for integrated evaluation of the innovation cars operational efficiency in the freight traffic. Created the complex systems of freight rolling stock efficiency indicators of the innovation cars providing aggregate multiplicative effect of increase in productivity. Presents the calculations of the rolling stock productivity indicators model change from operation for one production cycle of innovation cars in the cargo movement. The executed in the article researches and received modeling results show that the rolling stock use efficiency in the cargo movement are consider into account of influence factors from the innovation cars implementation.

Keywords: innovation car, freight rolling stock, train mass, locomotive average daily run.

Несмотря на существующие колебания в экономическом векторе развития хозяйственной деятельности в стране, очевидно, что объем транспортной работы в перевозочном и транзитном сегментах будет увеличиваться. Поэтому уже сегодня необходимо решать сложный комплекс задач с ликвидацией лимитирующих факторов инфраструктуры в этом процессе. Рост грузонапряженности на отдельных направлениях, и в целом на железнодорожных линиях холдинга ОАО «РЖД», приводит к исчерпанию резервов их пропускной способности. Для решения задачи увеличения пропускной способности важно использовать технические и технологические подходы, которые дают наибольший мультипликативный эффект в росте производительности подвижного состава. Здесь существуют два варианта решения: первый – ресурсоемкое развитие сети железнодорожных линий; второй – повышение производительности грузового подвижного состава [1]. Каждый из вариантов имеет свои преимущества и недостатки, кроме того, они могут дополнять друг друга и реализовываться совместно.

Использование инновационной железнодорожной техники в контексте решения указанной задачи представляется приоритетным подходом [2]. При этом перечень требований к вагонам нового поколения как в количественном, так и в качественном выражении задает очень высокую планку. По мнению руководства и специалистов Некоммерческого партнерства «Объединение производителей железнодорожной техники» (НП «ОПЖТ»), инновационный грузовой вагон должен отвечать следующим основным критериям [2, 3]:

высокая эффективность в эксплуатации;

меньшая стоимость жизненного цикла по сравнению с вагонами, выпускаемыми в настоящее время;

пониженное динамическое воздействие на железнодорожный путь («вагон, дружественный к пути») и, как следствие, меньшее шумовое воздействие на окружающую среду;

межремонтный пробег от постройки до первого деповского ремонта – до 1,2 млн км;

расстояние следования в составе поезда от места погрузки до места выгрузки без технического обслуживания – не менее 10 тыс. км.

В целом параметры инновационности грузовых вагонов, действующие на данный момент, определены постановлениями правительства Российской Федерации: № 41 от 20 января 2014 г. и 677 от 16 июля 2016 г.

Потенциальная потребность грузового вагонного парка в инновационной железнодорожной технике неоднократно заявлялась в публикациях отраслевых журналов, озвучивалась на научно-технических конференциях [4 – 6]. Активные инвестиции привели к взрывным темпам роста парка грузовых вагонов нового поколения, при этом в модернизации инфраструктуры железнодорожного транспорта наблюдается значительное отставание.

По данным Центральной дирекции инфраструктуры ОАО «РЖД» в 2020 г. парк грузовых вагонов в Российской Федерации составляет 1182,6 тыс. вагонов. Из них 162 тыс., или

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

13,6 %, – это вагоны, относящиеся к инновационному классу. Несмотря на то, что в массовом производстве они выпускаются с 2013 г., некоторые проблемные вопросы их эксплуатации так и не решены. Необходимо отметить, что наиболее перспективными в части эксплуатации являются полувагоны нового поколения, это продиктовано имеющимся спросом на перевозку груза в вагонах повышенной грузоподъемности, в том числе для перевозки угля.

В структуре парка грузовых вагонов преобладают полувагоны с разгрузочными люками в связи с более широкой номенклатурой перевозимых грузов, высокой экономической эффективностью в рамках формирования кольцевых маршрутов, попутной загрузкой и лишь незначительно более высокой ценой, не влияющей существенно на срок окупаемости подвижного состава. На рисунках 1, 2 представлена структура парка полувагонов в разрезе эксплуатируемых моделей и подтипов.

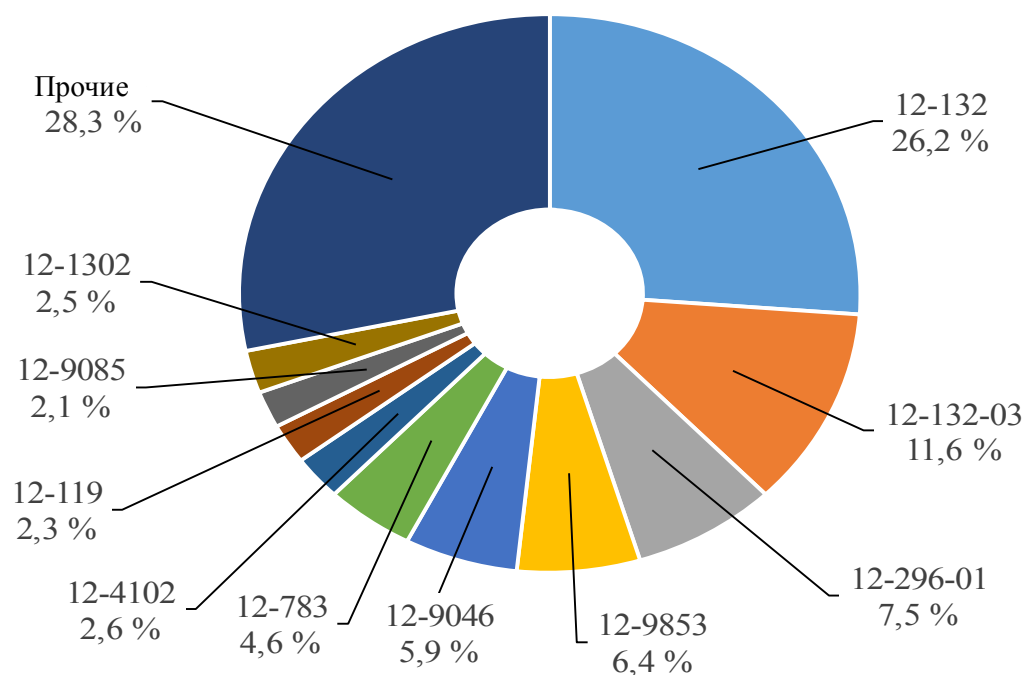


Рисунок 1 – Структура эксплуатируемых моделей парка полувагонов

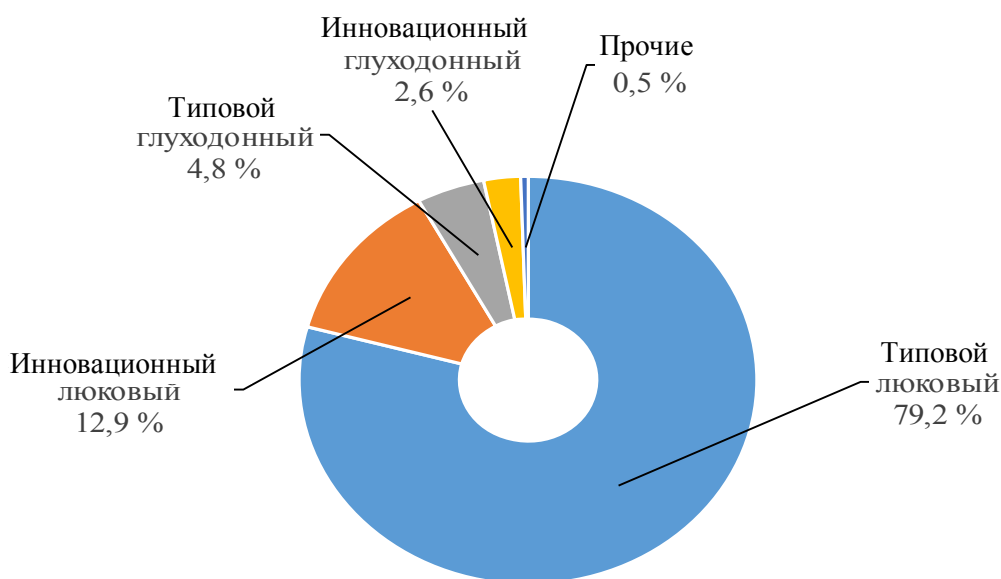


Рисунок 2 – Структура подтипов эксплуатируемых моделей парка полувагонов

В настоящее время высказываются различные точки зрения на эксплуатационную эффективность грузовых вагонов нового поколения [7, 8]. При этом все точки зрения сходятся в том, что, принимая во внимание востребованность данных вагонов, особо актуален вопрос о рассмотрении и скорейшим решении проблем их эксплуатации. Необходимо проведение соответствующих НИОКР и испытаний, включая численное математическое моделирование. При этом крайне важен опыт эксплуатации вагонов нового поколения, по результатам которого можно в дальнейшем совершенствовать разработанные математические подходы к оценке эксплуатационной эффективности инновационного подвижного состава.

Ниже представлен разработанный авторами статьи подход к математическому моделированию оценки показателей эксплуатационной эффективности инновационного вагона в сравнении с вагоном-аналогом в грузовом движении.

Производительность подвижного состава в грузовом движении образуется двумя укрупненными показателями: массой состава и пробегом тяговой подвижной единицы [9 – 11]. В качестве показателя оценки эксплуатационной эффективности инновационных вагонов в грузовом движении принимаем среднесуточную производительность подвижного состава.

Изменение среднесуточной производительности подвижного состава определяется по выражению:

$$\Delta W_{\rightarrow \max}^n = \frac{W^n}{Q^6} \Delta Q_{\rightarrow \max}^6 + \frac{W^n}{S^n} \Delta S_{\rightarrow \max}^n, \quad (1)$$

где W^n – среднесуточная производительность подвижного состава, ткм брутто; Q^6 – вес поезда брутто, т брутто; S^n – среднесуточный пробег локомотива, км; ΔQ^6 – приращение веса поезда брутто; ΔS^n – приращение среднесуточного пробега локомотива.

Слагаемые в выражение (1) отражают влияние двух показателей на производительность подвижного состава в грузовом движении. Первое слагаемое – целевое изменение веса поезда, оно отражает эффект от увеличения веса состава, сформированного из инновационных грузовых вагонов, второе – целевое изменение среднесуточного пробега, которое отражает эффект от увеличения тонно-километровой работы тягового подвижного состава [12, 13].

Изменение веса поезда с инновационными вагонами определится по формуле [14]:

$$\Delta Q_{\rightarrow \max}^6 = \gamma_{\rightarrow 1}^H n_{\text{const}}^H q_{\rightarrow \max}^n \frac{1}{k_{\rightarrow \min}^n} + \gamma_{\rightarrow 1}^H n_{\text{const}}^H q_{\rightarrow \min}^m \frac{1}{k_{\rightarrow \max}^m}; \quad (2)$$

$$k_{\rightarrow \min}^Q = \frac{Q_{\rightarrow \min}^m}{Q_{\rightarrow \max}^6}, \quad (3)$$

где $\gamma_{\rightarrow 1}^H$ – доля инновационных вагонов в структуре состава поезда; n_{const}^H – состав поезда, вагоны; $q_{\rightarrow \max}^n$ – полезная масса груза в составе, тс; $q_{\rightarrow \min}^m$ – масса тары в составе, тс; $k_{\rightarrow \min}^Q$ – коэффициент соотношения веса нетто поезда к весу брутто; $Q_{\rightarrow \min}^m$, $Q_{\rightarrow \max}^6$ – вес поезда нетто и брутто соответственно, тс.

Изменение среднесуточного пробега локомотива определится по формуле [15, 16]:

$$\Delta S_{\rightarrow \max}^n = \frac{24}{\frac{1}{V_{\rightarrow \max}^y} + \frac{t_{\text{const}}^n}{L_y}} \quad (4)$$

где $V_{\rightarrow \max}^y$ – участковая скорость, км/ч; t_{const}^n – нормативные простои локомотива, ч; L_y – протяженность участка, км.

Рост фактической нормы загрузки инновационных вагонов обеспечивает увеличение коэффициента использования вместимости и статической нагрузки данной единицы подвижного состава. Средний состав поезда при этом будет сформирован массой тары и оптимальной удельной грузоподъемностью инновационного вагона. Таким образом, комплексная система показателей эффективности инновационных вагонов представляется следующей системой выражений [17]:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_{\rightarrow \min}^n = \frac{V_{n \text{ const}}^n}{V_{n \rightarrow \max}^n}; \\ k_{\rightarrow \max}^m = \frac{T_{\text{const}}}{T_{\rightarrow \min}^n}; \\ p_o = \frac{P^n + T^n}{n} \leq p_o^{\text{доп}}; \\ q = \frac{P^n + T^n}{2L} \leq q^{\text{доп}}, \end{array} \right. \quad (5)$$

где $k_{\rightarrow \min}^n$ – коэффициент соотношения использования вместимости инновационного вагона и вагона-аналога; $k_{\rightarrow \max}^m$ – коэффициент соотношения массы тары инновационного вагона и вагона-аналога; $V_{n \text{ const}}^n$, $V_{n \rightarrow \max}^n$ – удельный погрузочный объем вагона-аналога и инновационного вагона соответственно, м³/т; T_{const} , $T_{\rightarrow \min}^n$ – масса тары вагона-аналога и инновационного вагона соответственно, т; p_o , $p_o^{\text{доп}}$ – осевая нагрузка инновационного вагона и допустимая осевая нагрузка соответственно, тс/ось; P^n – грузоподъемность инновационного вагона, т; n – число осей; q , $q^{\text{доп}}$ – погонная нагрузка брутто инновационного вагона и допустимая погонная нагрузка соответственно, тс/м; $2L$ – длина вагона по осям сцепления, м.

Комплекс показателей, приведенный в выражении (5), обеспечивает высокопроизводительную перевозку широкой номенклатуры грузов в заданных объемах, что обеспечивает увеличение использования инновационного грузового вагона по мощности и грузоподъемности. А это, в свою очередь, дает суммарный эффект в увеличении провозной способности от 6,5 % и выше [15, 16]. В результате при заданной длине состава можно набрать из инновационных вагонов поезд большего веса, чем из вагонов-аналогов.

Основным фактором, оказывающим влияние на среднесуточный пробег локомотива, является участковая скорость движения. Часть технических возможностей роста участковой скорости теряется из-за простоев и задержек поездов на станциях и перегонах, а также потеря времени от низкопроизводительных погрузочно-разгрузочных работ.

Отдельного рассмотрения требуют итоги анализа простоя местных полувагонов на станции погрузки (рисунок 3) [18]. Более половины данного времени (в часовом выражении порядка 60 ч и выше [19]) приходится на простой от прибытия до завершения грузовой операции. Это объясняется плохо налаженной производственной связью между прибытием порожних вагонов и возможностью выполнения погрузки у грузоотправителя, что приводит к непроизводительным простоям вагонов. Простой в ожидании погрузки существенно увеличился после перехода вагонов из инверторного парка в собственный. Горизонт планирования подвода порожних вагонов фактически сравнялся с планируемым временем порожнего рейса. В результате был осуществлен переход от регулируемого сменно-суточного планирования распределения вагонов (так называемая модель – точно в срок) к модели управления с нефиксированным временем задержки поставок, при которой необходимо наличие резерва

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

вагонов в местах погрузки для обеспечения стабильности грузовой работы [19]. Этот резерв, формируемый увеличением планируемого времени порожнего рейса (скорость продвижения порожних вагонов на 30 – 40 % меньше, чем у груженных), и приводит к росту простоя.



Рисунок 3 – Время работы грузового вагона

Вагоночасы производственного цикла инновационного вагона определяются соответственно по элементам рабочего времени:

$$\Sigma nt_{\rightarrow \min}^o = \Sigma nt_{\rightarrow \min}^{дв} + \Sigma nt_{\rightarrow \min}^{tex} + \Sigma nt_{\rightarrow \min}^{гр}, \quad (6)$$

где $\Sigma nt_{\rightarrow \min}^{дв}$ – вагоночасы в движении; $\Sigma nt_{\rightarrow \min}^{tex}$ – вагоночасы нахождения на станциях и перегонах; $\Sigma nt_{\rightarrow \min}^{гр}$ – вагоночасы простоя под грузовыми операциями.

Изменение производственного цикла инновационных вагонов в выражении (6) достигается за счет изменения величин следующих параметров: эксплуатационных отказов, задержек и простоев на станциях и перегонах, временем выполнения погрузочно-разгрузочных работ.

Комплексная система показателей участковой скорости [17]:

$$\begin{cases} k_{\rightarrow \max}^{\Delta V_y} = k_{\rightarrow 1}^{V_y} \frac{V_T}{V_{доп}} \left(1 - \frac{V_{доп}}{V_{доп}^H} \right); \\ k_{\rightarrow 1}^{V_y} = \frac{V_{y \rightarrow \max}^H}{V_T}; \\ t_{гр}^H \leq t_{гр}; \\ p(t)^H \rightarrow 0,98, \end{cases} \quad (7)$$

где $k_{\rightarrow \max}^{\Delta V_y}$ – коэффициент изменения участковой скорости; $k_{\rightarrow 1}^{V_y}$ – коэффициент участковой скорости; $V_{y \rightarrow \max}^H$, V_T – участковая и техническая скорость движения соответственно, км/ч; $V_{\text{доп}}$, $V_{\text{доп}}^H$ – допускаемая скорость движения грузового поезда с вагонами-аналогами и инновационными вагонами соответственно, км/ч; $t_{\text{гр}}$, $t_{\text{гр}}^H$ – норма простоя вагонов под грузовыми операциями и простой инновационного вагона под грузовыми операциями соответственно, ч; $p(t)^H$ – эксплуатационная вероятность безотказной работы инновационного грузового вагона.

Эксплуатационные инфраструктурные расходы, связанные с влиянием тоннажа от пропуска составов с инновационными вагонами на верхнее строение пути, оцениваются комплексным показателем ресурсных затрат:

$$\begin{cases} k_{\rightarrow \max}^{\Delta C_n} = k_{C_t} k_t \left(\frac{p_o^H}{p_o} \right)^{\gamma^H} \frac{D_n^H}{D_n} \left(1 - \frac{Q_6}{Q_n^6} \right); \\ k_{C_t} = \frac{C_t^H}{C_t}; \\ k_t = 0,15 \frac{\lambda_o}{\lambda_3}, \end{cases} \quad (8)$$

где $k_{\rightarrow \max}^{\Delta C_n}$ – коэффициент изменения затрат на содержание пути; k_{C_t} – коэффициент изменения текущих затрат на содержание пути; C_t^H , C_t – стоимость текущего содержания железнодорожной линии при эксплуатации инновационных вагонов и вагонов-аналогов соответственно, условные единицы; k_t – коэффициент климатических условий; λ_o , λ_3 – число переходов оттаивания и замерзания на 100 млн ткм брутто; D_n^H , D_n – показатель повреждаемости (число отказов на 100 млн ткм брутто) при пропуске тоннажа составов из инновационных вагонов и вагонов-аналогов соответственно; Q_n^6 , Q_6 – тоннаж брутто, пропущенный по участку железнодорожной линии при пропуске составов из инновационных вагонов и вагонов-аналогов соответственно, млн тонн брутто; γ^H – доля инновационных вагонов в структуре состава поезда; p_o^H , p_o – осевая нагрузка инновационного вагона и вагона-аналога соответственно, тс/ось.

Стоимость текущего содержания железнодорожной линии C_t определяется согласно действующему отраслевому стандарту [20], инструкции по текущему содержанию железнодорожного пути и указанию № С-1386у.

Разработанный подход позволяет производить математическую модельную оценку следующих эксплуатационных показателей в сравнении с вагоном-аналогом: производительность тягового и нетягового подвижного состава, среднесуточный пробег и участковые скорости в разрезе различных парковых составляющих, массовые параметры железнодорожных составов в разрезе брутто и нетто, технико-экономические характеристики вагонов. Модельные расчеты комплексной оценки эксплуатационной эффективности инновационных вагонов в сравнении с модельным вагоном-аналогом в грузовом движении за один технологический цикл приведены на рисунке 4.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

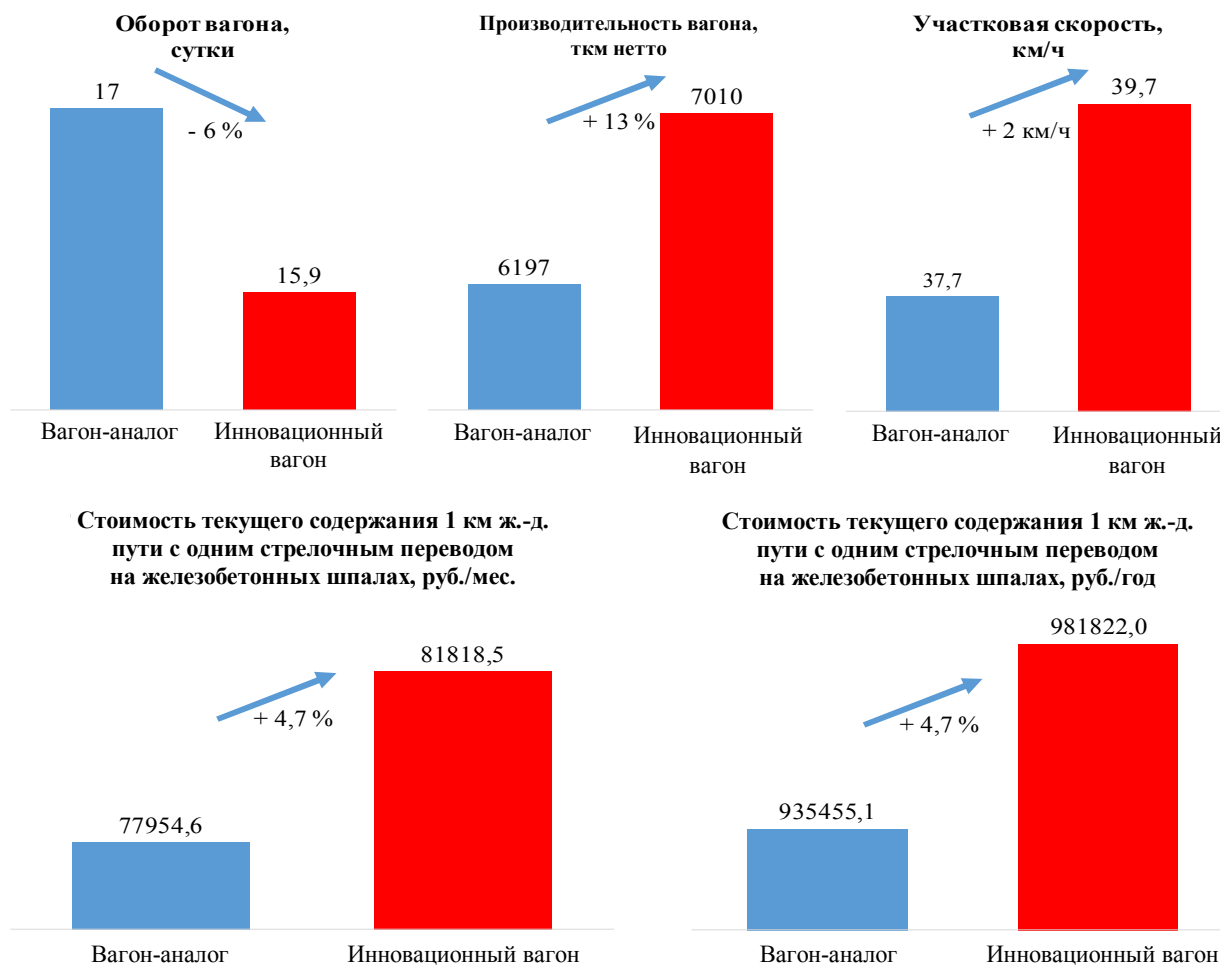


Рисунок 4 – Изменение эксплуатационных показателей инновационного вагона и вагона-аналога

Рассмотренная математическая модель оценки показателей работы при эксплуатации инновационных вагонов позволит определять изменение показателей в зависимости от конкретной модели инновационных вагонов и выполнять сравнение между ними по единой методике и на одинаковых показателях перевозочной работы на условном участке отделения железной дороги в заданных модельных условиях.

Дальнейшее совершенствование математической модели авторами предполагается вести в направлении выбора и учета действующих эксплуатационных факторов и их влияния на изменения показателей эксплуатации инновационных вагонов в грузовом движении на конкретном участке Западно-Сибирского полигона сети железных дорог ОАО «РЖД».

Список литературы

1. Лapidус, Б. М. Стратегические тренды развития железнодорожного транспорта / Б. М. Лapidус. – Текст : непосредственный // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2015. – № 6. – С. 2 – 9.
2. Гапанович, В. А. Перспективы развития инновационного вагоностроения / В. А. Гапанович, С. В. Калетин. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2020. – № 7. – С. 58 – 62.
3. Вагоны грузовые инновационные. Правила оценки экономической эффективности: стандарт ОАО «РЖД». – Москва : ОАО «РЖД», 2015. – 38 с. – Текст : непосредственный.

4. Коссов, В. С. Инновационное развитие подвижного состава в рамках реализации Стратегии холдинга «РЖД» / В. С. Коссов. – Текст : непосредственный // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2014. – № 5. – С. 53 – 60.
5. Лapidус, Б. М. Повышение производительности и эффективности железнодорожного транспорта на инновационной основе / Б. М. Лapidус. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТа. – 2012. – № 5. – С. 3 – 6.
6. Лapidус, Б. М. Отраслевая технологическая платформа «высокопроизводительный грузовой подвижной состав» – путь к использованию резервов провозной способности железных дорог / Б. М. Лapidус, А. М. Соколов. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТа. – 2011. – № 4. – С. 3 – 8.
7. Лукс, Д. Ю. Оценка динамических качеств грузового вагона, оснащенного тележкой 18-9855 / Д. Ю. Лукс. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2017. – № 4 (32). – С. 16 – 25.
8. Лукс, Д. Ю. Мониторинг динамической нагруженности типовых и инновационных вагонов / Д. Ю. Лукс. – Текст : непосредственный // Тезисы IV всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием «Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава». – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2017. – С. 150 – 156.
9. Исаков, М. П. Анализ эксплуатационных показателей полигонов / М. П. Исаков. – Текст : непосредственный // Мир транспорта. – 2014. – № 5. – С. 162 – 166.
10. Валеев, Н. А. Критерии эффективности использования локомотивного парка / Н. А. Валеев. – Текст : непосредственный // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2015. – № 2. – С. 37 – 43.
11. Виноградов, Ю. Н. Эксплуатация электровозов / Ю. Н. Виноградов. – Екатеринбург : Уральский гос. ун-т путей сообщения, 2007. – 109 с. – Текст : непосредственный.
12. Параметры инновационных вагонов и некоторые проблемы их реализации / В. Н. Филиппов, А. В. Смольянинов [и др.]. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2017. – Т. 52. – № 1. – С. 25 – 31.
13. Корникова, Т. И. Конкуренция подстегивает производителей: продолжается разработка полувагонов нового поколения с улучшенными технико-экономическими параметрами / Т. И. Корникова, А. Е. Афанасьев. – Текст : непосредственный // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2009. – Т. 17. – № 1. – С. 6 – 9.
14. Михеев, В. А. Внедрение инновационных вагонов как средство повышения эксплуатационной эффективности локомотивного парка / В. А. Михеев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2018. – № 3 (35). – С. 54 – 61.
15. Грузовой железнодорожный транспорт России в 2010 – 2015 гг.: аналитический доклад. – Москва : Институт проблем естественных монополий, 2016. – 36 с. – Текст : непосредственный.
16. Лакин, И. К. Анализ основных показателей работы железнодорожного транспорта / И. К. Лакин. – Текст : непосредственный // Наука и транспорт. – 2007. – Т. 1. – № 1. – С. 60 – 63.
17. Михеев, В. А. Влияние инновационных вагонов на производительность подвижного состава в грузовом движении / В. А. Михеев. – Текст : непосредственный // Вестник ИргТУ. – 2018. – № 7 (138). – С. 223 – 233.
18. Анализ проблемы неравномерности прибытия вагонопотоков на технические станции / А. В. Харитонов, Г. М. Биленко [и др.]. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2019. – № 4. – С. 20 – 23.
19. Шатохин, А. А. Совершенствование управления парком грузовых вагонов в конкурентной среде : специальность 05.22.08 «Управление процессами перевозок» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Шатохин Андрей Андреевич ; Российский университет транспорта. – Москва, 2019. – 24 с. – Текст : непосредственный.

20. Вагоны грузовые инновационные (правила оценки экономической эффективности): стандарт ОАО «РЖД». – Москва : ОАО «РЖД», 2015. – 38 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Lapidus B. M. Strategic trends of development of railway transport [Strategicheskie trendy razvitiya zheleznodorozhnogo transporta]. *Byulleten' Ob"edinennogo uchenogo soveta ОАО «RZHD» – Bulletin of the Joint Academic Council of JSC "Russian Railways"*, 2015, no. 6, pp. 2 – 9.
2. Gapanovich V. A., Kaletin S. V. Prospects for the development of innovative car building [Perspektivy razvitiya innovacionnogo vagonostroeniya]. *ZHeleznodorozhnyj transport – Railway transport*, 2020, no. 7, pp. 58 – 62.
3. *Vagony gruzovye innovacionnye. Pravila ocenki ehkonomicheskoy ehffektivnosti: standart ОАО «RZHD»* [The innovation freight cars. Rules of assessment of economic efficiency: standard of JSC «Russian Railways»]. Moscow, JSC «Russian Railways», 2015, 38 p.
4. Kossov V. S. The innovative development of the rolling stock within implementation of Strategy of Russian Railway holding [Innovacionnoe razvitie podvizhnogo sostava v ramkah realizacii Strategii holdinga «RZHD»]. *Byulleten' Ob"edinennogo uchenogo soveta ОАО «RZHD» – Bulletin of the Joint Academic Council of JSC «Russian Railways»*, 2014, no. 5, pp. 53 – 60.
5. Lapidus B. M. Increase in productivity and efficiency of railway transport on the innovation basis [Povyshenie proizvoditel'nosti i ehffektivnosti zheleznodorozhnogo transporta na innovacionnoj osnove]. *Vestnik VNIIZHT – The VNIIZhT Bulletin*, 2012, no. 5, pp. 3 – 6.
6. Lapidus B. M., Sokolov A. M. The industry technology platform «high-performance cargo rolling stock» – a way to use of the railroads carrying ability reserves [Otraslevaya tekhnologicheskaya platforma «vysokoproizvoditel'nyj gruzovoj podvizhnoj sostav» – put' k ispol'zovaniyu rezervov provoznoj sposobnosti zheleznih dorog]. *Vestnik VNIIZHT – The VNIIZhT Bulletin*, 2011, no. 4, pp. 3 – 8.
7. Luks D. Yu. Ocenka dinamicheskikh kachestv gruzovogo vagona, osnashchennogo teleshkoj 18-9855 [Evaluation of the dynamic properties of a freight car equipped with a bogie 18-9855] // *Izvestiya Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2017, vol. 4 (32), pp. 16 – 25.
8. Luks D. Yu. Monitoring of dynamic loading of standard and innovative cars Monitoring dinamicheskoy nagruzhennosti tipovyh i innovacionnyh vagonov [Monitoring dinamicheskoy nagruzhennosti tipovyh i innovacionnyh vagonov]. *Tezisy IV vseros. nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar. uchastiem «Tekhnologicheskoe obespechenie remonta i povyshenie dinamicheskikh kachestv zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava» (Theses IV All-Russian scientific and technical conf. with int. participation «Technological support of repair and improvement of dynamic qualities of railway rolling stock»)*. – Omsk, 2017, pp. 150 – 156.
9. Isakov L. S. Analysis of the polygons operating characteristics [Analiz ehkspluatatsionnyh pokazatelej poligonov]. *Mir Transporta – World of Transport*, 2014, no. 5, pp. 162 – 166.
10. Valeev N. A. Criteria of the locomotive park efficiency use [Kriterii ehffektivnosti ispol'zovaniya lokomotivnogo parka]. *Byulleten' Ob"edinennogo uchenogo soveta ОАО «RZHD» – Bulletin of the Joint Academic Council of JSC «Russian Railways»*, 2015, no. 2, pp. 37 – 43.
11. Vinogradov Yu. N. *Ekspluatatsiya ehlektrovozov* [Operation of electric locomotives]. Yekaterinburg: USURT Publ., 2007, 109 p.
12. Filippov V. N., Smolyaninov A. V., Kozlov I. V., Podlesnikov Ya. D. The innovation cars parameters and some problems their implementations [Parametry innovacionnyh vagonov i nekotorye problemy ih realizacii]. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2017, vol. 52, no. 1, pp. 25 – 31.
13. Kornikova T. I. The competition urges on producers: proceeds pazpaбот gondola cars of new generation with the improved technical and economic parameters [Konkurenciya podstegivaet proizvoditelej: prodolzhaetsya razrabotka poluvagonov novogo pokoleniya s uluchshennymi

tekhniko-ehkonomicheskimi parametrami]. *Vagony i vagonnoe hozyajstvo – Cars and Carriage Economy Continues*, 2009, vol. 17, no. 1, pp. 6 – 9.

14. Mikheev V. A. Introduction of innovative railcars as a means of increasing the operational efficiency of the locomotive fleet [Vnedrenie innovacionnyh vagonov kak sredstvo povyshenie ekspluatatsionnoj effektivnosti lokomotivnogo parka]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2018, vol. 3 (35), pp. 54 – 61.

15. *Gruzovoj zheleznodorozhnyj transport Rossii v 2010-2015 gg: analiticheskii doklad* (Cargo railway transport of Russia in 2010-2015: analytical report). Moscow: Institute of Problems of Natural Monopolies Publ., 2016, 36 p.

16. Lakin I. K. Analysis of key railway transport work indicators [Analiz osnovnyh pokazatelej raboty zheleznodorozhnogo transporta]. *Nauka i Transport – Science and Transport*, 2007, vol. 1, no. 1, pp. 60 – 63.

17. Mikheev V. A. Vliyanie innovacionnyh vagonov na proizvoditel'nost' podvizhnogo sostava v gruzovom dvizhenii [Influence of innovative wagons on the performance of rolling stock in freight traffic]. *Vestnik IRGTU – Vestnik IRGTU*, 2018, vol. 7 (138), pp. 223 – 233.

18. Kharitonov A. V., Bilenko G. M., Shatokhin A. A., Burakova A. V. Analysis of the problem of unequal arrival of car flows to technical stations [Analiz problemy neravno-mernosti pribytiya vagonopotokov na tekhnicheskie stancii]. *Zheleznodorozhnyj transport – Railway Transport*, 2019, vol. 4, pp. 20 – 23.

19. Shatohin A. A. *Sovershenstvovanie upravleniya parkom gruzovyh vagonov v konkurentnoj srede* (Improving the management of the fleet of freight cars in a competitive environment). Ph. D thesis abstract, Moscow, 2019, 24 p.

20. *Vagony gruzovye innovacionnye. Pravila ocenki ehkonomicheskoy ehffektivnosti: standart OAO «RZHD»* [The innovation freight cars. Rules of assessment of economic efficiency: standard of JSC «Russian Railways»]. Moscow: JSC «Russian Railways» Publ., 2015, 38 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Томилова Ольга Сергеевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ОмГУПС.

E-mail: motovilova@yandex.ru

Михеев Владислав Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ОмГУПС.

E-mail: Micheev_V_A@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Томилова, О. С. Математическая модель комплексной оценки эксплуатационной эффективности инновационных вагонов в грузовом движении / О. С. Томилова, В. А. Михеев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 4 (44). – С. 8 – 18.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tomilova Olga Sergeevna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

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

E-mail: motovilova@yandex.ru

Mikheev Vladislav Aleksandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

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

E-mail: Micheev_V_A@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Tomilova O. S., Mikheev V. A. Mathematical model for integrated evaluation of the innovation cars operational efficiency in the freight traffic. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2020, no. 4 (44), pp. 8 – 18 (In Russian).

А. Л. Каштанов, М. М. Никифоров, Ю. В. Плотников

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

ВЛИЯНИЕ УСТАВОК СРАБАТЫВАНИЯ СИСТЕМЫ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Аннотация. В статье рассмотрен вопрос повышения эффективности работы преобразовательных агрегатов тяговых подстанций постоянного тока. Приведен алгоритм расчета потерь электроэнергии в преобразовательных агрегатах по фиксируемым системой действующим значениям фазного напряжения первичной обмотки трансформатора и тока нагрузки каждого преобразовательного агрегата. На примере условной тяговой подстанции дана оценка влияния уставок срабатывания режимной автоматики преобразовательных агрегатов на потери электрической энергии.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, тяговая подстанция, преобразовательный агрегат, режимная автоматика, энергоэффективность.

Alexey L. Kashtanov, Mikhail M. Nikiforov, Yuriy V. Plotnikov

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

INFLUENCE OF SETTINGS POWER RESERVATION SYSTEMS OF DC TRACTION SUBSTATIONS TO LOSSES OF ELECTRICITY

Abstract. The article discusses the issue of improving the efficiency of converting units of DC traction substations. An algorithm for calculating electricity losses in converting units is given by the system-fixed effective values of the phase voltage of the primary winding of the transformer and the load current of each converter unit. Using the example of a conventional traction substation, an assessment of the influence of the operation settings of the regime automation of converting units on the loss of electrical energy is given.

Keywords: traction power supply system, traction substation, converting unit, automatic mode, energy efficiency.

Потери электроэнергии в трансформаторном оборудовании тяговых подстанций постоянного тока зависят от тяговой нагрузки и, соответственно, от режимов работы преобразовательных агрегатов (ПА) – поочередного или параллельного. В соответствии с [1, 2] для каждой тяговой подстанции с учетом количества ступеней трансформации и паспортных технических характеристик трансформаторного оборудования могут быть определены токи первой и второй ступеней включения и ток отключения параллельной работы ПА. Выдержка времени срабатывания первой ступени может быть выбрана в пределах от 2 до 5 минут, второй ступени – от 10 до 15 секунд, а выдержка времени отключения резервного ПА – от 6 до 10 минут. Это сделано с целью снижения количества включений-отключений резервного ПА и повышения срока службы коммутационного оборудования. Обычно уставки включения-отключения резервного ПА определяются однократно и не изменяются до замены на тяговой подстанции трансформаторного оборудования.

Следует отметить, что если токовые уставки зависят только от параметров трансформаторов, то выбор выдержки времени на включение-отключение должен выполняться с учетом длительности периодов тяговой нагрузки, зависящей от размеров и графика движения поездов, которые могут изменяться в процессе эксплуатации. Однако получение информации о колебаниях тяговой нагрузки для корректировки уставок в настоящее время практически невозможно, так как график тяговой нагрузки в системе АСКУЭ тяговых подстанций записывается с интервалом в 30 минут, что существенно превышает подлежащие корректировке выдержки времени.

Данная проблема в перспективе может быть устранена при реализации проекта «Цифровая тяговая подстанция». Принятая к реализации в 2017 г. Концепция реализации комплексного научно-технического проекта «Цифровая железная дорога» предусматривает в качестве одного из направлений повышение производительности труда за счет создания информационных систем и микропроцессорных систем управления технологическими процессами [3]. Одним из важных технологических элементов цифровой железной дороги должна стать цифровая тяговая подстанция, отличительной особенностью которой по сравнению с традиционной является переход от физических аналоговых и дискретных связей – токовые цепи, цепи напряжения, оперативные цепи – к цифровым, т. е. все аналоговые сигналы должны быть преобразованы в цифровые.

В настоящее время в рамках разработки автоматизированной системы мониторинга энергоэффективности перевозочного процесса [4, 5] разработана автоматизированная система учета электроэнергии на присоединениях контактной сети тяговых подстанций постоянного тока [6, 7]. Данная система обеспечивает получение цифровых значений токов и напряжений на вводах ПА и присоединениях контактной сети тяговых подстанций постоянного тока с интервалом времени в одну секунду.

Апробация указанной системы была выполнена на экспериментальном полигоне Шаля – Подволошная Свердловской железной дороги [8]. В ходе апробации были получены данные, указывающие на неравномерность загрузки преобразовательных агрегатов при их параллельной работе, достигающей в отдельных случаях 25 % [9]. Также были получены экспериментально измеренные значения потерь электроэнергии в преобразовательно-выпрямительных агрегатах, которые в зависимости от типа выпрямителя составили от 2,2 до 6,7 % от объема переработки электроэнергии на тягу поездов.

С целью снижения потерь электроэнергии в оборудовании тяговых подстанций постоянного тока в Омском государственном университете путей сообщения была разработана Система резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока (далее – Система), принцип работы которой основан на управлении выключателями вводов преобразовательных трансформаторов с учетом анализа установленных значений токовых нагрузок в тяговой сети [10]. Для оценки влияния уставок срабатывания режимной автоматики Системы на эффективность ее работы рассмотрим порядок расчета потерь электроэнергии в ПА.

Система имеет встроенный модуль памяти, позволяющий фиксировать с односекундным интервалом времени действующее значение фазного напряжения первичной обмотки трансформатора и действующее значение тока нагрузки каждого ПА, по результатам измерений которых можно определить потери электрической энергии.

Потери электроэнергии в ПА включают в себя составляющие потерь в преобразовательных трансформаторах и выпрямителях и рассчитываются по формуле, кВт·ч:

$$\sum_T \Delta W^{\text{ПА}} = \sum_j \sum_{i=1}^T (\Delta W_{ji}^{\text{ПТ}} + \Delta W_{ji}^{\text{В}}), \quad (1)$$

где $\Delta W_{ji}^{\text{ПТ}}$ – потери электроэнергии в j -м преобразовательном трансформаторе в i -м расчетном периоде, определяемые по формуле, кВт·ч:

$$\begin{aligned} \Delta W_{ji}^{\text{ПТ}} = \Delta W_{\text{xx},ji}^{\text{ПТ}} + \Delta W_{\text{н},ji}^{\text{ПТ}} = \Delta P_{\text{xx},j} \sum_{i=1}^T t_{\text{п},ji} \cdot \left(\frac{U_{1i}}{U_{1\text{ном}}} \right)^2 + \\ + \Delta P_{\text{к.з},j} \cdot \sum_{i=1}^T t_{\text{п},ji} \cdot \left(\frac{I_{d,ji}}{I_{d\text{ном},j}} \right)^2, \end{aligned} \quad (2)$$

где $t_{\text{п},ji}$ – продолжительность работы j -го преобразовательного агрегата в i -м интервале усреднения измерений Системы (интервал усреднения равен 1 секунде), ч;

$\Delta P_{к.з.j}, \Delta P_{х.х.j}$ – потери холостого хода и короткого замыкания j -го преобразовательного трансформатора, кВт;

U_{li} – действующее значение линейного напряжения первичной обмотки трансформатора в интервале усреднения, В;

$U_{1ном}$ – номинальное значение линейного напряжения первичной обмотки трансформатора, В;

$I_{d_{ji}}$ – среднее значение выпрямленного тока j -го преобразователя в i -м интервале усреднения, А:

$$I_{d_{ji}} = \frac{I_{1ji} \cdot b_j}{k_{тпа_j}}, \quad (3)$$

I_{1ji} – действующее значение тока нагрузки j -го преобразовательного трансформатора в i -м интервале усреднения, А;

b_j – коэффициент приведения выпрямленного тока j -го ПА в зависимости от схемы выпрямителя;

$k_{тпа_j}$ – коэффициент трансформации j -го преобразовательного трансформатора:

$$k_{тпа_j} = \frac{U_{1j}}{U_{2j}}, \quad (4)$$

U_{1j}, U_{2j} – действующие значения линейных напряжений сетевой и вентильных обмоток j -го преобразовательного трансформатора, принятые в соответствии с паспортными данными, В;

$I_{dном_j}$ – номинальный ток j -го преобразовательного трансформатора, приведенный к цепи выпрямленного напряжения, А;

ΔW_{ji}^B – потери электроэнергии в j -м выпрямительном преобразователе тяговой подстанции в i -м интервале усреднения, определяемые по формуле, кВт·ч:

$$\Delta W_{ji}^B \approx \frac{k_{сх_j} s_j U_{0j} I_{d_{ji}}}{10^3} \left(1 + \frac{k_{сх_j} R_{д_j} I_{d_{ji}}}{2 \cdot a_j U_{0j}} \right), \quad (5)$$

где $k_{сх_j}$ – коэффициент схемы выпрямления j -го выпрямительного преобразователя для мостовых схем $k_{сх} = 2$, для нулевых схем $k_{сх} = 1$;

s_j, a_j – число последовательно и параллельно включенных диодов в вентильном плече j -го выпрямительного преобразователя;

U_{0j} – пороговое напряжение диода j -го выпрямительного преобразователя, В;

$R_{д_j}$ – усредненное динамическое сопротивление прямой ветви вольт-амперной характеристики диода j -го выпрямительного преобразователя, Ом.

Как уже было сказано, режим работы ПА во многом зависит от значений выбранных уставок включения и отключения Системы. Рассмотрим влияние уставок режимной автоматики Системы на уровень потерь электрической энергии на примере условной тяговой подстанции, характеристики которой приведены в таблице 1.

Значения уставок режимной автоматики на напряжении 10 кВ, рассчитанные в соответствии с рекомендациями методики [2] имеют следующие значения:

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

ток включения первой ступени автоматики резервного ПА – 455 А;

ток включения второй ступени автоматики резервного ПА – 649 А;

ток отключения автоматики резервного ПА – 340 А;

ток, при котором наблюдается равенство потерь электроэнергии с одним и двумя работающими ПА, – 420 А;

выдержка времени включения в параллельную работу резервного ПА по току уставки первой ступени – 240 с;

выдержка времени включения в параллельную работу резервного ПА по току уставки второй ступени – 8 с;

выдержка времени на отключение резервного ПА – 360 с.

Таблица 1 – Характеристики оборудования

Наименование параметра		Значение параметра	
		ПА1	ПА2
Схема преобразовательного агрегата		параллельного типа с уравнительным реактором	
Число пульсаций		12	12
Тип преобразовательного трансформатора		ТРДП-12500/10ЖУ1	
Схема соединения обмоток преобразовательного трансформатора		Y / Δ	
Паспортные данные преобразовательного трансформатора:			
	номинальная мощность, МВ·А	11,4	11,4
	потери короткого замыкания, кВт	71,4	69,1
	потери холостого хода, кВт	16,5	15
	номинальный выпрямленный ток, А	3200	3200
	номинальное значение линейного напряжения сетевой обмотки трансформатора, В	10500	10500
	номинальное значение линейного напряжения вентильных обмоток трансформатора, В	2620	2620
	коэффициент приведения выпрямленного тока	0,785	0,785
	напряжение короткого замыкания, о. е.	0,08	0,08
Тип уравнительного реактора		УРОМ-1000У1	
Паспортные данные уравнительного реактора:			
	потери в стали, кВт	3	3
	потери в меди, кВт	3,26	3,26
Тип выпрямителя		БСЕ-1 4ВД5-24	
Паспортные данные выпрямителя:			
	тип силового диода	Д 453-2000	ВЛ-200
	пороговое напряжение диодов, Ом	1,5	0,92
	число диодов в плече, включенных последовательно, шт.	4	7
	число диодов в плече, включенных параллельно, шт.	1	5
	дифференциальное сопротивление диода, Ом	0,0003	0,0007

Порядок оценки влияния уставок Системы на потери электроэнергии выглядит следующим образом. В качестве исходных данных используются значения тяговой нагрузки отдельно по каждому ПА, полученные по данным Системы с односекундным интервалом времени. Далее, используя имитационную модель режимов работы Системы, разработанную в ОмГУПСе [11], и изменяя значения исходных токовых и временных уставок, получаем новый файл, содержащий расчетные значения тяговых токов каждого ПА, а также количество переключений Системы за сутки. На рисунке 1 приведены примеры результатов моделирования режима работы тяговой подстанции.

Далее по формулам (1) – (5) рассчитываются потери электрической энергии в ПА. В таблицах 2, 3 приведены результаты моделирования при различных уставках режимной автоматики Системы в зависимости от тяговой нагрузки.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

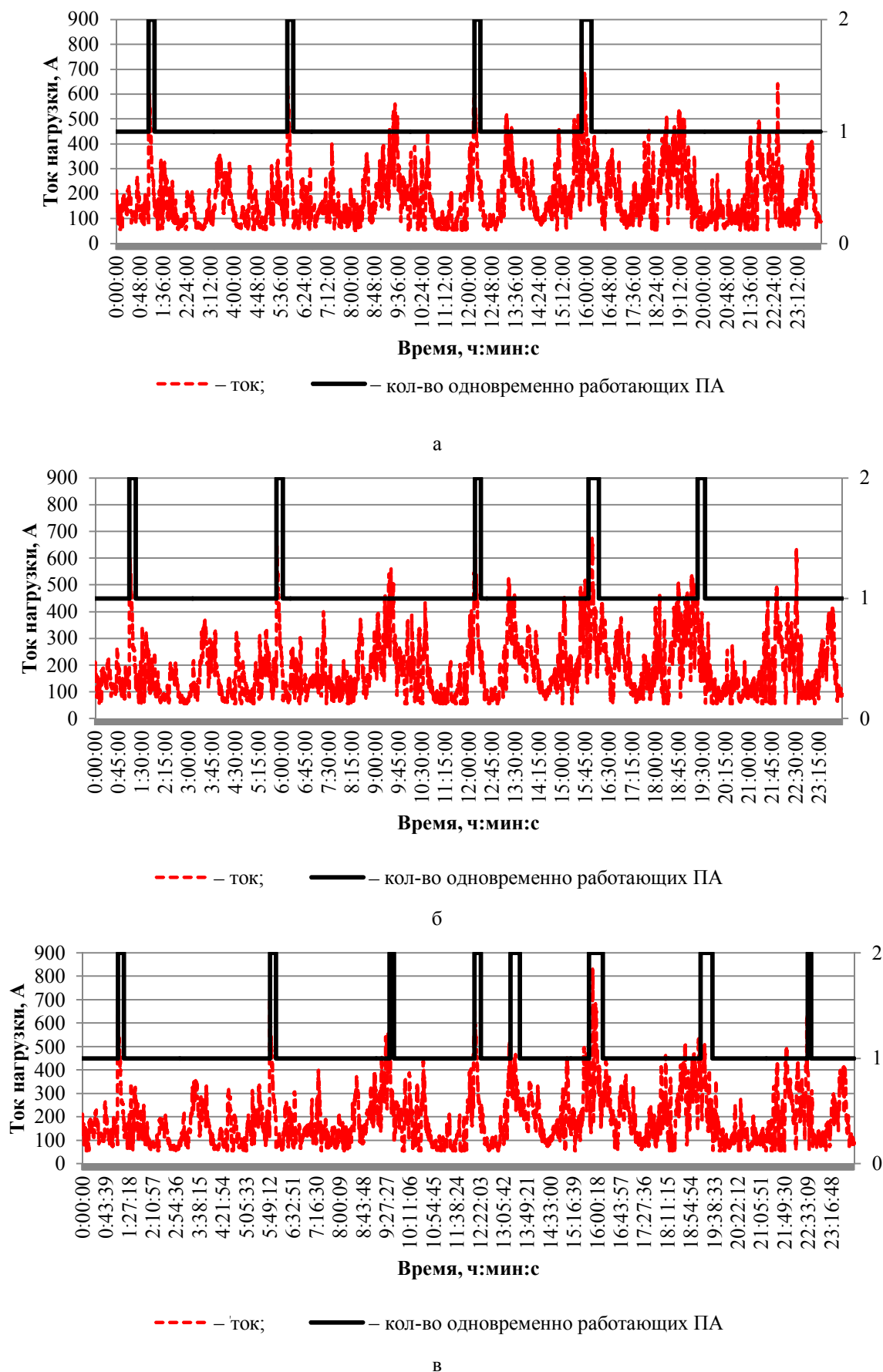


Рисунок 1 – Результаты моделирования режима работы Системы при различных токах включения первой ступени ($W_{\text{тяг}} = 25 \text{ млн кВт} \cdot \text{ч}$): а) $I_{\text{вкл}}^1 - 460 \text{ А}$; б) $I_{\text{вкл}}^1 - 400 \text{ А}$; в) $I_{\text{вкл}}^1 - 360 \text{ А}$

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Таблица 2 – Результаты оценки влияния тока уставки включения первой ступени автоматики резервного ПА

Годовой расход электроэнергии по подстанции $W_{\text{тяг}}$, млн кВт·ч	Ток уставки включения первой ступени, А											
	460		440		420		400		380		360	
	n	$\Delta W^{\text{ПА}}$	n	$\Delta W^{\text{ПА}}$	n	$\Delta W^{\text{ПА}}$	n	$\Delta W^{\text{ПА}}$	n	$\Delta W^{\text{ПА}}$	n	$\Delta W^{\text{ПА}}$
25	4	927	4	927	4	926	5	925	6	924	8	923
30	9	1060	9	1059	9	1058	12	1056	13	1056	14	1055
35	10	1249	11	1248	12	1248	15	1246	19	1245	20	1244
40	11	1436	13	1434	16	1432	17	1431	18	1429	19	1428
45	14	1587	15	1585	17	1583	18	1582	19	1580	21	1579

Примечание. n – количество включений резервного ПА в параллельную работу; $\Delta W^{\text{ПА}}$ – потери электроэнергии в преобразовательных агрегатах, кВт·ч в сутки.

Как видно из данных таблицы 2, уменьшение тока уставки не приводит к какому-либо значительному изменению потерь электрической энергии. При этом наблюдается увеличение количества переключений Системы, т. е. моментов включения/отключения преобразовательных трансформаторов.

Аналогичным образом получены результаты моделирования при изменении временных уставок срабатывания Системы. Результаты моделирования приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты оценки влияния временных уставок включения/отключения автоматики резервного ПА

Нагрузка, млн кВт·ч	Выдержка времени включения в параллельную работу резервного ПА по току уставки первой ступени, с											
	120		150		180		210		240		270	
	n	$\Delta W^{\text{ПА}}$	n	$\Delta W^{\text{ПА}}$	n	$\Delta W^{\text{ПА}}$	n	$\Delta W^{\text{ПА}}$	n	$\Delta W^{\text{ПА}}$	n	$\Delta W^{\text{ПА}}$
25	6	927	4	928	4	928	4	928	4	928	4	928
45	17	1583	14	1586	14	1586	13	1588	12	1589	11	1590
Нагрузка, млн кВт·ч	Выдержка времени на отключение резервного ПА, с											
	360		390		420		480		540		600	
	n	$\Delta W^{\text{ПА}}$	n	$\Delta W^{\text{ПА}}$	n	$\Delta W^{\text{ПА}}$	n	$\Delta W^{\text{ПА}}$	n	$\Delta W^{\text{ПА}}$	n	$\Delta W^{\text{ПА}}$
25	4	928	4	928	4	928	4	927	4	927	4	927
45	17	1583	17	1583	17	1583	16	1582	14	1581	13	1580

Анализируя полученные путем моделирования режимов работы ПА данные, можно сделать следующие выводы.

1. Изменение токовых и временных уставок срабатывания режимной автоматики Системы, как в большую, так и меньшую сторону от расчетного значения, не приводит к заметному изменению потерь электрической энергии в ПА. При этом изменяется количество срабатываний Системы. Увеличение количества переключений ПА приводит к дополнительному износу выключателей выпрямительных преобразователей тяговых подстанций.

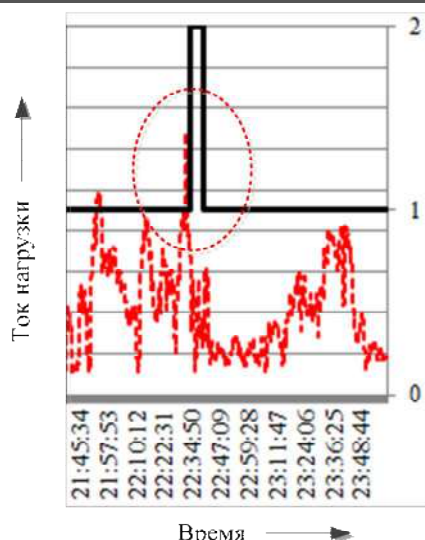


Рисунок 2 – Пример момента времени запаздывания срабатывания режимной автоматики Системы

2. Увеличение выдержки времени на включение в параллельную работу резервного ПА приводит к запаздыванию срабатывания Системы (фрагмент такого момента приведен на рисунке 2), т. е. подключение резервного ПА происходит уже при снижении тяговой нагрузки. Это в свою очередь снижает эффективность работы самой Системы и приводит к перегрузке основного ПА.

При этом снижение выдержки времени приводит к дополнительным переключениям резервного ПА. Из этого следует сделать вывод о том, что временная уставка на включение в параллельную работу резервного ПА должна быть динамической, т. е. должна изменяться в зависимости от скорости изменения тяговой нагрузки.

Список литературы

1. СТО РЖД 07.021.2-2015. Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки. Часть 2. Методика выбора алгоритмов действия, уставок блокировок и выдержек времени автоматики в системе тягового электроснабжения. Утвержден распоряжением ОАО «РЖД» от 27.05.2015 № 1351р. – Москва : ОАО «РЖД», 2016. – 11 с. – Текст : непосредственный.
2. Методика выбора уставок режимной автоматики преобразовательных агрегатов тяговых подстанций постоянного тока. Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 21.12.2012 № 2649р. – Москва : ОАО «РЖД», 2013. – 31 с. – Текст : непосредственный.
3. В рамках реализации проекта «Цифровая железная дорога» / А. А. Кузнецов, В. Т. Черемисин [и др.]. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2020. – № 11. – С. 60 – 63.
4. Этапы реализации автоматизированной системы мониторинга энергоэффективности перевозочного процесса / В. Т. Черемисин, С. Ю. Ушаков [и др.]. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 3. – С. 45 – 49.
5. Cheremisin V., Nikiforov M., Kashtanov A., Ushakov S. Intelligent Automated System for the Monitoring of Railway Areas with a Low Transport Process Energy Efficiency. *Advances in Intelligent Systems and Computing: Materials of the International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport «EMMFT 2017»*, vol. 692. Springer, 2017, pp. 83 – 91.
6. Черемисин, В. Т. Повышение энергетической эффективности электротяги при внедрении мониторинга электроэнергии на фидерах контактной сети / В. Т. Черемисин, А. Л. Каштанов, М. М. Никифоров. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала – 2015. – № 2 (45). – С. 67 – 70.
7. Патент № 165423 Российская Федерация, МПК В60М3/00, H02J1/00. Блок мониторинга и учета электроэнергии : № 2015151245/11 : заявлено 30.11.2015 : опубликовано 20.10.2016 / Черемисин В. Т., Чижда С. Н., Никифоров М. М., Лаврухин А. А., Малютин А. Г., Окишев А. С., Плотников Ю. В., Дегтерева А. В.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения.
8. Никифоров, М. М. Апробация технологии функционирования автоматизированной системы мониторинга энергоэффективности перевозочного процесса / М. М. Никифоров. – Текст :

непосредственный // Инновации в системах обеспечения движения поездов : материалы междуна- р. науч.-практ. конф. – Самара : Самарский гос. ун-т путей сообщения, 2016. – С. 70 – 73.

9. Никифоров, М. М. Экспериментальная оценка потерь электроэнергии в преобразовательных агрегатах тяговых подстанций постоянного тока за счет применения АСУЭ ФКС / М. М. Никифоров, Ю. В. Плотников. – Текст : непосредственный // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте : материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2016. – С. 234 – 241.

10. Каштанов, А. Л. Интеллектуальная система резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока / А. Л. Каштанов, М. М. Никифоров, С. Ю. Ушаков. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы науч. конф. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2020. – С. 370 – 376.

11. Каштанов, А. Л. Моделирование режимов работы интеллектуальной системы резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока / А. Л. Каштанов, М. М. Никифоров, Ю. В. Плотников. – Текст : непосредственный // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2020. – № 5. – С. 22 – 26.

References

1. *STO RZD 07.021.2-2015 «Zashchita sistem elektrosnabzheniya zheleznoy dorogi ot korotkikh замыканий i peregruzki. Chast' 2. Metodika vybora algoritmov deystviya, ustavok blokirovok i vyderzhek vremeni avtomatiki v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya»* (STO RZD 07.021.2-2015 «Protection of railway power supply systems from short circuits and overload. Part 2. Method of selecting algorithms of action, setpoints of locks and time delays of automation in the traction power supply system»). Moscow, JSC «Russian Railways», 2015, 11 p.

2. *Metodika vybora ustavok rezhimnoy avtomatiki preobrazovatel'nykh agregatov tyagovykh podstantsiy postoyannogo toka* (Methods for selecting the settings of the operating automation of converting units of DC traction substations). Moscow, JSC «Russian Railways, 2012, 31 p.

3. Kuznetsov A. A., Cheremisin V. T., Nikiforov M. M., Sidorov O. A., Smerdin A. N., Kharlamov V. V. As part of the implementation of the project «Digital Railway» [V ramkakh realizatsii proyekta «Tsifrovaya zheleznaya doroga»]. *Zheleznodorozhnyi transport – Railway transport*, 2020, no. 11, pp. 60 – 63.

4. Cheremisin V. T., Ushakov S. Yu., Pashkov D. V., Nikiforov M. M. Stages of the automated monitoring system energy efficiency implementation of transportation process [Etapy realizatsii avtomatizirovannoy sistemy monitoring energoeffektivnosti perevozochnogo protsessa]. *Zheleznodorozhnyi transport – Railway transport*, 2015, no. 3, pp. 45 – 49.

5. Cheremisin V., Nikiforov M., Kashtanov A., Ushakov S. Intelligent Automated System for the Monitoring of Railway Areas with a Low Transport Process Energy Efficiency. *Advances in Intelligent Systems and Computing: Materials of the International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport «EMMFT 2017»*, vol. 692. Springer, 2017, pp. 83 – 91.

6. Cheremisin V. T., Kashtanov A. L., Nikiforov M. M. The improving of electric traction power efficiency via the introduction of electricity monitoring on the contact network feeders [Povysheniye energeticheskoy effektivnosti elektrotyagi pri vnedrenii monitoringa elektroenergii na fiderakh kontaktnoy seti]. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2015, no. 2 (45), pp. 67 – 70.

7. Cheremisin V. T., Chizhma S. N., Nikiforov M. M., Lavrukhin A. A., Maliutin A. G., Okishev A. S., Plotnikov Iu. V., Degtereva A. V. *Patent RU 165423*, 30.11.2015.

8. Nikiforov M. M. Testing the functioning technology of an automated system for monitoring the energy efficiency of the transportation process [Aprobatsiya tekhnologii funktsionirovaniya avtomatizirovannoy sistemy monitoringa energoeffektivnosti perevozochnogo protsessa]. *Materi- aly I Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: «Innovatsii v sistemakh obespecheniya*

dvizheniya poyezdov» (Proceedings of the I International Scientific and Practical Conference «Innovations in train traffic support systems»). – Samara, SSTU, 2016, pp. 70 – 73.

9. Nikiforov M. M., Plotnikov Yu. V. Experimental Estimation of Electric Power Losses in Converter Units of DC Traction Substations due to the Application of PMS FKS [Eksperimental'naya otsenka poter' elektroenergii v preobrazovatel'nykh agregatakh tyagovykh podstantsiy postoyannogo toka za schet primeneniya ASUE FKS]. *Pribory i metody izmereniy, kontrolya kachestva i diagnostiki v promyshlennosti i na transporte. Materialy vtoroy vse-rossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem* (Instruments and Methods of Measurements, Quality Control and Diagnostics in Production and Transport. Materials of the second All-Russian science and technology conference with international participation). – Omsk, 2016, pp. 234 – 241.

10. Kashtanov A. L., Nikiforov M. M., Plotnikov Yu. V. Intelligent power reserving system for dc traction substations [Intellektual'naya sistema rezervirovaniya moshchnosti tyagovykh podstantsiy postoyannogo toka]. *Tezisy dokladov Mezhdunarodnoi konferentsii «Innovatsionnyye proyekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte»* (Abstracts of the Int. conference «Innovative projects and technologies in education, industry and transport»). – Omsk, 2020, pp. 370 – 376.

11. Kashtanov A. L., Nikiforov M. M., Plotnikov Yu. V. Modeling the operation modes of the intellectual power reservation systems for DC traction substations [Modelirovaniye rezhimov raboty intellektual'noy sistemy rezervirovaniya moshchnosti tyagovykh podstantsiy postoyannogo toka]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta – Electronics and electrical equipment of transport*, 2020, no. 5, pp. 22 – 26.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Каштанов Алексей Леонидович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, начальник научно-производственной лаборатории «Энергосбережение и энергоэффективность на железнодорожном транспорте», доцент кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 44-39-23.

E-mail: kesh-al@rambler.ru

Никифоров Михаил Михайлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, заместитель директора научно-исследовательского института энергосбережения на железнодорожном транспорте, ОмГУПС.

Тел.: (3812) 44-39-23.

E-mail: nikiforovmm@rambler.ru

Плотников Юрий Викторович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 44-39-23.

E-mail: ra9mjr@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kashtanov Alexey Leonidovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Head of Research and Production Laboratory «Energy saving and energy efficiency on the railway Transport», The Senior Lecturer Of Chair «Theoretical Electrical Engineering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 44-39-23.

E-mail: kesh-al@rambler.ru

Nikiforov Mikhail Mikhailovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, deputy director Research Institute for Energy Efficiency in Railway Transport, OSTU.

Phone: +7 (3812) 44-39-23.

E-mail: nikiforovmm@rambler.ru

Plotnikov Yuriy Viktorovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Postgraduate student of the department «Electric railways rolling stock».

Phone: +7 (3812) 44-39-23.

E-mail: ra9mjr@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Каштанов, А. Л. Влияние уставок срабатывания системы резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока на потери электроэнергии / А. Л. Каштанов, М. М. Никифоров, Ю. В. Плотников. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 4 (44). – С. 19 – 28.

Kashtanov A. L., Nikiforov M. M., Plotnikov Yu. V. Influence of settings power reservation systems of DC traction substations to losses of electricity. Journal of Transsib Railway Studies, 2020, no. 4 (44). pp. 19 – 28 (In Russian).

УДК 621.313.33:621.314.57

В. В. Харламов, Д. И. Попов, П. Г. Петров

Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Российская Федерация

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СХЕМ ИСПЫТАНИЙ АСИНХРОННЫХ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ВЗАИМНОЙ НАГРУЗКИ

Аннотация. В статье проведен анализ схем испытаний асинхронных тяговых двигателей методом взаимной нагрузки с применением генераторов постоянного тока с независимым возбуждением в качестве нагрузочных машин и питанием от трехфазной сети переменного тока с частотой 50 Гц. Рассмотрены особенности функционирования каждой из приведенных схем взаимной нагрузки. Отмечены недостатки данных схем, обусловленные в одном случае наличием избыточного состава оборудования, в другом – отсутствием защиты от короткого замыкания в якорной цепи нагрузочного генератора и сложностью ее подключения к звену постоянного тока. Предложена схема, разработанная авторами, лишенная отмеченных недостатков известных схем и сочетающая в себе все их преимущества, являющаяся наиболее простой как в силовой части, так и в управлении процессом подключения обмотки якоря к звену постоянного тока двухзвенного преобразователя частоты. Представлена математическая модель системы испытаний, состоящей из асинхронного тягового двигателя, нагрузочного генератора постоянного тока с независимым возбуждением и двухзвенного статического преобразователя частоты. Математическая модель данной системы испытаний составлена из частей, соответствующих ее отдельным элементам. Представленная математическая модель позволяет осуществлять расчет статических и динамических режимов работы предложенной схемы на этапе разработки электротехнического комплекса для испытаний асинхронных тяговых двигателей. Даны рекомендации по внедрению разработок в процесс эксплуатации асинхронных тяговых двигателей в локомотивных ремонтных депо. Также отмечена целесообразность внедрения результатов работы в организациях-разработчиках испытательных станций для асинхронных тяговых двигателей.

Ключевые слова: техническое обслуживание, эксплуатация, подвижной состав, асинхронный тяговый двигатель, взаимная нагрузка.

Viktor V. Kharlamov, Denis I. Popov, Pavel G. Petrov

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

IMPROVING OF TEST SCHEMES FOR INDUCTION TRACTION MOTORS USING THE METHOD OF MUTUAL LOAD

Abstract. The article analyzes the test schemes of induction traction motors by the mutual load method using DC generators as load machines and powered by a three-phase AC network with a frequency of 50 Hz. Features of functioning of each of the given schemes of mutual loading are considered. The disadvantages of these schemes are noted, due to the presence of excess equipment or the lack of short-circuit protection in the anchor circuit of the load generator and the complexity of its connection to the DC link. The scheme developed by the authors is proposed, devoid of the noted disadvantages of the known schemes and combining all their advantages, which is the simplest both in the power part and in controlling the process of connecting the armature winding to the DC link of a frequency Converter. A mathematical model of a test system consisting of an induction traction motor, a DC load generator and a two-link static frequency Converter is presented. The mathematical model of this test system is made up of parts corresponding to its individual elements. The presented mathematical model makes it possible to calculate the static and dynamic operating modes of the proposed scheme at the stage of development of an electrical complex for testing induction traction mo-

tors. Recommendations on the implementation of developments in the operation of induction traction motors in locomotive repair depots are given. The expediency of implementing the results of work in organizations-developers of test stations for induction traction motors is also noted.

Keywords: maintenance, operation, rolling stock, induction traction motor, mutual load.

Интенсивное развитие элементной базы силовой полупроводниковой техники в конце XX, начале XXI в. обусловило появление преобразователей частоты большой мощности, позволяющих осуществлять управление асинхронными тяговыми электродвигателями (ТЭД) подвижного состава (например, электровозов, тепловозов, электропоездов). Новая элементная база дала возможность разработать и внедрить схемы, необходимые в эксплуатации ТЭД, позволяющие осуществлять их послеремонтные (приемосдаточные) испытания на нагрев с применением метода взаимной нагрузки, обладающего высокой энергетической эффективностью [1]. ГОСТ 2582-2013 предписывает наличие в программе приемосдаточных испытаний асинхронных тяговых двигателей (АТЭД) испытания на нагревание в номинальном режиме в течение 1 ч и допускает его выполнение в режиме взаимной нагрузки.

В настоящее время АТЭД эксплуатируются в основном на единицах нового подвижного состава, находящегося на гарантии. Однако количество негарантийных случаев выхода из строя АТЭД ежегодно возрастает, и можно с уверенностью спрогнозировать значительное усиление данной тенденции. В связи с этим в настоящее время постепенно идет процесс оснащения ремонтных депо станциями, предназначенными для испытания АТЭД.

Одним из вариантов схем, позволяющих осуществить взаимную нагрузку, являются схемы с нагрузочными генераторами постоянного тока (ГПТ). Пример такой схемы приведен на рисунке 1 [2].

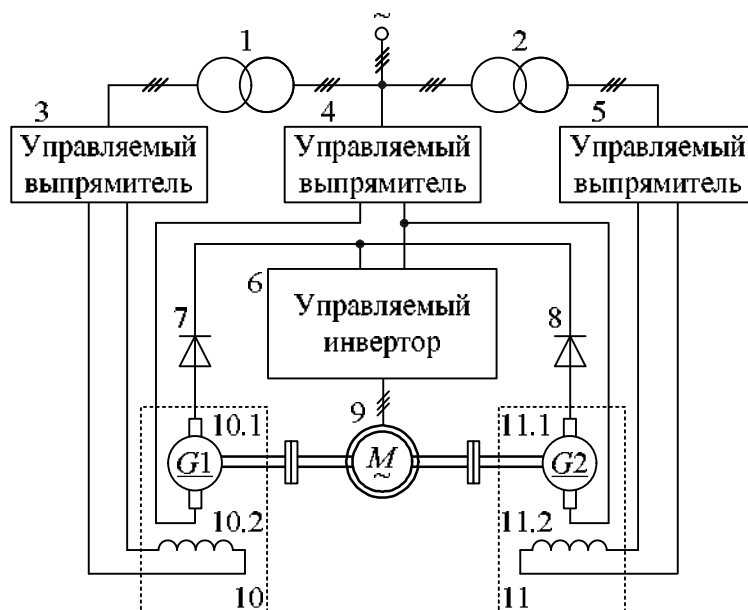


Рисунок 1 – Схема испытания АТЭД с двумя нагрузочными генераторами постоянного тока методом взаимной нагрузки

Необходимость в схеме двух ГПТ 4 и 5 объясняется тем, что номинальная мощность испытуемого асинхронного тягового электродвигателя 1 может составлять 1200 – 1500 кВт при том, что в качестве нагрузочных машин предлагаются коллекторные ТЭД с номинальной мощностью 800 кВт.

На представленной схеме испытуемый АТЭД 9 имеет выходы вала с двух сторон, с которых посредством муфт он соединен с валами нагрузочных ГПТ 10 и 11. Нагрузочные ГПТ имеют якорные обмотки 10.1 и 11.1, подключенные к цепи постоянного тока управляемого

выпрямителя-инвертора 9, и обмотки возбуждения 10.2 и 11.2, подключенные к выходам управляемых выпрямителей 3 и 5, питающихся от понизительных трансформаторов 1 и 2.

Обмотка статора АТЭД 9 подключена к выходу управляемого инвертора 6, получающего питание от управляемого выпрямителя 4 и нагрузочных ГПТ 10 и 11. Для предотвращения возможности короткого замыкания по цепям обмоток якоря ГПТ 10.1 и 11.1 к ним подключены диоды 7 и 8.

Схема, приведенная на рисунке 1, обеспечивает режим нагрузки в соответствии со следующим принципом. Вначале запускают АТЭД 9 в режиме холостого хода (х. х.) до требуемой скорости вращения ротора n_2 путем подачи напряжения от инвертора напряжения 6. С валом АТЭД 9 жестко соединены якоря нагрузочных ГПТ 10.1 и 11.1, которые разгоняются вместе с ним. Для дальнейшего увеличения ЭДС якорей ГПТ подключаются обмотки возбуждения 10.2 и 11.2 к управляемым выпрямителям 3 и 5. Обмотка якоря ГПТ 10.1 включена последовательно в звене постоянного тока (ЗПТ), соединяющем выход выпрямителя 4 и вход инвертора 6, тем самым позволяя повысить в данной цепи напряжение. Обмотка якоря ГПТ 11.1 включена параллельно входу инвертора 6. Выпрямитель 4 получает питание от трехфазной сети с линейным напряжением 380 В и частотой 50 Гц.

Недостатком схемы, приведенной на рисунке 1, является избыточность элементов. Например, при одинаковых мощностях испытуемого АТЭД 9 и ГПТ 11 отсутствует необходимость во втором ГПТ 10.

Схема испытания АТЭД с применением принципа взаимной нагрузки с одним нагрузочным ГПТ приведена на рисунке 2 [3]. На приведенной схеме изображены только элементы силовой части и датчики напряжения. Остальные элементы на схеме опущены.

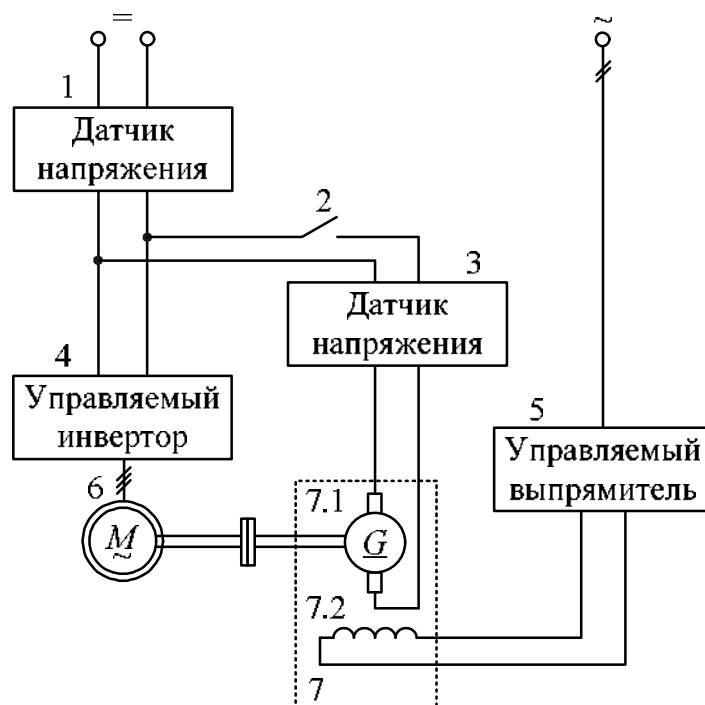


Рисунок 2 – Схема испытания АТЭД с одним нагрузочным генератором постоянного тока методом взаимной нагрузки

Данная схема работает следующим образом. От источника постоянного тока подключается питание на инвертор 4. На выходе инвертора посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ) формируется переменное напряжение, подаваемое на асинхронный двигатель 6, который запускается в режиме х. х. до требуемой частоты вращения ротора. Далее подается питание на обмотку возбуждения 7.2 от выпрямителя 5 и осуществляется сравнение напряжений, фиксируемых датчиками 1 и 3. В случае равенства напряжений контактор 2

подключает обмотку якоря ГПТ 7.1 к ЗПТ. Дальнейшее увеличение напряжения, подаваемого на обмотку возбуждения 7.2, приводит к увеличению ЭДС якоря, что переводит ГПТ в генераторный режим и увеличивает нагрузку АТЭД 6.

Схема испытаний АТЭД, приведенная на рисунке 2, является более простой и надежной по сравнению с предыдущей (см. рисунок 1), так как имеет меньшее количество преобразователей и, как следствие, меньшие потери мощности. К недостаткам схемы, представленной на рисунке 2, можно отнести усложнение процесса подключения якоря ГПТ в ЗПТ.

Для устранения недостатков двух рассмотренных схем в настоящей работе предложена следующая схема, приведенная на рисунке 3, на которую получен патент на полезную модель [4].

В данной схеме источником питания является двухзвенный преобразователь частоты 1, питающийся от трехфазной сети переменного тока, имеющий на входе неуправляемый выпрямитель. Обмотка возбуждения 3.2 нагрузочной машины постоянного тока 3 получает питание от звена постоянного тока преобразователя частоты 1.2. В процессе испытаний при необходимости создания механической нагрузки асинхронному двигателю путем уменьшения сопротивления заранее введенного регулировочного реостата 5 увеличивается магнитный поток нагрузочной машины 3. При этом величина электродвижущей силы обмотки якоря 3.1 становится больше, чем напряжение на выходе звена постоянного тока 1.2, следовательно, машина постоянного тока 3 нагружается в режиме генератора, создавая тем самым механический момент нагрузки на валу испытуемого асинхронного двигателя 2. Электрическая энергия, вырабатываемая нагрузочной машиной постоянного тока 3, передается испытуемому асинхронному двигателю 2 от обмотки якоря 3.1 через звено постоянного тока 1.2 и управляемый инвертор 1.3.

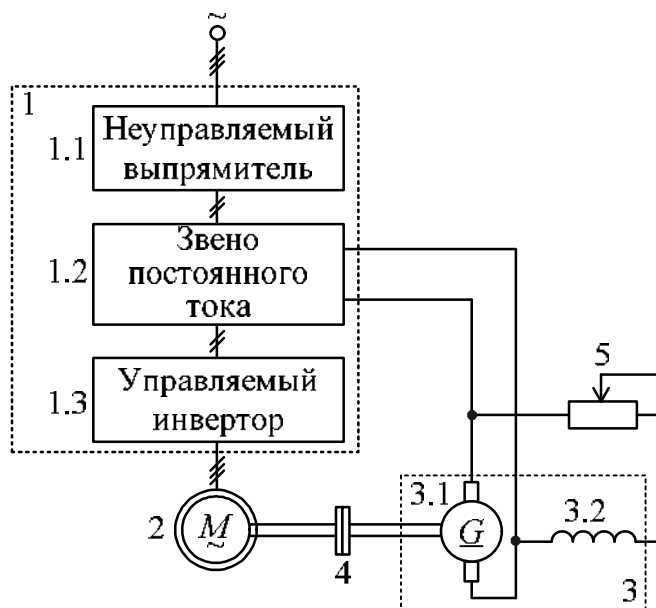


Рисунок 3 – Схема испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки с нагрузочным генератором постоянного тока

Схема испытаний асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки, представленная на рисунке 3, является наиболее простой из схем, в которых применяется нагрузочный генератор постоянного тока.

Более совершенным вариантом схемы с нагрузочным генератором постоянного тока является схема, приведенная на рисунке 4. На вариант данной схемы с элементами системы управления, позволяющей обеспечить автоматизацию процесса испытаний, авторами получен патент на полезную модель [5].

Отличие данной схемы (см. рисунок 4) от предыдущей (см. рисунок 3) состоит в наличии диода 6, включенного в цепь обмотки якоря 3.1 нагрузочного генератора постоянного тока 3. Данный диод так же, как и диоды 7 и 8, приведенные на рисунке 1, обеспечивает защиту от короткого замыкания обмотки якоря при малых частотах ее вращения и наведенной в ней ЭДС.

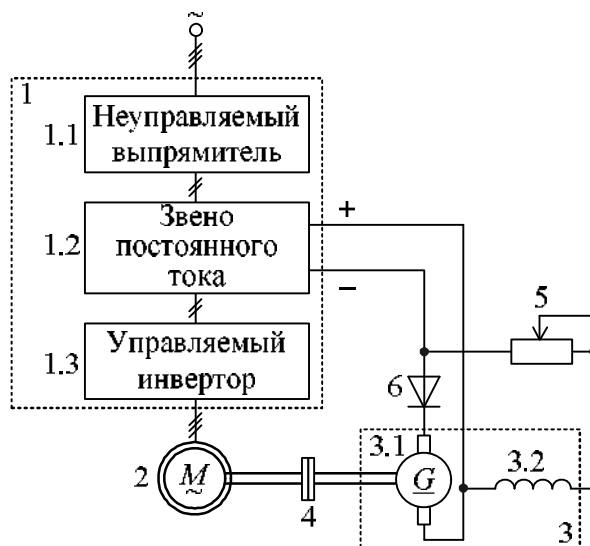


Рисунок 4 – Схема испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки с нагрузочным генератором постоянного тока и диодом в цепи якоря для защиты от короткого замыкания

Таким образом, данная схема сочетает в себе все преимущества предыдущих схем, является наиболее простой как в силовой части, так и в управлении процессом подключения обмотки якоря 3.1 к звену постоянного тока преобразователя частоты 1. При малых значениях ЭДС обмотки якоря 3.1 она оказывается отсеченной от звена постоянного тока диодом 6. После запуска асинхронного двигателя 2 на холостом ходу и установления достаточного тока в обмотке возбуждения 3.2 ЭДС обмотки якоря превысит напряжение в ЗПТ и генератор 3 начнет передавать вырабатываемую им электроэнергию на вход управляемого инвертора 1.3.

Разработка систем испытаний асинхронных ТЭД требует подбора соответствующего им оборудования и проведения предварительных расчетов стационарных и переходных режимов. С этой целью необходимо иметь математическую модель данной системы, которую можно составить из нескольких элементов.

Математическая модель АТЭД может быть принята из работ [6, 7]. Подробная схема замещения системы испытаний и принятые обозначения приведены в источнике [8].

Математическая модель ГПТ с независимым (параллельным) возбуждением может быть записана в виде:

$$\begin{cases} \frac{dI_a}{dt} = \frac{1}{\Sigma L_a} \left(-u_{\text{вып}} - I_a \Sigma R_a + \omega \Phi^* \frac{U_H}{\omega_H} \right); \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J_{\text{ГПТ}}} \left(I_a \Phi^* \frac{M_H}{I_{aH}} - M_B \right), \end{cases} \quad (1)$$

где I_a – ток якоря;

ω – угловая скорость вращения вала;

$\Sigma L_a, \Sigma R_a$ – суммарные индуктивность и сопротивление цепи якоря нагрузочного генератора постоянного тока (НГПТ);

$J_{\text{НПТ}}$ – момент инерции якоря;

$U_{\text{н}}$ – номинальное напряжение генератора;

$\omega_{\text{н}}$ – номинальная угловая частота вращения якоря;

$M_{\text{н}}$ – номинальный момент;

$I_{\text{ан}}$ – номинальный ток якоря;

Φ^* – отношение значения основного магнитного потока НГПТ к его номинальному значению;

$M_{\text{в}}$ – внешний вращающий момент (при отрицательном значении становится моментом сопротивления вращению).

Дополнив математическую модель АТЭД системой (1) и задавшись зависимостью $\Phi^* = f(I_{\text{в}}^*)$, получим следующую математическую модель для механически связанной системы «асинхронный двигатель – генератор постоянного тока»:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{di_{1a}}{dt} &= \frac{1}{L_1 \sigma_1} \left[u_{1a} - i_{1a} R_{l_1} + k_{l_r} \left[i'_{2a} R'_{l_2} + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (L_{12} (i_{1b} - i_{1c}) + L_{12} (i'_{2b} - i'_{2c})) \right] \right]; \\ \frac{di_{1b}}{dt} &= \frac{1}{L_1 \sigma_1} \left[u_{1b} - i_{1b} R_{l_1} + k_{l_r} \left[i'_{2b} R'_{l_2} + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (L_{12} (i_{1c} - i_{1a}) + L_{12} (i'_{2c} - i'_{2a})) \right] \right]; \\ \frac{di_{1c}}{dt} &= \frac{1}{L_1 \sigma_1} \left[u_{1c} - i_{1c} R_{l_1} + k_{l_r} \left[i'_{2c} R'_{l_2} + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (L_{12} (i_{1a} - i_{1b}) + L_{12} (i'_{2a} - i'_{2b})) \right] \right]; \\ \frac{di'_{2a}}{dt} &= \frac{-1}{L_2 \sigma_1} \left[k_{l_s} (u_{1a} - i_{1a} R_{l_1}) + \left[i'_{2a} R'_{l_2} + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (L_{12} (i_{1b} - i_{1c}) + L_{12} (i'_{2b} - i'_{2c})) \right] \right]; \\ \frac{di'_{2b}}{dt} &= \frac{-1}{L_2 \sigma_1} \left[k_{l_s} (u_{1b} - i_{1b} R_{l_1}) + \left[i'_{2b} R'_{l_2} + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (L_{12} (i_{1c} - i_{1a}) + L_{12} (i'_{2c} - i'_{2a})) \right] \right]; \\ \frac{di'_{2c}}{dt} &= \frac{-1}{L_2 \sigma_1} \left[k_{l_s} (u_{1c} - i_{1c} R_{l_1}) + \left[i'_{2c} R'_{l_2} + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (L_{12} (i_{1a} - i_{1b}) + L_{12} (i'_{2a} - i'_{2b})) \right] \right]; \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{-L_{12} p}{(J_{\text{НПТ}} + J) \sqrt{3}} [i_{1a} (i'_{2b} - i'_{2c}) + i_{1b} (i'_{2c} - i'_{2a}) + i_{1c} (i'_{2a} - i'_{2b})] + \dots \\ &\quad \dots + \frac{-1}{(J_{\text{НПТ}} + J)} \left(I_a \Phi^* \frac{M_{\text{н}}}{I_{\text{ан}}} - M_{\text{в}} \right) - \frac{M_{\text{пот}}}{(J_{\text{НПТ}} + J)} \text{sign}(\omega); \\ \frac{dI_a}{dt} &= \frac{1}{\Sigma L_a} \left(-u_{\text{вып}} - I_a \Sigma R_a + \omega \Phi^* \frac{U_{\text{н}}}{\omega_{\text{н НПТ}}} \right); \\ \Phi^* &= f(I_{\text{в}}^*), \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где $\Phi^* = f(I_{\text{в}}^*)$ – аппроксимация кривой намагничивания НГПТ;

$I_{\text{в}}^* = \frac{I_{\text{в}}}{I_{\text{вн}}}$ – отношение тока возбуждения НГПТ к номинальному значению данного тока.

Математическая модель (2) может быть дополнена расчетными выражениями, позволяющими вычислить токи и напряжения в транзисторах инвертора, звене постоянного тока и выпрямителе системы испытаний [8].

Пример расчета выполнен для электрических машин с параметрами, известными из справочных данных: асинхронный двигатель 6А315LB4 (номинальной мощностью 200 кВт и двумя парами полюсов) и близкая к нему по номинальной мощности и частоте вращения машина постоянного тока 2ПФ315LYXL4 [9, 10]. Частота широтно-импульсной модуляции преобразователя частоты задана равной 4 кГц.

Аппроксимация кривой намагничивания, примененная в расчете, приведена на рисунке 5.

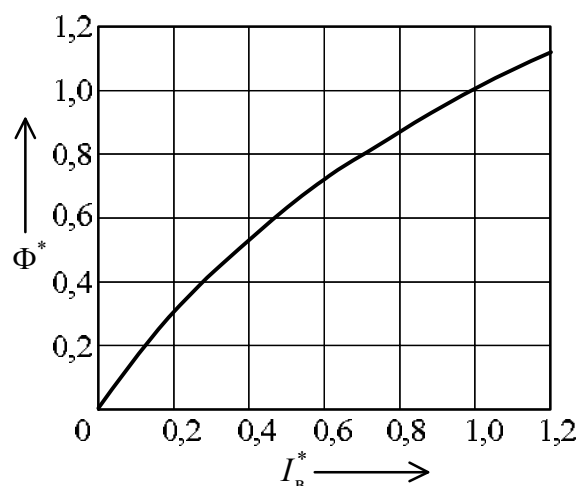


Рисунок 5 – Расчетная аппроксимация кривой намагничивания нагрузочного генератора постоянного тока

Для установления на валу номинального вращающего момента ток возбуждения нагрузочного генератора задан на 3,3 % выше своего номинального значения. Полученные в результате моделирования токи фаз обмотки статора асинхронного двигателя и якоря нагрузочного генератора приведены на рисунке 6.

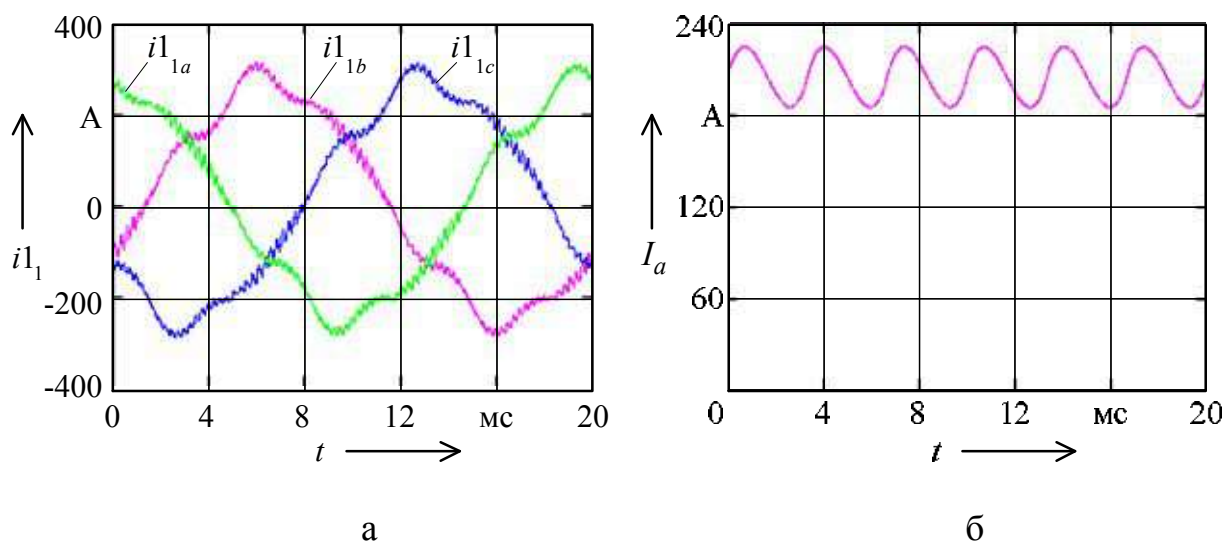


Рисунок 6 – Расчетные токи: а – фаз статора асинхронного двигателя; б – обмотки якоря нагрузочной машины

Разработанная схема взаимной нагрузки является развитием известной ранее идеи испытания асинхронных тяговых двигателей с нагрузочным генератором постоянного тока, отдающим вырабатываемую энергию на питание испытуемого двигателя. Новая схема также позволяет проводить испытания АТЭД с высокими показателями энергетической эффективности и при этом позволяет обеспечить более высокую надежность системы испытаний по сравнению с известными аналогами за счет сокращения перечня оборудования, входящего в ее состав, при наличии диодной защиты цепи обмотки якоря от короткого замыкания.

Представленная математическая модель (2) позволяет осуществлять расчет статических и динамических режимов работы предложенной схемы взаимной нагрузки на этапе разработки электротехнического комплекса для испытаний асинхронных тяговых двигателей.

С учетом существующей тенденции внедрения на железнодорожном транспорте нового подвижного состава с асинхронным тяговым приводом, заложенной в основополагающих документах, определяющих развитие отрасли железнодорожных перевозок, рекомендуется применение предложенной схемы испытаний в локомотивных ремонтных депо, а технические решения и математическую модель – на предприятиях, занимающихся разработкой испытательных станций для асинхронных тяговых двигателей.

Список литературы

1. Попов, Д. И. Анализ энергетической эффективности электротехнических комплексов испытаний асинхронных машин / Д. И. Попов. – Текст : непосредственный // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 12. – С. 118 – 123.

2. Патент № 99186 Российская Федерация, МПК G01R 31/34. Стенд для испытаний асинхронного тягового электродвигателя : № 2010122670/28 : заявлено 04.06.2010 : опубликовано 10.11.2010 / Козлов Л. Г., Осипов С. С., Феоктистов В. П., Коновалов В. А. ; заявитель Московский гос. ун-т путей сообщения (МИИТ). – 2 с. : ил. – Текст : непосредственный.

3. Патент № 2200960 Российская Федерация, МПК G01R 31/34. Устройство для испытаний бесколлекторных электрических машин переменного тока : № 2001101213/09 : заявлено 12.01.2001 : опубликовано 20.03.2003 / Курбасов А. С., Таргонский И. Л., Долгошеев Э. А. ; заявитель ОАО Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский ин-т электровозостроения. – 1 с. : ил. – Текст : непосредственный.

4. Патент № 178716 Российская Федерация, МПК G01R 31/34. Стенд для испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки : № 2017143232 : заявлено 11.12.2017 : опубликовано 17.04.2018 / Харламов В. В., Попов Д. И. ; заявитель Омский гос. ун-т путей сообщения. – 5 с. : ил. – Текст : непосредственный.

5. Патент № 195604 Российская Федерация, МПК G01R 31/34. Стенд для автоматизированных испытаний асинхронного двигателя : № 2019132469 : заявлено 14.10.2019 : опубликовано 03.02.2020 / Харламов В. В., Попов Д. И. ; заявитель Омский гос. ун-т путей сообщения. – 7 с. : ил. – Текст : непосредственный.

6. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин : учебник / И. П. Копылов. – Москва : Высшая школа, 2001. – 327 с. : ил. – Текст : непосредственный.

7. Фираго, Б. И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск : Техноперспектива, 2006. – 363 с. : ил. – Текст : непосредственный.

8. Попов, Д. И. Научные основы создания энергоэффективных методов и средств испытаний электрических машин : монография / Д. И. Попов. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2019. – 175 с. : ил. – Текст : непосредственный.

9. Кацман, М. М. Справочник по электрическим машинам / М. М. Кацман. – Москва : Академия, 2005. – 480 с. – Текст : непосредственный.

10. Справочник по электрическим машинам : в 2 т. / под общ. ред. И. П. Копылова, Б. К. Клокова. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – Т. 1. – 456 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Popov D. I. Analysis of the energy efficiency of electrical testing complexes of asynchronous machines [Analiz energeticheskoy effektivnosti elektrotekhnicheskikh kompleksov ispytaniy asinhronnyh mashin]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* – *Izvestiya Tula State University*, 2018, no. 12, pp. 118 – 123.

2. Kozlov L. G., Osipov S. S., Feoktistov V. P., Konovalov V. A. *Patent RU 99186 U1*, 10.11.2010.

3. Kurbasov A. S., Targonskij I. L., Dolgosheev E. A. *Patent RU 2200960 C2*, 20.03.2003.

4. Kharlamov V. V., Popov D. I. *Patent RU 178716 U1*, 17.04.2018.

5. Kharlamov V. V., Popov D. I. *Patent RU 195604 U1*, 03.02.2020.

6. Kopylov I. P. *Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin* (Mathematical modeling of electrical machines). Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2001, 327 p.
7. Firago B. I., Pavlyachik L. B. *Reguliruemye elektroprivody peremennogo toka* (Adjustable AC electric drives). Minsk: Tehnoperspektiva Publ., 2006, 363 p.
8. Popov D. I. *Nauchnye osnovy sozdaniya energoeffektivnykh metodov i sredstv ispytaniy elektricheskikh mashin* (Scientific basis for creating energy-efficient methods and means of testing electric machines). Omsk: OSTU Publ., 2019, 175 p.
9. Katsman M. M. *Spravochnik po elektricheskim mashinam* (Handbook of electric machines). Moscow: Akademija Publ., 2005, 480 p.
10. Kopylov I. P., Klovov B. K. *Spravochnik po elektricheskim mashinam* (Handbook of electric machines). Moscow: Energoatomizdat Publ., 1988, 456 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Харламов Виктор Васильевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru

Попов Денис Игоревич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru

Петров Павел Геннадьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Харламов, В. В. Совершенствование схем испытаний асинхронных тяговых двигателей с применением метода взаимной нагрузки / В. В. Харламов, Д. И. Попов, П. Г. Петров. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 4 (44). – С. 28 – 36.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kharlamov Viktor Vasilyevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor of Sciences in Engineering, Professor, Head of department of «Electrical machines and general electrical engineering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru

Popov Denis Igorevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of department of «Electrical machines and general electrical engineering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru

Petrov Pavel Gennadievich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of department of «Electrical machines and general electrical engineering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kharlamov V. V., Popov D. I., Petrov P. G. Improving of test schemes for induction traction motors using the method of mutual load. Journal of Transsib Railway Studies, 2020, no. 4 (44), pp. 28 – 36 (In Russian).

К. Б. Кузнецов, А. А. Пазуха

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

КООРДИНАТНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ И ОПОВЕЩЕНИЯ ОБ ОПАСНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕНЦИАЛАХ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОАО «РЖД»

Аннотация. Рассмотрено состояние производственного травматизма при эксплуатации и технологии ремонта устройств электроснабжения в энергетическом комплексе ОАО «РЖД», которое подтверждает актуальность развития и внедрения способов и технических средств защиты электротехнического персонала энергетического комплекса ОАО «РЖД» от электрического травмирования.

Проведен анализ существующих способов технического обслуживания, эксплуатации и технологии ремонта контактной сети. Предложено инновационное решение в области обеспечения электробезопасности персонала энергетического комплекса ОАО «РЖД» за счет создания единого высокоточного координатного пространства устройств электроснабжения, реализуемого на основе механизмов использования глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS.

Рассмотрена реализация схем питания и секционирования и главных электрических соединений в виде цифровой модели, которая имеет математическое описание геометрических характеристик и пространственного положения контактной сети; питающих фидеров; воздушных линий: продольного электроснабжения, автоблокировки, централизации и блокировки, линий «два провода – рельс», освещения; волновода и других объектов электроснабжения и электрификации железных дорог.

На основе моделирования опасных ситуаций поражения электрическим током электротехнического персонала энергетического комплекса ОАО «РЖД» при обслуживании и ремонте устройств контактной сети по всем категориям работ обоснована эффективность внедрения базы пространственных данных в виде цифровой модели устройств контактной сети. Применение цифровой модели контактной сети повысит уровень электробезопасности при обслуживании и ремонте устройств контактной сети и снизит уровень электрического травмирования работников энергетического комплекса ОАО «РЖД».

Ключевые слова: энергетический комплекс ОАО «РЖД», контактная сеть, системы глобального позиционирования, цифровая модель контактной сети, навигационно-информационное обеспечение работников, электробезопасность.

Konstantin B. Kuznetsov, Alexander A. Pazukha

Ural state university of railway transport (USURT), Ekaterinburg, the Russian Federation

COORDINATE SYSTEM OF CONTROL AND ALERTING ABOUT HAZARDOUS ELECTRIC POTENTIALS DURING OPERATION AND TECHNOLOGY OF REPAIR OF POWER SUPPLY DEVICES JSC «RUSSIAN RAILWAYS»

Abstract. The state of industrial injuries during operation and repair technology of power supply devices in the power complex of Russian Railways, which confirms the relevance of the development and implementation of methods and technical means of protecting electrical personnel of the power complex of Russian Railways from electrical injury.

The analysis of existing methods of maintenance, operation and repair technology of the contact network is carried out. An innovative solution is proposed in the field of electrical safety of personnel of the energy complex of JSC "Russian Railways" through the creation of a single high-precision coordinate space of power supply devices, implemented on the basis of mechanisms for using the global navigation satellite systems GLONASS / GPS. Considered the implementation of power supply and sectioning circuits and main electrical connections in the form of a digital model, which has a mathematical description of the geometric characteristics and spatial position of the contact network; feeding feeders; overhead lines: longitudinal power supply, automatic blocking, centralization and blocking, lines «two wires – rail», lighting; waveguide and other objects of power supply and electrification of railways.

On the basis of modeling dangerous situations of electric shock, the electrical personnel of the power complex of JSC «Russian Railways» during the maintenance and repair of overhead contact network devices in all categories of work substantiated the effectiveness of the implementation of a spatial database in the form of a digital model of contact network devices. The use of a digital model of the overhead contact network will increase the level of electrical safety during maintenance and repair of overhead contact network devices and reduce the level of electrical injury to employees of the power complex of Russian Railways.

Keywords: energy complex of JSC «Russian Railways», contact network, global positioning systems, digital model of the contact network, navigation and information support of employees, electrical safety.

Железнодорожный транспорт прочно занял свое место в системе жизнеобеспечения государства, играя ключевую роль в развитии экономики Российской Федерации и обеспечении социальной стабильности. Основной грузопоток и пассажиропоток осуществляется по электрифицированным участкам железнодорожной магистрали. Немалую роль в организации транспортного процесса играет охрана труда персонала с мероприятиями по сохранению жизни и здоровья работников, которые включают в себя правовые, социально-экономические, организационно-технические, санитарно-гигиенические, лечебно-профилактические, реабилитационные и иные мероприятия [1].

На протяжении последних десятилетий проблема повышения безопасности труда и снижения травматизма на производстве остается одной из самых острых для России. Проблема электрического травмирования является актуальной и представляющей интерес как для специалистов ОАО «РЖД», так и для ответственных за обеспечение безопасных условий труда в других отраслях.

При высоком уровне функционирования компании ОАО «РЖД» не всегда обеспечивается соответствующий уровень безопасности труда в электроустановках, допускаются случаи электрического травмирования электротехнического персонала энергетического комплекса ОАО «РЖД». Обеспечение электробезопасности работников при эксплуатации и ремонте устройств электроснабжения железных дорог является актуальной задачей.

Согласно статистике за восемь лет – с 2012 по 2019 г. – в энергетическом комплексе ОАО «РЖД» произошло 84 электротравмы, из них 45 со смертельным исходом (рисунок 1).



Рисунок 1 – Статистика электрических травм работников энергетического комплекса ОАО «РЖД» за период с 2012 по 2019 г.

На контактной сети, которая осуществляет непрерывный подвод энергии к движущимся электрическим локомотивам и требует постоянного обслуживания и ремонта, произошло 36 электротравм, из них 23 со смертельным исходом [2, 3].

По состоянию на 1 декабря 2020 г. в энергетическом комплексе ОАО «РЖД» травмировано 25 работников, в том числе 9 со смертельным исходом, из них 13 электрических травм (в том числе 6 со смертельным исходом). Положение с производственным травматизмом в Трансэнерго (филиал ОАО «РЖД») в 2020 г. оценивается как критическое. Случаи электрического травмирования работников в 2020 г. произошли в Ростовской, Ижевской, Ачинской, Волгоградской, Карталинской дистанциях электроснабжения.

В работе [3] рассмотрены основные причины электротравматизма в энергетическом комплексе ОАО «РЖД» с 2012 по 2019 г.

В большинстве случаев работники не были информированы о наличии опасного производственного фактора в виде смертельного потенциала электроустановки. Опасность этого производственного фактора состоит в том, что электрический ток не имеет запаха и цвета, не издает звуков и не осязается, поэтому работник не может ощущать наличие опасного фактора органами чувств, кроме прикосновения, которое приводит к трагическому исходу.

Высокоточная координатная система создается с целью получения и эффективного использования достоверных и точных пространственных данных об устройствах электроснабжения железнодорожного транспорта при проектировании, строительстве, ремонте, реконструкции и эксплуатации. Система является инструментом для формирования единого координатно-временного пространства для навигационно-информационного обеспечения работников энергетического комплекса ОАО «РЖД» при проведении работ, требующих максимальной точности позиционирования (к примеру, работа вдали и вблизи токоведущих частей, работа на элементах контактной сети с разными потенциалами, работа в опасном месте и др.).

Цифровизации инфраструктуры железнодорожных магистралей посвящено большое количество научных работ [4 – 7], но авторы не рассматривали применение цифровизации в области охраны труда работников энергетического комплекса ОАО «РЖД».

Высокоточные координатные системы необходимо применять для определения местоположения объектов инфраструктуры энергетического комплекса ОАО «РЖД» в едином координатном пространстве при выполнении мероприятий по сохранению жизни и здоровья работников энергетического комплекса ОАО «РЖД». Базы пространственных данных устройств энергетического комплекса ОАО «РЖД» в виде цифровой модели контактной сети на основе механизмов использования глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS будут информировать с высокой точностью производителя работ, ответственного руководителя работ, диспетчерский аппарат и электромонтеров о приближении к токоведущим или частям электроустановки с разными потенциалами. При получении такой информации электромонтер должен незамедлительно покинуть опасную зону, а производитель работ, ответственный руководитель работ, энергодиспетчер – проконтролировать и, при необходимости, принять меры по выводу работника из опасной зоны.

На рисунке 2 представлена условная схема цифровой модели контактной сети. Штриховой круглой областью обозначены опасные зоны, нахождение электромонтеров района контактной сети в которых запрещено без выполнения определенных организационных и технических мероприятий безопасности. Цифровая модель осуществляет непрерывную обработку и передачу данных об устройствах энергетического комплекса ОАО «РЖД» в режиме реального времени, а также контролирует и информирует электромонтеров о необходимости применения средств защиты при нахождении в опасной зоне. При приближении электромонтера к заданным опасным зонам (координатам), расположенным вблизи токоведущих или частей с разными потенциалами электроустановки, или при их пересечении базы пространственных данных тотчас формируют команду об опасной разности потенциалов и информируют указанных работников.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

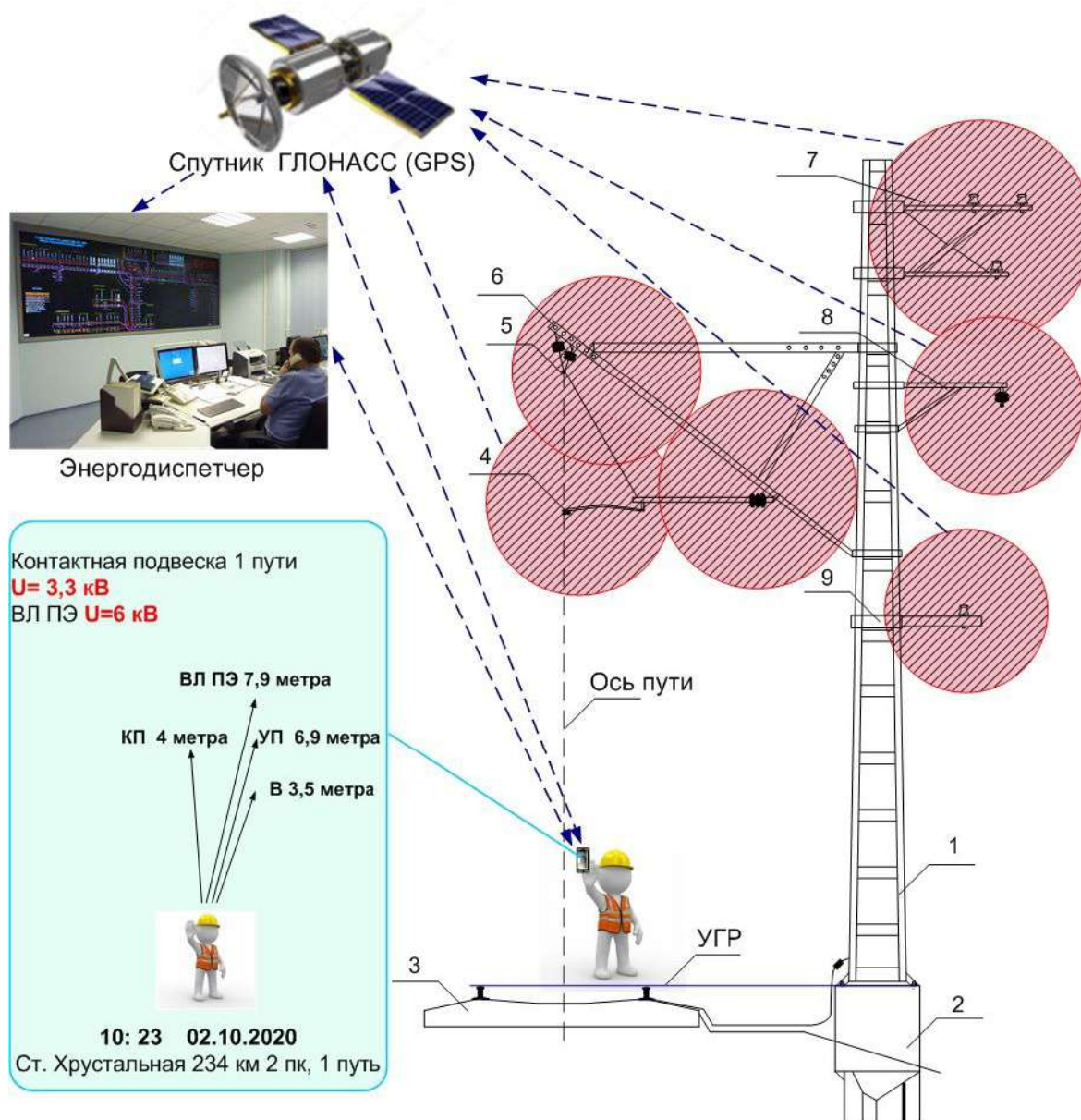


Рисунок 2 – Условная схема цифровой модели контактной сети: 1 – металлическая стойка контактной сети; 2 – фундамент; 3 – рельсошпальная решетка; 4 – контактный провод (КП); 5 – несущий трос; 6 – консоль; 7 – траверса воздушной линии продольного электроснабжения (ВЛ ПЭ); 8 – кронштейн усиливающего провода (УП); 9 – траверса волновода (В); УГР – уровень верха головки рельса [8]

Согласно Инструкции [9] в отношении мер безопасности работы на контактной сети, воздушных линиях и связанном с ними оборудовании подразделяются на выполняемые со снятием напряжения и заземлением; под напряжением; вблизи частей, находящихся под напряжением; вдали от частей, находящихся под напряжением.

Рассмотрим более подробно цифровую модель контактной сети для каждой категории работ.

При выполнении работы со снятием напряжения и заземлением в зоне (месте) ее выполнения должно быть снято напряжение и заземлены те провода и устройства, на которых будет выполняться эта работа (рисунок 3).

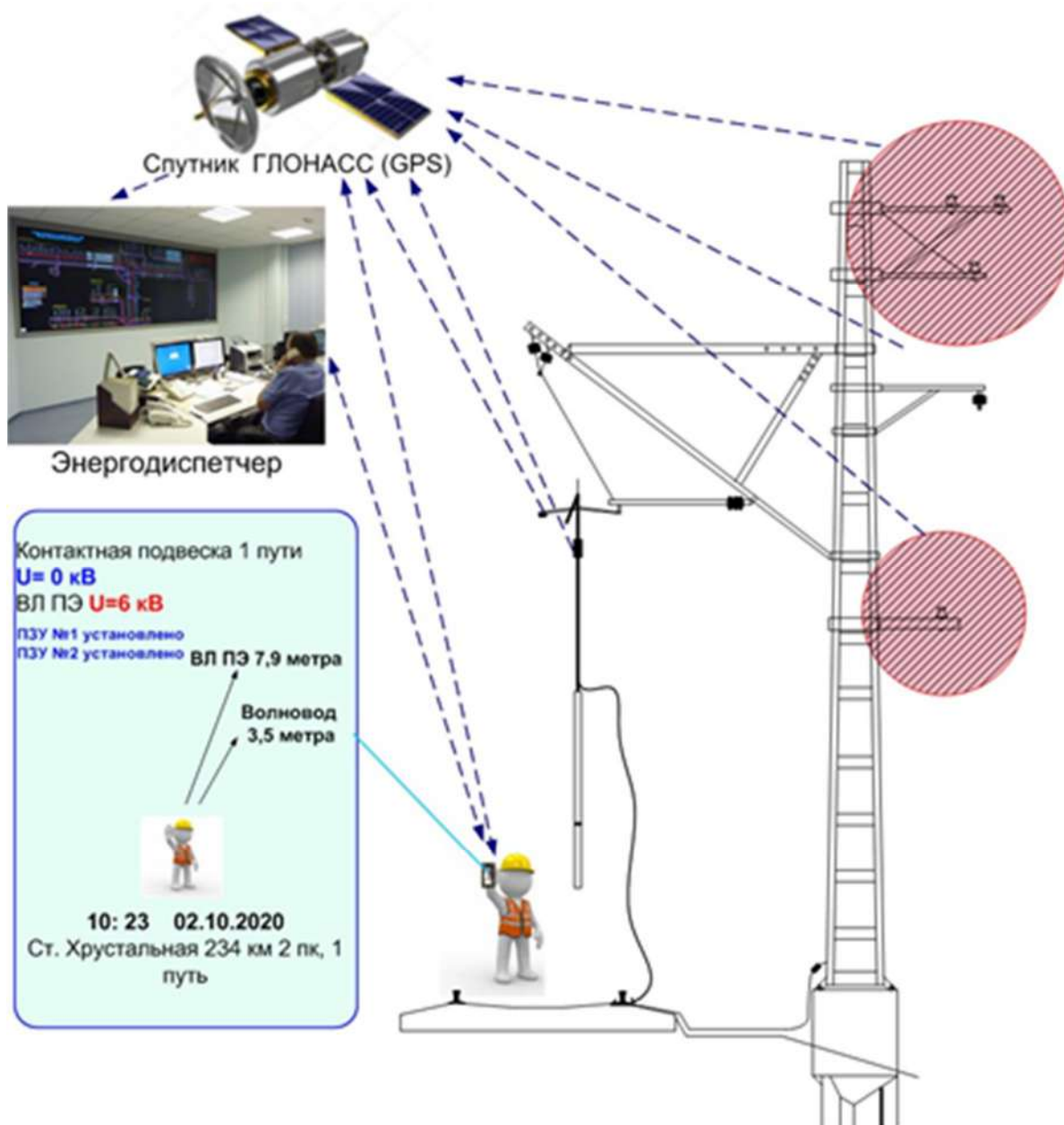


Рисунок 3 – Условная схема цифровой модели контактной сети при выполнении работ по категории со снятием напряжения и заземлением

Согласно источникам [10, 11] переносные заземляющие штанги контактной сети оснащены контролирующими устройствами, которые взаимодействуют с цифровой моделью контактной сети и информируют о применении переносных заземляющих устройств контактной сети. Схема установки контролирующего устройства на переносной заземляющей штанге контактной сети представлена на рисунке 4.

Данным контролирующим устройством должны быть оснащены и переносные шунтирующие штанги, используемые при производстве работ под напряжением с применением съемной изолирующей вышки для создания эквипотенциальных условий на рабочем месте.

При выполнении работы под напряжением провода и оборудование в зоне (месте) работы находятся под рабочим напряжением. Безопасность работающих должна обеспечиваться применением основных средств защиты (изолирующие вышки, изолирующие штанги и др.) и специальными мерами (завешивание стационарных и переносных шунтирующих штанг, шунтирующих перемычек и др.) Приближение инструментом или деталями к заземленным и нейтральным частям на расстояние менее 0,8 метра запрещено (рисунок 5).

При выполнении работы вблизи частей, находящихся под напряжением, электромонтеру, расположенному в зоне (месте) работы на постоянно заземленной конструкции, по условиям работы необходимо приближаться самому или через неизолированный инструмент к электроопасным элементам (в том числе к проводам осветительной сети) на расстояние менее 2 метров. Приближение инструментом или деталями к электроопасным элементам на расстояние менее 0,8 метра запрещено (рисунок 6).

При выполнении работы вдали от частей, находящихся под напряжением, электромонтеру в зоне (месте) работы нет надобности и запрещено, работая на земле или постоянно заземленной конструкции, приближаться инструментом или деталями к электроопасным элементам на расстояние менее 2 метров (рисунок 7).

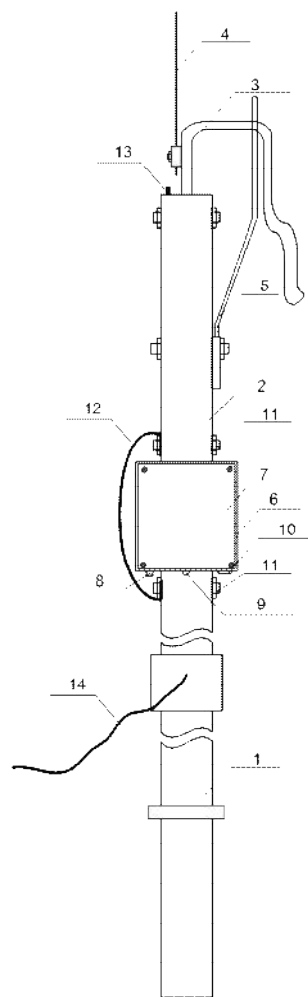


Рисунок 4 – Схема установки контролирующего устройства на переносной заземляющей штанге контактной сети: 1 – изолирующая часть; 2 – токопроводящая труба; 3 – крюк; 4 – усовик; 5 – фиксирующая пружина; 6 – корпус контролирующего устройства; 7 – технологическая крышка; 8 – кнопка включения GPS-трекера (или ГЛОНАСС-трекера); 9 – светодиод; 10 – разъем зарядки; 11 – болты; 12 – медный проводник сечением по меди не менее 50 мм²; 13 – внешняя антенна; 14 – заземляющий трос

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

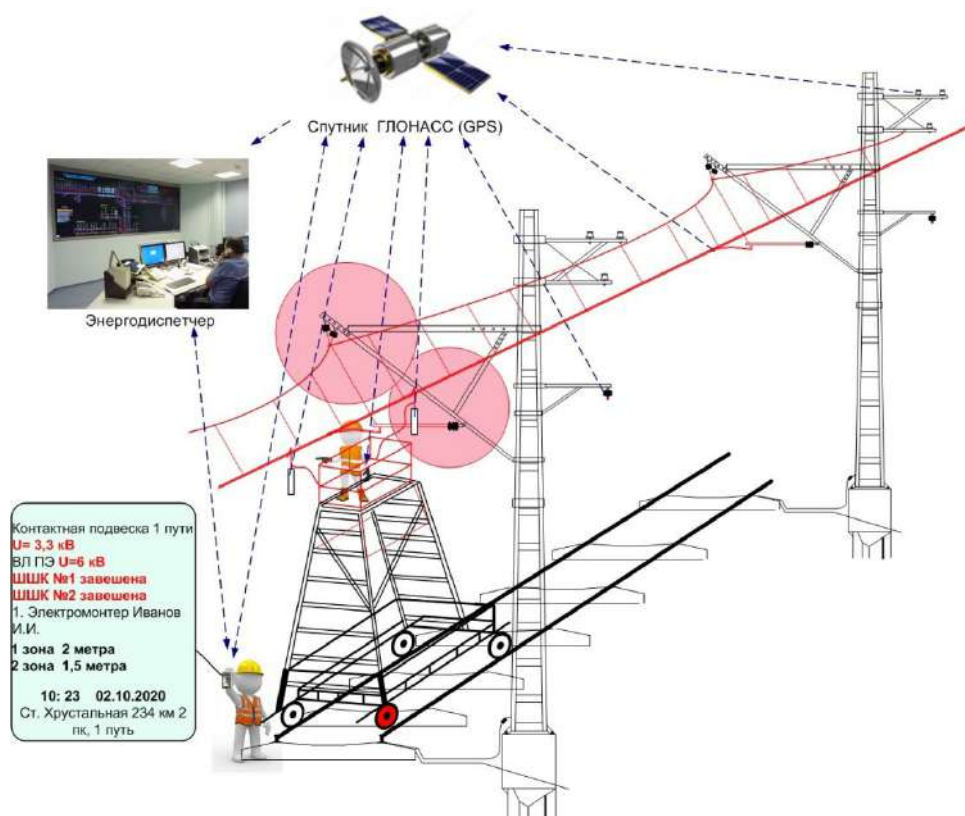


Рисунок 5 – Условная схема цифровой модели контактной сети при выполнении работ по категории под напряжением

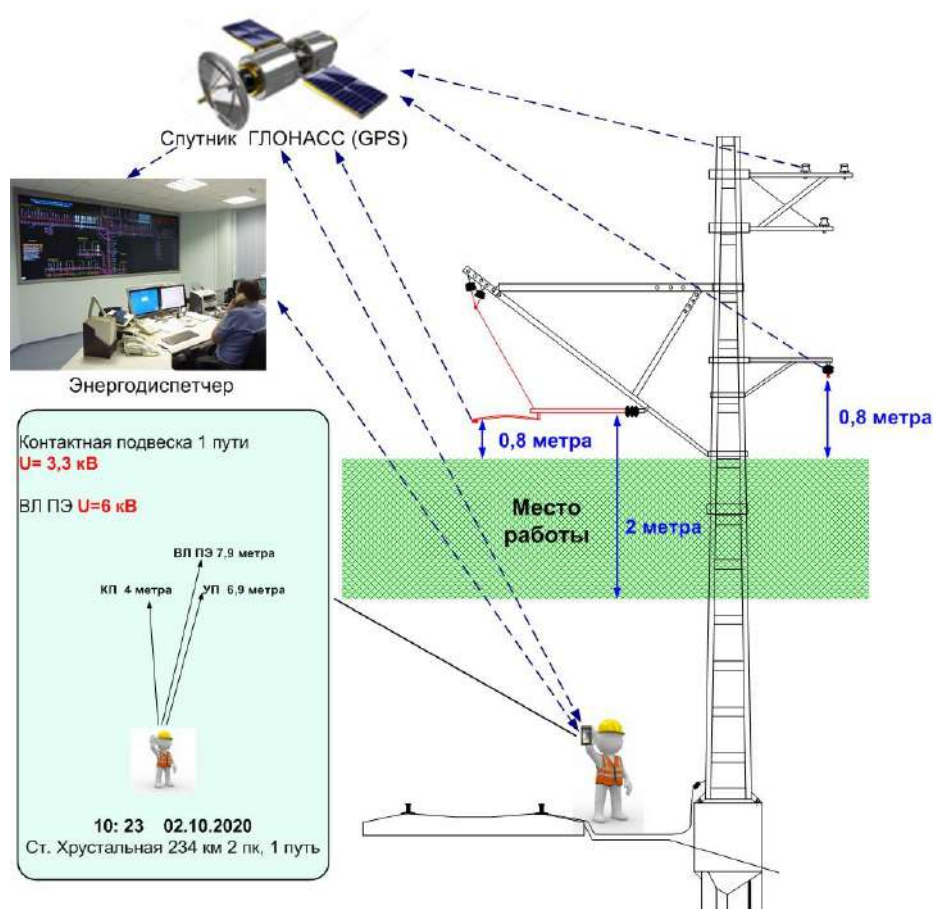


Рисунок 6 – Условная схема цифровой модели контактной сети при выполнении работ по категории вблизи частей, находящихся под напряжением

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Цифровая модель контактной сети позволит контролировать опасный производственный фактор в виде электрического потенциала. Полученные данные о производстве работ будут полезны при проведении специальной оценки условий труда на рабочем месте. Данные содержат полную и достоверную информацию о фактическом времени работы персонала на высоте, перемещении работника в пространстве, о времени работ на железнодорожных путях и другую информацию.

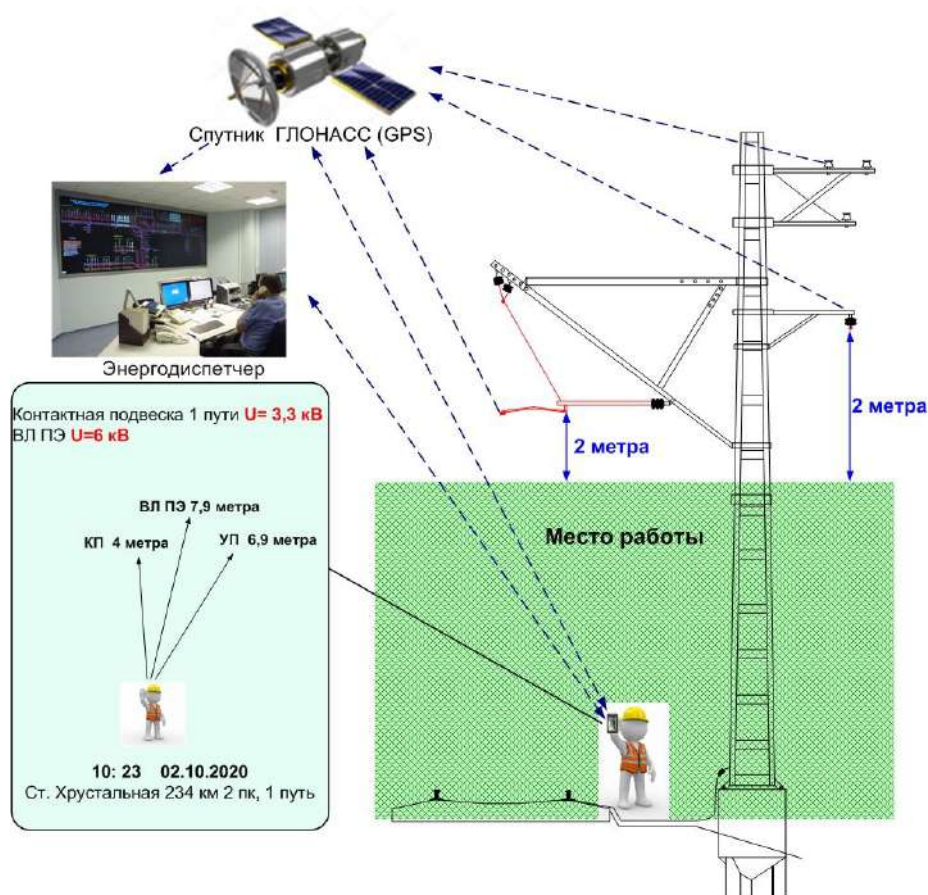


Рисунок 7 – Условная схема цифровой модели контактной сети при выполнении работ по категории вдали от частей, находящихся под напряжением

На сегодняшний день требуется разработка навигационно-информационного обеспечения работников устройствами при внедрении цифровой модели контактной сети. Для обеспечения безопасности только одного смартфона недостаточно.

К примеру, в США ведется разработка носимых устройств (шлемы, козырьки, часы), которые помогают работникам ориентироваться на рабочих местах и предупреждают о наличии опасных и вредных производственных факторов (рисунок 8) [12].

Внедрение базы пространственных данных устройств энергетического комплекса ОАО «РЖД» в виде цифровой модели контактной сети на основе механизмов использования глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS позволит решить множество задач в области электробезопасности работников энергетического комплекса ОАО «РЖД» в режиме реального времени. К таким задачам относятся контроль места (зоны) производства работ, контроль приближения работника к токоведущим частям контактной сети с разными потенциалами, правильность определения категории работ, контроль применения средств защиты персоналом.

С учетом протяженности зоны и места работы при обслуживании контактной сети, погрешности системы глобального позиционирования GPS 0,3 – 0,6 метра, быстродействия оповещения работника в режиме реального времени о приближении к разнопотенциальным элементам контактной сети система позволяет решать рассматриваемые задачи в области

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

электробезопасности работников энергетического комплекса ОАО «РЖД». Цифровая модель контактной сети является дополнительным мероприятием при обеспечении безопасности персонала при эксплуатации и технологии ремонта устройств контактной сети.



Рисунок 8 – Защитные носимые устройства, направленные на снижение несчастных случаев на производстве

Цифровая модель контактной сети представляет собой совокупность данных о фактических координатах и высоте устройств электроснабжения. На автоматизированное рабочее место энергодиспетчерского аппарата устанавливают программное обеспечение, которое содержит массив данных цифровой модели контактной сети. Электротехническому персоналу выдаются защитные носимые устройства, на которых также установлено программное обеспечение, содержащее массив данных цифровой модели контактной сети. При выполнении организационных и технических мероприятий энергодиспетчер допускает к производству работ на устройствах контактной сети электротехнический персонал. Защитные носимые устройства посредством спутника GPS в режиме реального времени определяют координаты местонахождения электротехнического персонала, а также передают данные на автоматизированное рабочее место энергодиспетчерского аппарата. Полученные данные сравниваются с массивом данных цифровой модели контактной сети. При нахождении электротехнического персонала в опасной зоне в режиме реального времени происходит его информирование, а также информирование производителя работ, ответственного руководителя работ и энергодиспетчера. Далее работник незамедлительно должен покинуть опасную зону, а производитель работ, ответственный руководитель работ и энергодиспетчер – проконтролировать, что работник действительно покинул опасную зону.

Оптимальное размещение персонального защитного носимого устройства – на каске электротехнического персонала. В цифровой модели контактной сети учитываются рост сотрудника и его рабочая зона, предусмотрена максимальная погрешность систем глобального позиционирования.

Функционирование цифровой модели контактной сети позволит снизить влияние человеческого фактора и избежать большинства случаев электрического травмирования работников энергетического комплекса ОАО «РЖД». В ближайшее время внедрение цифровизации обеспечит безопасность электротехнического персонала при производстве работ на устройствах энергетического комплекса ОАО «РЖД».

Предложенная цифровая модель контактной сети позволяет решать перечень задач в области безопасности труда персонала при технологии обслуживания, эксплуатации и ремонте устройств электроснабжения и при мониторинге и функционировании устройств энергетического комплекса ОАО «РЖД».

Перспективным дальнейшим исследованием является создание цифровой модели тяговых подстанций, отдельно стоящих воздушных линий и других устройств электроснабжения и электрификации железных дорог, а также совершенствование предложенной цифровой модели контактной сети и рассмотрение ее интеграции в цифровую систему железной дороги.

Список литературы

1. Трудовой кодекс Российской Федерации : Федеральный закон от 30.12.2001 №197-ФЗ : с изм. и доп. от 16 декабря 2019 г. – Текст : электронный // КонсультантПлюс : официальный интернет-портал. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34683 (дата обращения: 22.03.2020).
2. Пазуха, А. А. Анализ профессиональных рисков при обслуживании и ремонте устройств контактной сети / А. А. Пазуха. – Текст : непосредственный // Наука и техника транспорта. – 2020. – № 4. – С 85 – 93.
3. Кузнецов, К. Б. Оценка и анализ риска электротравматизма на энергетическом комплексе ОАО «РЖД» / К. Б. Кузнецов, А. А. Пазуха. – Текст : непосредственный // Безопасность жизнедеятельности глазами молодежи : сборник материалов всерос. студенческой конф. (с междунар. участием) : в 2 т ; под ред. А. И. Сидорова. – Челябинск, 2019. – Т. 1. – С. 125 – 131.
4. Левин, Б. А. Цифровая железная дорога: принципы и технологии / Б. А. Левин, В. Я. Цветков. – Текст : непосредственный // Мир транспорта. – 2018. – Т. 16. – № 3. – С. 50 – 61.
5. Ефанов, Д. В. Концепция цифрового моделирования на железнодорожном транспорте / Д. В. Ефанов, А. С. Шиленко, В. В. Хорошев. – Текст : непосредственный // Транспорт Российской Федерации. – 2019. – № 3 (82). – С. 34 – 38.
6. Охотников, А. Л. Технологии будущего цифрового поезда. – Текст : непосредственный // Наука и технологии железных дорог. – 2019. – Т. 3. – № 3 (11). – С. 75 – 83.
7. Клейменов, А. А. Проблемы и перспективы развития процессного подхода в области «цифровой железной дороги» / А. А. Клейменов. – Текст : непосредственный // Modern Science. – 2019. – № 10-2. – С. 92 – 96.
8. Марквардт, К. Г. Контактная сеть : учебник / К. Г. Марквардт. – Москва : Транспорт, 1994. – 4-е изд., перераб. и доп. – 335 с. – Текст : непосредственный.
9. Инструкция по безопасности для электромонтеров контактной сети. Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 16.12.2010 № 104. – Екатеринбург : УралЮрИздат, 2011. – 246 с. – Текст : непосредственный.
10. Патент № 2714282 Российская Федерация, МПК H01R 4/66. Переносное заземляющее устройство : № 2019107627: заявлено 18.03.2019: опубликовано 13.02.2020 / Кузнецов К. Б., Пазуха А. А. – 8 с. – Текст : непосредственный.
11. Заявка № 2020129825 РФ, МПКB60M1/28. Переносная заземляющая штанга контактной сети : заявлено 09.09.2020 / Пазуха А. А. – 7 с. : ил. – Текст : непосредственный.
12. Financial Times, 2016. «Wearable devices aim to reduce workplace accidents». Available at: <https://www.ft.com/content/d0bfea5c-f820-11e5-96db-fc683b5e52db> (accessed 01 March 2020).

References

1. *Trudovoi kodeks Rossiiskoi Federatsii : Federal'nyi zakon ot 30.12.2001 №197-FZ : s izm. i dop. ot 16 dekabria 2019 g.* (Labor Code of the Russian Federation: Federal Law No. 197-FZ of 30.12.2001: with amendments and additions. dated December 16, 2019), Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34683 (accessed 22 March 2020).
2. Pazuha A. A. Analysis of professional risks in the maintenance and repair of overhead contact network devices [Analiz professional'nykh riskov pri obsluzhivanii i remonte ustroystv kontaktnoi seti]. *Nauka i tekhnika transporta – Science and Technology in Transport*, 2020, no. 4, pp. 85 – 93.
3. Kuznetsov K. B., Pazuha A. A. Assessment and analysis of the risk of electrical injuries at the power complex of Russian Railways [Otsenka i analiz riska elektrotravmatizma na

energeticheskom komplekse OAO «RZhD»). *Bezopasnost' zhiznedeiatel'nosti glazami molodezhi : sbornik materialov vseros. studencheskoi konf. (s mezhdunar. uchastiem)* (Life safety through the eyes of youth: collection of materials of the V All-Russian student conference (with international participation)). – Chelyabinsk, 2019, vol. 1, pp. 125 – 131.

4. Levin B. A., Tsvetkov V. Y. Digital Railroad: Principles and Technologies [Tsifrovaia zheleznaia doroga: printsipy i tekhnologii]. *Mir transporta – World of transport*, 2018, vol. 16, no. 3, pp. 50 – 61.

5. Efanov D. V., Shilenko A. S., Horoshev V. V. The concept of digital modeling in railway transport [Kontseptsii tsifrovogo modelirovaniia na zheleznodorozhnom transporte]. *Transport Rossiiskoi Federatsii – Transport of the Russian Federation*, 2019, no. 3 (82), pp. 34 – 38.

6. Okhotnikov A. L. Technologies of the future digital train [Tekhnologii budushchego tsifrovogo poezda]. *Nauka i tekhnologii zheleznykh dorog – Railway Science and Technology*, 2019, vol. 3, no. 3 (11), pp. 75 – 83.

7. Kleimenov A. A. Problems and prospects for the development of the process approach in the field of «digital railroad» [Problemy i perspektivy razvitiia protsessnogo podkhoda v oblasti «tsifrovoy zheleznoi dorogi»]. *Modern Science*, 2019, no. 10-2, pp. 92 – 96.

8. Marquardt K. G. *Kontaktnaia set': uchebnik* (Contact network: textbook). Moscow: Transport Publ., 1994, 335 p.

9. *Instruktsiia po bezopasnosti dlia elektromonterov kontaktnoi seti. Utverzhdena rasporyazheniem OAO «RZhD» ot 16.12.2010 № 104* (Safety instructions for electricians of the contact network: approved. by order of JSC «Russian Railways» dated 16.12.2010 no. 104). Yekaterinburg, Ural Yur Publishing House, 2011, 246 p.

10. Kuznetsov K. B., Pazukha A. A. *Patent RU 2714282 C1*, 13.02.2020.

11. Pazukha A. A. *Application for invention 2020129825*, 09.09.2020.

12. Financial Times, 2016. «Wearable devices aim to reduce workplace accidents». Available at: <https://www.ft.com/content/d0bfea5c-f820-11e5-96db-fc683b5e52db> (accessed 01 March 2020).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Константин Борисович

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).

Колмогорова ул., д. 66, г. Екатеринбург, 630034, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Техносферная безопасность», УрГУПС.

Тел.: +7 (963) 048-16-48.

E-mail: kkuznetsov@usurt.ru

Пазуха Александр Александрович

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).

Колмогорова ул., д. 66, г. Екатеринбург, 630034, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Техносферная безопасность», УрГУПС.

Тел.: +7 (982) 760-18-01.

E-mail: aapazukha@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Кузнецов, К. Б. Координатная система контроля и оповещения об опасных электрических потенциалах при эксплуатации и технологии ремонта устройств электроснабжения ОАО «РЖД» / К. Б. Кузнецов, А. А. Пазуха. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 4 (44). – С. 37 – 47.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuznetsov Konstantin Borisovich

Ural State University of Railway Transport (USURT).

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

Doctor of Sciences in Engineering, Professor of the department «Technosphere safety», USURT.

Phone: +7 (963) 048-16-48.

E-mail: kkuznetsov@usurt.ru

Pazukha Alexander Alexandrovich

Ural State University of Railway Transport (USURT).

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

Postgraduate Student of the department «Technosphere safety», USURT.

Phone: +7 (982) 760-18-01.

E-mail: aapazukha@gmail.com

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kuznetsov K. B., Pazukha A. A. Coordinate system of control and alerting about hazardous electric potentials during operation and technology of repair of power supply devices JSC «Russian Railways». *Journal of Transsib Railway Studies*, 2020, no. 4 (44), pp. 37 – 47 (In Russian).

УДК 621.331, 621.332

М. А. Гаранин, С. А. Фроленков

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

МЕТОДИКА БЕСКОНТАКТНОЙ ДИАГНОСТИКИ ПОЛОЖЕНИЯ ПРОВОДОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Аннотация. Контактная сеть является одним из наиболее уязвимых элементов системы тягового электроснабжения. Превалирующее число событий в хозяйстве электроснабжения связано именно с контактной сетью. Статья посвящена методике бесконтактной диагностики контактной сети электрифицированных железных дорог. В работе предлагается использовать способ диагностики контактной сети на основе оптических элементов с последующей цифровой обработкой данных и расчетом геометрических параметров. Данный способ отличается невысокой стоимостью устройства в отличие от аналогов и высокой точностью расчета. Приводятся анализ и выбор оптимальных мест установки оптических устройств. Представлена методика бесконтактной диагностики проводов контактной сети электрифицированных железных дорог.

Ключевые слова: железные дороги, система тягового электроснабжения, контактная сеть, геометрия, габариты, диагностика, алгоритм, датчики, безлюдные технологии, преобразование изображения, цифровые технологии.

Maxim A. Garanin, Sergey A. Frolenkov

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

METHOD OF CONTACTLESS DIAGNOSTICS OF THE POSITION OF WIRES OF THE CONTACT NETWORK OF ELECTRIFIED RAILWAYS

Abstract. The contact network is one of the most vulnerable elements of the traction power supply system. The prevailing number of events in the power supply sector is connected with the contact network. The article is devoted to the method of contactless diagnostics of the contact network of electrified Railways. The paper proposes to use a method for diagnostics of the contact network based on optical elements, followed by digital data processing and calculation of geometric parameters. This method is characterized by a low cost of the device in contrast to analogues and high accuracy of calculation. The analysis and selection of optimal installation locations for optical devices is given. The method of contactless diagnostics of wires of the contact network of electrified Railways is presented.

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

Основной задачей хозяйства электроснабжения является гарантированное энергообеспечение перевозочного процесса. Контактная сеть электрифицированных железных дорог является одним из наиболее сложных элементов системы тягового электроснабжения. В отличие от силового оборудования тяговых подстанций контактная сеть не имеет резерва. Контактная сеть находится в сложном взаимодействии с токоприемными устройствами электроподвижного состава. Кроме того, контактная сеть испытывает механическое воздействие от ветра, гололедных образований, перемещений, связанных с температурными изменениями и др.

Указанные обстоятельства обуславливают необходимость диагностики контактной сети. Она предполагает контроль следующих параметров: износ и габарит контактного провода, состояние токопроводящих устройств контактной сети. Под габаритом контактной сети подразумевается положение контактного провода относительно оси пути (горизонтальный габарит) и относительно уровня головок рельсов (вертикальный габарит). Это наиболее сложный для диагностирования параметр, поскольку он изменяется в относительно широких пределах.

Актуальность исследований в указанной области подтверждается «Стратегией развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030 года» [1], согласно которой для обеспечения развития инфраструктуры железнодорожного транспорта предусмотрено применение мало-

обслуживаемых конструкций инфраструктуры железнодорожного транспорта, оборудования железнодорожной автоматики, связи и систем электроснабжения. Согласно «Стратегии научно-технического развития холдинга «РЖД» на период до 2020 года и перспективу до 2025 года» [2] разработка и постановка на производство малообслуживаемого оборудования систем электроснабжения является соответствующим уровнем мирового развития железнодорожного транспорта. В соответствии с «Долгосрочной программой развития ОАО «РЖД» до 2025 года» [3] актуальным направлением развития является «Создание инструментов интеллектуального управления движением, цифрового моделирования и мониторинга транспортных средств и объектов инфраструктуры», включающее в себя «сервисы предсказательной диагностики».

Требования к эксплуатации и обслуживанию контактной сети, включая геометрические параметры контактной сети, определяются Правилами технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации [4 – 9]. Теоретические положения, включающие в себя методики расчета геометрических параметров и их зависимость от физических величин, весьма подробно описаны авторами Горшковым Ю. И., Фрайфельдом А. В., Марквардтом К. Г.

Рассмотрим результаты исследований, посвященных совершенствованию диагностики контактной сети электрифицированных железных дорог за последние 10 лет, проводимых учеными СамГУПС, УрГУПС, ПГУПС. Все исследования можно условно разбить на четыре основных направления: диагностика контактной сети на основе оптоэлектронных устройств, диагностика контактной сети на основе радиосигналов, диагностика контактной сети на основе ультрафиолета, диагностика контактной сети на основе виброакустики.

Наиболее актуальным направлением исследований является развитие и совершенствование систем диагностики контактной сети на основе оптоэлектронных устройств.

Дополнительно следует отметить работу авторов Сафина В. Г., Шевякова С. М. и Федоришина Ю. М., посвященную совершенствованию метрологического обеспечения систем диагностики контактной сети [10].

Проведенный анализ позволил определить основное направление исследований – бесконтактная диагностика контактной сети электрифицированных железных дорог на основе оптических элементов с последующей цифровой обработкой данных и расчетом геометрических параметров. Предлагаемый вариант отличается невысокой стоимостью устройства. Кроме того, он имеет ряд дополнительных преимуществ, рассмотрим их.

Поскольку цифровая контактная сеть в настоящее время не реализована практически, возникает необходимость ежедневного контроля параметров. В первую очередь из-за скорости изменения состояния. Так, например, за одни сутки в результате изменения климатических условий (температура, влажность, осадки, ветер) геометрическое положение контактного провода может существенно измениться. Кроме того, постоянное механическое воздействие токоприемников электроподвижного состава приводит к изменению параметров.

Диагностирование геометрических параметров необходимо осуществлять в условиях нормальной круглосуточной работы участка, т. е. без предоставления технологического «окна». В настоящее время это осуществляется посредством измерения параметров на базе диагностических комплексов – вагонов-лабораторий контактной сети (ВИКСов).

Необходимо использовать безлюдные технологии. Стратегия развития железнодорожного транспорта РФ [1] предполагает внедрение инновационных систем диагностики без привлечения работника.

Рассмотрим схему определения геометрических параметров с помощью оптоэлектронных устройств. Объект измерения (контактный провод) в этом случае будет отображаться на матрице оптоэлектронного устройства (рисунок 1). Для дальнейших расчетов нас будет интересовать угол β – угол отклонения оси расположения объекта по отношению к оси камеры. Определение угла β осуществляется на основании точки расположения изображения на матрице оптоэлектронного устройства. В данном случае G – размеры матрицы, M – расстояние удаления изображения объекта от центра матрицы.

Тогда габариты контактного провода можно определить следующим образом (рисунок 2): расчет строится на основе аналитических выражений, полученных в результате преобразования тригонометрических выражений треугольника $\Delta AC'B$, где А и В – это точки расположения датчиков, а С' – точка расположения объекта измерения.

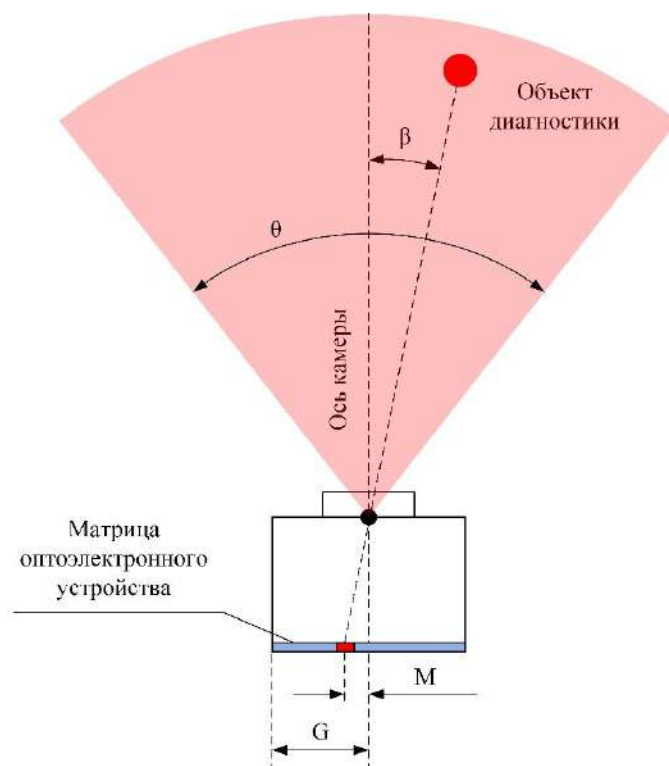


Рисунок 1 – Отображение объекта измерения на матрице оптоэлектронного устройства

Ключевым выражением для расчета является соотношение синусов углов треугольника $\Delta AC'B$ противоположным сторонам:

$$\frac{\sin(180-\alpha_A-\alpha_B)}{X_A+X_B} = \frac{\sin(\alpha_A)}{C'B} = \frac{\sin(\alpha_B)}{C'A}. \quad (1)$$

Сделав соответствующие математические преобразования, получим выражения для определения габаритов контактного провода:

$$Y_C = Y_{A,B} + \sin(\alpha_A) \cdot \frac{(X_A+X_B) \cdot \sin(\alpha_B)}{\sin(180-\alpha_A-\alpha_B)}; \quad (2)$$

$$X_C = X_{A,B} - \cos(\alpha_A) \cdot \frac{(X_A+X_B) \cdot \sin(\alpha_B)}{\sin(180-\alpha_A-\alpha_B)}. \quad (3)$$

В выражениях (2), (3) углы треугольника $\Delta AC'B$ определяются по уравнениям:

$$\alpha_A = \gamma_A - \beta_A; \quad (4)$$

$$\alpha_B = \gamma_B + \beta_B. \quad (5)$$

В выражениях (4), (5) углы β – это углы отклонения оси расположения объекта по отношению к оси камеры, которые определяются по формулам:

$$\beta_A = \theta/2 \cdot \frac{M_A}{G}; \quad (6)$$

$$\beta_B = \theta/2 \cdot \frac{M_B}{G}. \quad (7)$$

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Используя аналитические выражения (1) – (7), можно определить габариты контактного провода. На рисунке 2 приведены границы возможного расположения контактного провода в соответствии с правилами технической эксплуатации железных дорог РФ.

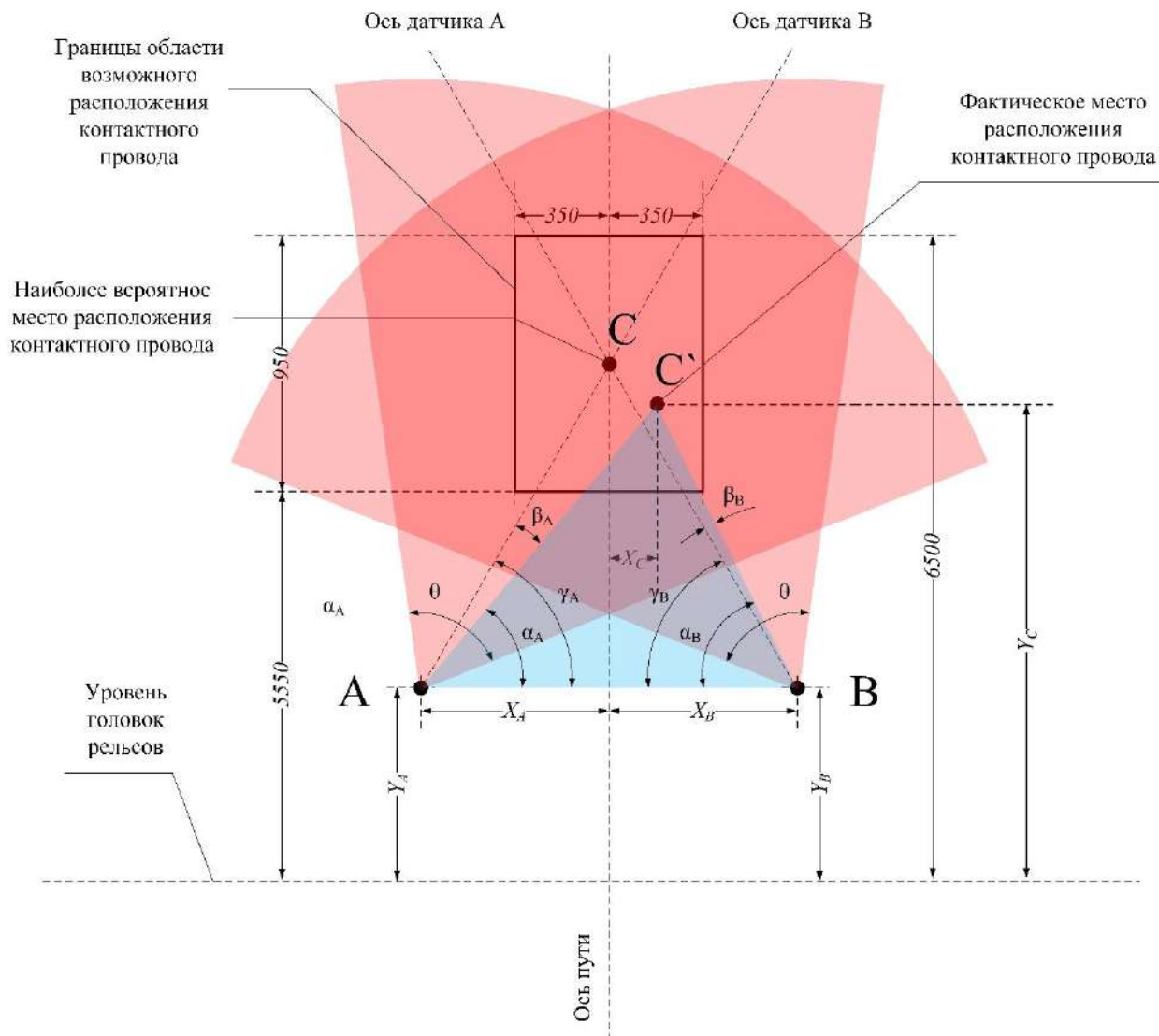


Рисунок 2 – Схема определения габарита контактного провода

Использование бесконтактного способа диагностики контактной сети имеет ряд особенностей: точность показаний оптоэлектронных устройств (сканеров), необходимость математической обработки изображений и результатов измерений нескольких датчиков с вычислением искомых параметров (триангуляция), выбор места расположения датчиков, работа оборудования в неблагоприятных погодных условиях, техническое обслуживание оборудования и др.

Определим оптимальные места расположения датчиков исходя из следующих условий (см. рисунок 1): датчики располагаются симметрично относительно оси пути; используется минимальное возможное количество датчиков (2); датчики размещаются максимально близко к объекту измерения (контактной сети); датчики располагаются в габаритах подвижного состава согласно правилам технической эксплуатации [4]; угол захвата датчиков вмещает все возможные места расположения контактного провода; датчики располагаются максимально близко к двум симметричным лучам, исходящим из точки расположения контактного провода и направленным на 225 и 315 ° в полярной системе координат. Последнее условие обеспечивает формирование прямоугольного равнобедренного треугольника, в котором прямой угол является наиболее вероятной точкой расположения контактного провода, а два других

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

угла будут являться точками расположения датчиков. Это позволит обеспечить ситуацию, при которой контактный провод, т. е. диагностируемый объект, будет располагаться в центре кадра оптоэлектронного сканера.

На рисунке 3 представлена схема, поясняющая условия определения мест установки датчиков. Как видно из рисунка, расположить датчики непосредственно на оси лучей, исходящих из точки расположения контактного провода и направленных на 225° и 315° в полярной системе координат, невозможно, поскольку эти лучи не пересекают область, образованную габаритами подвижного состава.

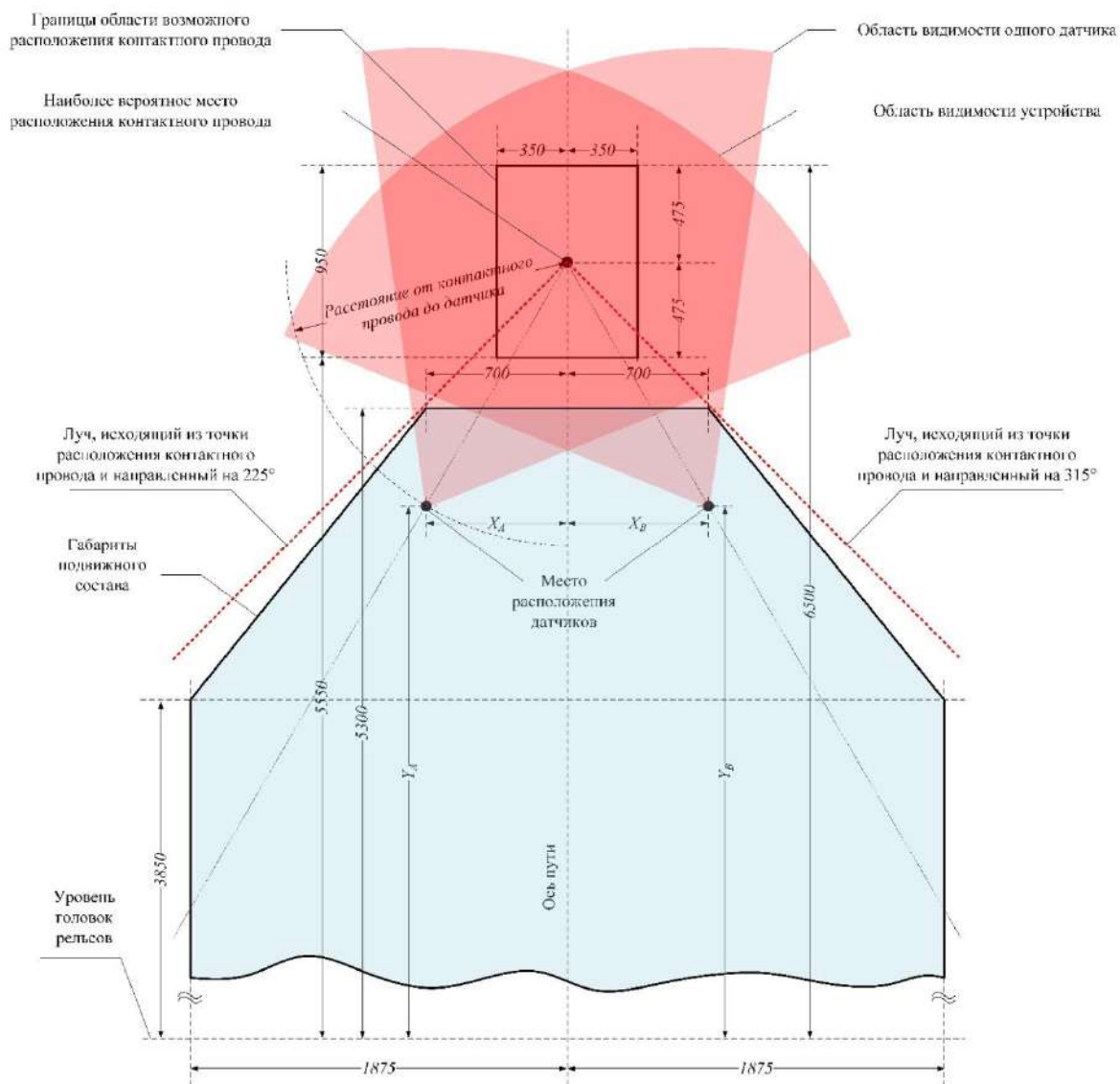


Рисунок 3 – Схема, поясняющая условия определения мест установки датчиков бесконтактной диагностики проводов контактной сети электрифицированных железных дорог

Рассмотрим оптимальные места расположения датчиков исходя из описанных условий. На рисунке 4 приведены области, ограниченные габаритами подвижного состава, на которых отмечены оптимальные места установки датчиков: с точки зрения условия размещения датчиков максимально близко к объекту измерения (а); с точки зрения условия расположения датчиков максимально близко к двум симметричным лучам, исходящим из точки расположения контактного провода и направленным на 225° и 315° в полярной системе координат (б); с учетом всех указанных условий (в).

Габариты датчика примем исходя из линейки выпускаемых устройств: куб размером $0,1 \times 0,1 \times 0,1$ м. Оптимальным местом расположения датчиков являются точки, имеющие сле-

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

дующие габариты: высота над уровнем головок рельсов – 5,2 – 5,3 м; расстояние от оси пути – 6,9 – 7,0 м. В полярных координатах это соответствует таким габаритам: радиус – 0,955 – 1,081 м; углы – 226,3 – 233,5 ° (датчик А) и 306,5 – 313,7 ° (датчик В).

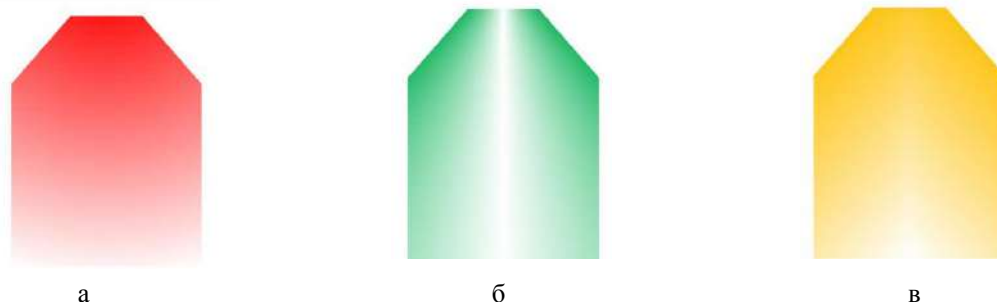


Рисунок 4 – Схема, поясняющая выбор оптимальных мест расположения датчиков

Преобразование изображений, полученных с оптических устройств, в геометрические параметры, необходимые для диагностики, осуществляется по следующему алгоритму:

первый этап – получение цифровых изображений с помощью оптоэлектронных устройств;

второй – преобразование цветовых параметров в монохромное цифровое изображение;

третий – преобразование цифровых изображений;

четвертый – расчет геометрических параметров контактной сети.

Первый этап представлен на рисунке 1.

На втором этапе осуществляется преобразование цифрового изображения в цифровую матрицу монохромного изображения.

На третьем этапе цифровая матрица монохромного изображения, полученного с оптоэлектронного сканера, преобразуется в гистограмму. Причем гистограмма строится по оси, перпендикулярной изображению провода, оказавшегося в поле цифрового изображения (рисунок 5).

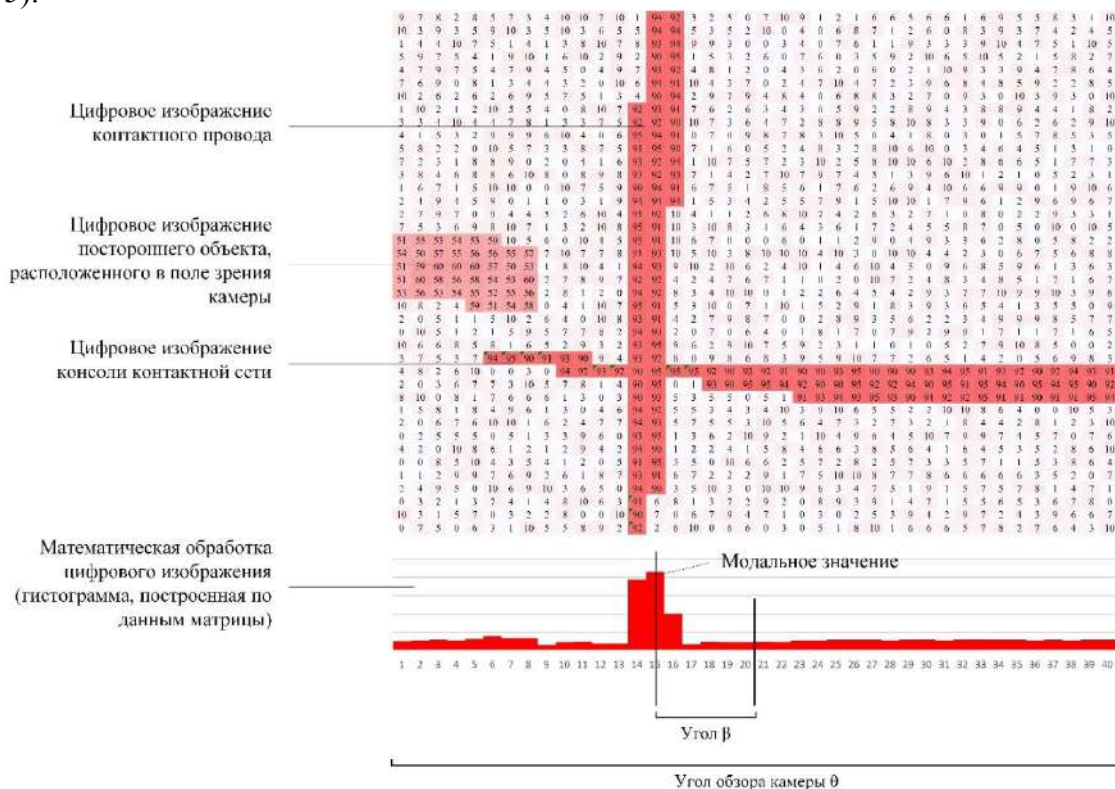


Рисунок 5 – Преобразование цифровых изображений

Четвертый этап представлен на рисунке 2.

Основной задачей хозяйства электроснабжения электрифицированных железных дорог является гарантированное энергообеспечение перевозочного процесса. Описанная методика бесконтактной диагностики контактной сети электрифицированных железных дорог направлена на совершенствование энергообеспечения перевозочного процесса.

Представленная методика предполагает использование способа диагностики контактной сети на основе оптических элементов с последующей цифровой обработкой данных и расчетом геометрических параметров. Данный способ обладает невысокой стоимостью устройства в отличие от аналогов и высокой точностью расчета. Устройства, разработанные в соответствии с описанной методикой, предполагается устанавливать на подвижном составе. Таким образом, исключается необходимость использования диагностических комплексов и сокращается срок между проверками от нескольких дней до нескольких минут.

Проведенный анализ и выбор оптимальных мест установки оптических устройств позволяет в дальнейшем разработать конструкцию устройства.

Список литературы

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030 года. – URL : <https://www.mintrans.ru/documents/2/1010> (дата обращения: 19.01.2020).
2. Стратегия научно-технического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и перспективу до 2025 года (Белая книга ОАО «РЖД»). – URL : http://www.rzd-expo.ru/innovation/BelKniga_2015.pdf (дата обращения: 19.01.2020).
3. Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» до 2025 года. – URL : http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&refererLayerId=5101&id=7017 (дата обращения: 19.01.2020).
4. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации (редакция от 25.12.2018). Утверждены приказом Минтранса России № 286 от 21.12.2010. – Москва, 2019. – 608 с. – Текст : непосредственный.
5. ГОСТ Р 8.929-2016. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Комплексы мобильные измерительно-вычислительные для измерения параметров контактной сети железной дороги. Технические требования. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 15 с. – Текст : непосредственный.
6. ГОСТ 32679-2014. Контактная сеть железной дороги. Технические требования и методы контроля. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 16 с. – Текст : непосредственный.
7. ГОСТ 32895-2014. Электрификация и электроснабжение железных дорог. Термины и определения. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 39 с. – Текст : непосредственный.
8. ГОСТ 19330-2013. Стойки для опор контактной сети железных дорог. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 67 с. – Текст : непосредственный.
9. ГОСТ Р 57670-2017. Системы тягового электроснабжения железной дороги. Методика выбора основных параметров. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 52 с. – Текст : непосредственный.
10. Сафин, В. Г. Метрологические характеристики оптических средств для измерений параметров подвески контактной сети / В. Г. Сафин, С. М. Шевяков, Ю. М. Федоришин. – Текст : непосредственный // Транспорт Российской Федерации. – 2010. – № 3 (28). – С. 41 – 43.

References

1. *Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v RF do 2030 goda* (Strategy for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030), Available at: <https://www.mintrans.ru/documents/2/1010> (accessed 19 January 2020).
2. *Strategiya nauchno-tekhnicheskogo razvitiya kholdinga «Rossiyskiye zheleznyye dorogi» na period do 2020 goda i perspektivu do 2025 goda (Belaya kniga ОАО «RZHD»)* (Strategy of scien-

tific and technical development of The Russian Railways holding for the period up to 2020 and the perspective up to 2025 (White paper of JSC «Russian Railways»), Available at: http://www.rzd-expo.ru/innovation/BelKniga_2015.pdf (accessed 19 January 2020).

3. *Dolgosrochnaya programma razvitiya OAO «RZHD» do 2025 goda* (Long-Term development program of JSC «Russian Railways» until 2025). Available at: http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&refererLayerId=5101&id=7017 (accessed 19 January 2020).

4. *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossiyskoy Federatsii (redaktsiya ot 25.12.2018). Utverzhdeny prikazom Mintransa Rossii № 286 ot 21.12.2010* (Rules of technical operation of Railways of the Russian Federation (edition of 25.12.2018). Approved by order of the Ministry of transport of Russia no. 286 dated 21.12.2010), Moscow, 2019, 608 p.

5. *Gosudarstvennaya sistema obespecheniya yedinstva izmereniy (GSI). Kompleksy mobil'nyye izmeritel'no-vychislitel'nyye dlya izmereniya parametrov kontaktной seti zheleznoy dorogi. Tekhnicheskiye trebovaniya, GOST R 8.929-2016* (State system for ensuring the uniformity of measurements (GSI). Mobile measuring and computing complexes for measuring parameters of the railway contact network. Specifications. National Standart 8.929-2016). Moscow, Standardinform, 2016, 15 p.

6. *Kontaktnaya set' zheleznoy dorogi. Tekhnicheskiye trebovaniya i metody kontrolya, GOST 32679-2014* (Railway Contact network. Technical requirements and control methods, National Standart 32679-2014). Moscow, Standardinform, 2015, 16 p.

7. *Elektrifikatsiya i elektrosnabzheniye zheleznykh dorog. Terminy i opredeleniya, GOST 32895-2014* (Electrification and power supply of Railways. Terms and definitions, National Standart 32895-2014). Moscow, Standardinform, 2014, 39 p.

8. *Stoyki dlya opor kontaktной seti zheleznykh dorog, GOST 19330-2013* (Racks for railway contact network supports, National Standart 19330-2013), Moscow, Standardinform, 2014, 67 p.

9. *Sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznoy dorogi. Metodika vybora osnovnykh parametrov, GOST R 57670-2017* (Railway traction power supply Systems. Method for selecting the main parameters, National Standart 57670-2017). Moscow, Standardinform, 2017, 52 p.

10. Safin V. G., Shevyakov S. M., Fedorishin Yu. M. Metrological characteristics of optical devices for measuring the parameters of the suspension of the contact network [Metrologicheskiye kharakteristiki opticheskikh sredstv dlya izmereniy parametrov podveski kontaktной seti]. *Transport Rossiyskoy Federatsii - Transport Of The Russian Federation*, 2010, no. 3 (28), pp. 41 – 43.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гаранин Максим Алексеевич

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС).

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

Кандидат технических наук, проректор по научной работе и инновациям, СамГУПС.

Тел.: +7 (917) 945-74-77.

E-mail: garanin@samgups.ru

Фроленков Сергей Андреевич

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС).

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

Аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», СамГУПС.

Тел.: +7 (927) 656-09-96.

E-mail: f9276560996@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Garanin Maxim Alekseevich

Samara State Transport University (SSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Vice-rector for research and innovation, SSTU.

Phone: +7 (917) 945-74-77.

E-mail: garanin@samgups.ru

Frolenkov Sergey Andreevich

Samara State Transport University (SSTU).

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

Post-graduate student of the Department «The power supply of rail transport», SSTU.

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

E-mail: f9276560996@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Гаранин, М. А. Методика бесконтактной диагностики положения проводов контактной сети электрифицированных железных дорог / М. А. Гаранин, С. А. Фроленков. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 4 (44). – С. 48 – 56.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Garanin M. A., Frolenkov S. A. Method of contactless diagnostics of the position of wires of the contact network of electrified railways. Journal of Transsib Railway Studies, 2020, no. 4 (44), pp. 48 – 56 (In Russian).

УДК 621.313

П. К. Шкодун

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

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Аннотация. В статье разрабатывается актуальный вопрос выбора диагностических параметров для оценки технического состояния профиля коллектора тяговых электродвигателей подвижного состава. Представлены результаты проведенных экспериментальных исследований профиля коллектора после ремонта и после проведения приемосдаточных испытаний для различных тяговых электродвигателей магистральных локомотивов: ТЛ-2К1 (ВЛ-10), ЭК810Ч (2ЭС6), ЭД133 (2ТЭ116У). Выявлена взаимосвязь между рассчитанными параметрами оценки профиля коллектора с помощью математического аппарата корреляционного анализа с ранжированием по шкале Чеддока. Установлена различная степень взаимосвязи между диагностическими параметрами, которые характеризуют состояние профиля коллектора тягового электродвигателя, при этом большинство известных диагностических параметров имеют выраженную корреляционную связь друг с другом. Рассмотрено множество диагностических параметров, которое может быть описано обобщенными параметрами, характеризующими профиль коллектора. Сделан вывод о возможности использования идентичных диагностических параметров для оценки состояния поверхности коллектора тягового электродвигателя на различных стадиях ремонта и технического обслуживания. На основе проведенных исследований выявлены диагностические параметры, имеющие диагностическую ценность и не связанные между собой корреляционными связями.

Ключевые слова: тяговый электродвигатель, коллектор, биение, корреляция, диагностирование, диагностический параметр.

Pavel K. Shkodun

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

DEVELOPMENT OF A COMPLEX OF DIAGNOSTIC PARAMETERS FOR ASSESSING THE TECHNICAL STATE OF TRACTION ELECTRIC MOTORS OF ROLLING STOCK

Abstract. The article develops the topical issue of choosing diagnostic parameters to assess the technical condition of the collector profile of traction electric motors of rolling stock. The results of experimental studies of the collector profile after repair and after carrying out acceptance tests for various traction electric motors of mainline locomotives: TL-2K1 (VL-10), EK810Ch (2ES6), ED133 (2TE116U) are presented. The relationship between the calculated parameters for assessing the reservoir profile using the mathematical apparatus of correlation analysis with a ranking on the Chaddock scale is revealed. A different degree of relationship has been established between the diagnostic parameters that characterize the state of the traction motor collector profile, while most of the known diagnostic parameters have a pronounced correlation with each other. A variety of diagnostic parameters are considered, which can be described by generalized parameters characterizing the reservoir profile. It is concluded that it is possible to use identical diagnostic parameters to assess the surface condition of the traction motor collector at various stages of repair and maintenance. On the basis of the studies carried out, diagnostic parameters have been identified that have diagnostic value and are not related to each other by correlations.

Keywords: traction motor, collector, runout, correlation, diagnostics, diagnostic parameter.

Процесс работы тяговых электродвигателей (ТЭД) магистральных локомотивов в значительной степени определяется механическими факторами, оказывающими влияние на условия контактирования электрической щетки с поверхностью коллектора. Нестабильность в скользящем контакте «коллектор – щетка» может быть вызвана как условиями эксплуатации, так и некачественным изготовлением и сборкой якоря, нарушением технологии ремонта и технического обслуживания в условиях локомотивного сервисного депо. Возникающие дефекты коллектора приводят к нарушению коммутационного процесса в ТЭД и вызывают неидентичность коммутационных циклов, что приводит к появлению искрения под щетками, вызывает их значительный износ, приводит к появлению круговых огней и необходимости внепланового технического обслуживания ТЭД [1, 2, 3]. Актуальным в настоящее время остается вопрос выявления причин неудовлетворительного состояния поверхности коллектора на основе расчета диагностических параметров, достоверно характеризующих состояние рабочей поверхности коллектора при ремонте и техническом обслуживании ТЭД в условиях локомотивного сервисного депо, что связано с реализацией основных направлений стратегии ОАО «Российские железные дороги» [4].

Ранее в научных работах [5, 6, 7] предложено использование математических моделей, описывающих взаимодействие «коллектор – щетка» ТЭД, при этом в большинстве из них щетка принимается как абсолютно упругое тело, совершающее радиальные и тангенциальные перемещения. Подобные модели содержат основные элементы, присущие щеткодержателям различных типов, и позволяют выбрать наиболее достоверные и ценные диагностические параметры. В условиях безотрывного движения щетки по поверхности коллектора в данной математической модели для давления щетки на коллектор P_k справедливо выражение:

$$P_k = m\eta'' + mg + \beta\eta' + \mu^2 j \eta + P_0, \quad (1)$$

где m – масса щетки, кг; η – функция профиля коллектора, м; η' – первая производная функции профиля коллектора, м/с; η'' – вторая производная функции профиля коллектора, м/с²; β – коэффициент, кг/с; μ – коэффициент трения; j – коэффициент, Н/м; P_0 – начальное давление в щеточном контакте, Н.

Анализ уравнения (1) показывает, что нестабильность контактирования щетки с поверхностью коллектора ТЭД может быть вызвана изменением текущего значения высоты коллекторной пластины коллектора; скоростью изменения функции профиля коллектора; второй производной функции профиля коллектора; изменением координаты точки приложения силы нажимного устройства; значения жесткости и статического нажатия пружины; массы щетки при ее износе; величины трения щетки о стенки щеткодержателя.

Указанные параметры вносят различный вклад в значение давления щетки на коллектор, при этом определяющую роль несут состояние профиля коллектора; устройство нажимного механизма; вид накладки на щетку; частота вращения якоря ТЭД. Исходя из представленного уравнения для оценки состояния поверхности коллектора ТЭД диагностические параметры условно разделяют на три группы: первая группа характеризует текущее значение высот коллекторных пластин; вторая группа – первую производную функции профиля коллектора; третья группа – ускорение, сообщаемое щетке со стороны коллектора. Вместе с тем отметим, что биение коллектора является основным контролируемым диагностическим параметром, содержащимся в технической ремонтной документации, однако только одного его значения, а также изменения этого значения в холодном и горячем состоянии недостаточно для определения качества рабочей поверхности коллектора.

В ряде работ [8, 9] предлагается выполнять точечную оценку различных диагностических параметров: максимального перепада между коллекторными пластинами, минимального значения второй производной. Такой подход не позволяет выявить причины неудовлетворительного состояния поверхности коллектора, связанные с производственными неточностями при изготовлении якоря либо с несовершенством технологического процесса в усло-

виях локомотивного депо. В работах ряда авторов предпринята попытка соотнести диагностические параметры и особенности технологического процесса изготовления и ремонта [9]. Например, в работе [8] при исследовании качества токосъема в коллекторно-щеточном узле ТЭД доказано, что первая и вторая гармонические составляющие не оказывают существенного влияния на контакт «коллектор – щетка», для оценки устойчивости скользящего контакта предлагается оценивать действующее значение составляющих функции профиля коллектора $\eta_{\text{действ}}$ без учета первой и второй гармоник. В работе [9], посвященной совершенствованию технологического процесса ремонта и технического обслуживания ТЭД, предлагается оценивать качество механической обработки и сборки коллектора по изменению значений амплитуды первой – пятой гармонических составляющих периодической функции профиля коллектора на всех стадиях ремонта; качество формовки коллектора – по виду и параметрам закона распределения относительных высот ламелей (математическому ожиданию и среднему квадратическому отклонению) без учета первой и второй гармонических составляющих до и после проведения приемосдаточных испытаний ТЭД. Таким образом, в настоящее время имеется достаточно большое количество диагностических параметров для оценки профиля коллектора, каждый из которых имеет свою специфику использования.

Целью настоящего исследования является систематизация известных диагностических параметров и выявление минимального их количества, имеющих диагностическую ценность и не связанных между собой. Решение поставленной задачи позволит сократить набор рассчитываемых диагностических параметров, систематизировать их по группам влияния и выделить наиболее важные с точки зрения информативности.

Для выявления совокупности диагностических параметров, определяющих влияние различных факторов на состояние поверхности коллектора и вызванных производственными и технологическими причинами, проведены экспериментальные исследования для различных ТЭД магистральных локомотивов. Выполнены исследования профилей коллектора ТЭД ТЛ-2К1 (55 шт.), ЭК810Ч (24 шт.) магистральных электровозов ВЛ10 и 2ЭС6 соответственно, а также ТЭД ЭД133 (38 шт.) магистральных тепловозов 2ТЭ116У. В ходе эксперимента фиксировались данные профиля коллектора ТЭД до и после ремонта, а также после проведения приемосдаточных испытаний.

Регистрация профилограмм осуществлялась с помощью разработанного на кафедре «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПСа прибора ПКП-4М, который имеет бесконтактный вихретоковый параметрический датчик, преобразующий расстояние до поверхности в пропорциональный электрический сигнал, записываемый в энергонезависимую память встроенного в прибор накопителя информации. Полученные данные для осуществления последующего анализа разделены по типам тяговых электродвигателей, а также по стадиям технологического процесса ремонта и технического обслуживания: после ремонта в холодном состоянии, а также после проведения приемосдаточных испытаний в горячем состоянии, отметим, что указанные последними две стадии после ремонта близки по времени друг к другу. Обработка исходных профилограмм коллекторов ТЭД позволила вычислить диагностические параметры, такие как биение δ ; первая – пятая гармоники функции профиля коллектора $A_1 - A_5$; среднее квадратическое отклонение высот ламелей σ_h , перепадов между соседними ламелями $\sigma_{\Delta h}$, вторая производная функции профиля коллектора $\sigma_{\eta''}$; максимальный перепад между соседними ламелями Δh_{max} ; минимальное значение второй производной функции профиля коллектора η''_{min} ; действующее значение функции профиля коллектора без учета первой и второй гармоник $\eta_{\text{действ}}$; среднее квадратическое отклонение высот коллекторных пластин без учета первой и второй гармоник σ_h' ; критерий согласия вида закона распределения χ^2 .

Для выявления взаимосвязи между рассчитанными параметрами оценки профиля коллектора выполнен корреляционный анализ диагностических параметров. В процессе анализа взаимосвязи между известными диагностическими параметрами проведены построение и

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

расчет элементов корреляционных матриц для исследуемых ТЭД на различных стадиях технического обслуживания и ремонта. Ранжирование степени тесноты взаимосвязи между параметрами выполнено по шкале Чеддока [10], в которой имеются пять условных диапазонов: 1 ... 0,9 – весьма высокая корреляционная связь; 0,9 ... 0,7 – высокая; 0,7 ... 0,5 – заметная; 0,5 ... 0,3 – умеренная; 0,3 ... 0,1 – слабая.

Проведение анализа корреляционных матриц, представленных в таблицах 1 – 6 и на рисунках 1 – 6, позволило сделать следующие выводы.

1. Параметр δ двигателей ТЛ-2К после депоовского ремонта до проведения приемосдаточных испытаний имеет высокую связь с параметрами σ_h и A_1 . Параметр A_1 имеет весьма высокую корреляционную связь с σ_h . Параметры A_3 , A_4 и A_5 имеют заметную корреляционную связь между собой. Среднее квадратическое отклонение перепадов между соседними ламелями $\sigma_{\Delta h}$ имеет весьма высокую связь с параметром σ_η (таблица 1 и рисунок 1).

Таблица 1 – Результаты расчета коэффициента корреляции параметров коллектора ТЭД ТЛ-2К1 после ремонта

	δ	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	σ_h	$\sigma_{\Delta h}$	σ_η	$\Delta h_{\max}$	$\eta'_{\min}$	$\eta_{\text{действ}}$	$\sigma_{\eta//}$	χ^2
δ	1,000													
A_1	0,845	1,000												
A_2	0,030	-0,090	1,000											
A_3	0,201	0,023	-0,341	1,000										
A_4	0,335	0,244	-0,089	0,496	1,000									
A_5	0,299	0,132	-0,172	0,710	0,772	1,000								
σ_h	0,889	0,984	-0,007	0,083	0,279	0,201	1,000							
$\sigma_{\Delta h}$	0,265	-0,043	-0,032	0,051	0,085	0,220	-0,024	1,000						
σ_η	0,240	-0,059	-0,140	0,113	0,157	0,306	-0,039	0,946	1,000					
$\Delta h_{\max}$	-0,220	-0,156	0,234	-0,307	-0,102	-0,117	-0,153	-0,257	-0,392	1,000				
$\eta_{\min}$	-0,299	-0,068	0,044	0,033	-0,218	-0,205	-0,078	-0,781	-0,830	0,572	1,000			
$\eta_{\text{действ}}$	0,331	-0,093	-0,023	0,659	0,520	0,700	0,022	0,576	0,616	-0,277	-0,488	1,000		
$\sigma_{\eta//}$	0,331	-0,093	-0,023	0,659	0,520	0,700	0,022	0,576	0,616	-0,277	-0,488	1,000	1,000	
χ^2	0,430	0,353	0,340	-0,326	-0,168	-0,327	0,327	0,109	0,036	-0,093	-0,204	-0,150	-0,150	1,000

2. Параметр δ двигателей ТЛ-2К после проведения приемосдаточных испытаний имеет высокую связь с параметрами σ_h и A_1 . Параметр A_1 имеет весьма высокую корреляционную связь с σ_h . Среднее квадратическое отклонение перепадов между соседними ламелями $\sigma_{\Delta h}$ имеет весьма высокую связь с параметром σ_η . Значение максимального перепада $\Delta h_{\max}$ имеет весьма высокую степень связи с параметрами σ_h и $\eta_{\min}$, высокую – с параметрами $\sigma_{\Delta h}$ и A_3 . Параметр $\eta_{\min}$ имеет в основном отрицательную корреляционную связь с другими параметрами, в том числе весьма высокую с σ_h , $\Delta h_{\max}$ и высокую с σ_η и $\sigma_{\Delta h}$. Критерий согласия χ^2 не имеет корреляционной связи с рассчитанными диагностическими параметрами (таблица 2 и рисунок 2).

Таблица 2 – Результаты расчета коэффициента корреляции параметров коллектора ТЭД ТЛ-2К1 после проведения приемосдаточных испытаний

	δ	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	σ_h	$\sigma_{\Delta h}$	σ_η	$\Delta h_{\max}$	$\eta'_{\min}$	$\eta_{\text{действ}}$	$\sigma_{\eta//}$	χ^2
δ	1,000													
A_1	0,679	1,000												
A_2	-0,081	-0,472	1,000											
A_3	0,631	0,215	-0,265	1,000										
A_4	0,359	0,431	0,171	-0,053	1,000									
A_5	0,089	0,085	0,335	0,080	0,707	1,000								
σ_h	0,788	0,971	-0,304	0,305	0,515	0,204	1,000							
$\sigma_{\Delta h}$	0,303	-0,150	0,087	0,587	0,052	0,184	0,002	1,000						
σ_η	0,282	-0,038	-0,014	0,529	0,149	0,232	0,091	0,962	1,000					
$\Delta h_{\max}$	0,535	-0,096	0,231	0,763	0,037	0,155	0,085	0,768	0,622	1,000				
$\eta_{\min}$	-0,508	0,039	-0,252	-0,703	-0,248	-0,308	-0,151	-0,849	-0,811	-0,896	1,000			
$\eta_{\text{действ}}$	0,451	-0,110	0,110	0,813	0,117	0,305	0,056	0,821	0,731	0,903	-0,899	1,000		
$\sigma_{\eta//}$	0,451	-0,110	0,110	0,813	0,117	0,305	0,056	0,821	0,731	0,903	-0,899	1,000	1,000	
χ^2	-0,072	-0,215	0,479	-0,233	0,349	0,545	-0,152	-0,172	-0,120	-0,174	0,042	-0,132	-0,132	1,000

3. Параметр δ двигателей ЭК-810Ч после деповского ремонта до проведения приемосдаточных испытаний имеет весьма высокую связь с параметрами σ_h и A_1 , высокую – с параметрами A_4 и σ_η . Параметр A_1 имеет весьма высокую корреляционную связь с σ_h , высокую – с параметром A_4 , при этом σ_h имеет весьма высокую корреляционную связь с A_4 . Параметры A_2 и A_5 имеют заметную корреляционную связь между собой. Параметр A_3 и критерий согласия χ^2 не имеют заметной корреляционной связи с рассчитанными диагностическими параметрами. Параметры A_1 , A_2 , A_4 и A_5 имеют заметную корреляционную связь между собой. Среднее квадратическое отклонение (СКО) перепадов между соседними ламелями $\sigma_{\Delta h}$ имеет весьма высокую связь с параметрами $\Delta h_{\max}$ и σ_η , высокую – с параметром σ_h (таблица 3 и рисунок 3).

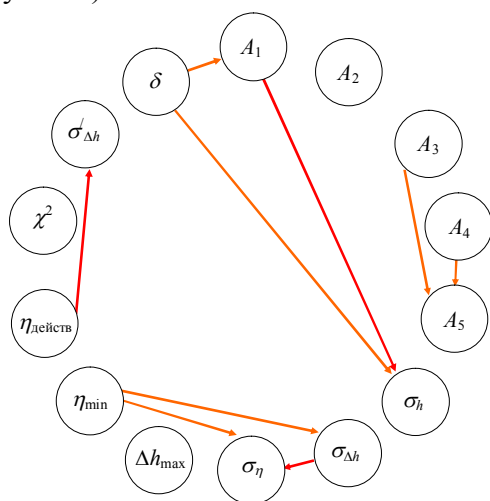


Рисунок 1 – Графическое представление корреляционной связи диагностических параметров для ТЭД ТЛ2К после ремонта

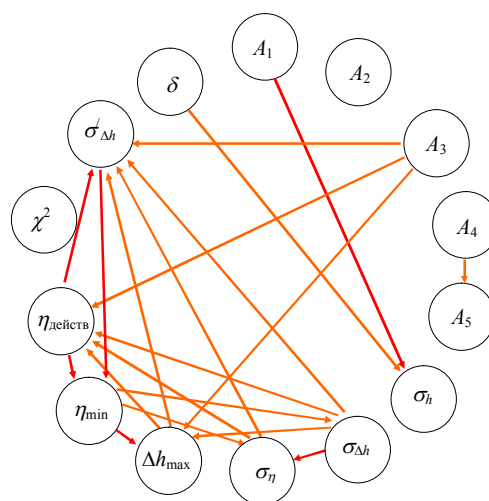


Рисунок 2 – Графическое представление корреляционной связи диагностических параметров для ТЭД ТЛ2К после приемосдаточных испытаний

Таблица 3 – Результаты расчета коэффициента корреляции параметров коллектора ТЭД ЭК-810Ч после ремонта

	δ	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	σ_h	$\sigma_{\Delta h}$	σ_η	$\Delta h_{\max}$	$\eta_{\min}$	$\eta_{\text{действ}}$	$\sigma_{\eta//}$	χ^2
δ	1,000													
A_1	0,916	1,000												
A_2	-0,451	-0,609	1,000											
A_3	-0,010	-0,207	0,205	1,000										
A_4	0,741	0,879	-0,661	-0,370	1,000									
A_5	0,260	0,397	-0,771	-0,332	0,734	1,000								
σ_h	0,935	0,975	-0,549	-0,143	0,915	0,460	1,000							
$\sigma_{\Delta h}$	0,609	0,431	-0,059	0,085	0,591	0,426	0,617	1,000						
σ_η	0,720	0,620	-0,412	-0,033	0,788	0,671	0,766	0,933	1,000					
$\Delta h_{\max}$	0,612	0,430	-0,263	0,059	0,612	0,583	0,603	0,959	0,968	1,000				
$\eta_{\min}$	-0,877	-0,769	0,457	0,265	-0,556	-0,180	-0,732	-0,372	-0,515	-0,442	1,000			
$\eta_{\text{действ}}$	0,683	0,617	-0,558	-0,014	0,804	0,775	0,748	0,857	0,981	0,936	-0,485	1,000		
$\sigma_{\eta//}$	0,683	0,617	-0,558	-0,014	0,804	0,775	0,748	0,857	0,981	0,936	-0,485	1,000	1,000	
χ^2	-0,249	-0,368	0,645	0,249	-0,119	-0,074	-0,176	0,532	0,249	0,367	0,509	0,145	0,145	1,000

4. Параметры $\sigma_{\Delta h}$; σ_η ; $\Delta h_{\max}$; $\eta_{\min}$; $\eta_{\text{действ}}$; σ_h ; χ^2 двигателей ЭК-810Ч после проведения приемосдаточных испытаний имеют весьма высокую корреляционную связь между собой, а также высокую связь с параметрами A_2 и A_3 . Параметр δ имеет высокую и заметную корреляционную связь с большинством диагностических параметров (A_1 ; A_3 ; A_5 ; σ_h ; $\sigma_{\Delta h}$; σ_η ; $\eta_{\min}$; $\eta_{\text{действ}}$; σ_h). Параметры A_1 , A_2 , A_4 и A_5 имеют заметную и высокую корреляционную связь между собой. Параметр A_1 имеет весьма высокую корреляционную связь с σ_h (таблица 4 и рисунок 4).

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Таблица 4 – Результаты расчета коэффициента корреляции параметров коллектора ТЭД ЭК-810Ч после проведения приемосдаточных испытаний

	δ	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	σ_h	$\sigma_{\Delta h}$	σ_η	$\Delta h_{\max}$	$\eta_{\min}^{\prime\prime}$	$\eta_{\text{действ}}$	$\sigma_{\eta^{\prime\prime}}$	χ^2
δ	1,000													
A_1	0,646	1,000												
A_2	0,193	-0,623	1,000											
A_3	-0,729	-0,003	-0,755	1,000										
A_4	-0,012	0,611	-0,822	0,683	1,000									
A_5	-0,572	-0,834	0,510	-0,123	-0,809	1,000								
σ_h	0,801	0,974	-0,430	-0,229	0,454	-0,802	1,000							
$\sigma_{\Delta h}$	0,716	-0,046	0,783	-0,869	-0,428	-0,117	0,168	1,000						
σ_η	0,760	0,002	0,771	-0,918	-0,470	-0,100	0,222	0,993	1,000					
$\Delta h_{\max}$	-0,465	0,304	-0,849	0,706	0,416	0,001	0,115	-0,943	-0,902	1,000				
$\eta_{\min}$	-0,570	0,171	-0,785	0,723	0,335	0,126	-0,019	-0,966	-0,929	0,991	1,000			
$\eta_{\text{действ}}$	0,749	0,037	0,707	-0,814	-0,306	-0,240	0,238	0,991	0,977	-0,935	-0,970	1,000		
$\sigma_{\eta^{\prime\prime}}$	0,749	0,037	0,707	-0,814	-0,306	-0,240	0,238	0,991	0,977	-0,935	-0,970	1,000	1,000	
χ^2	0,469	-0,284	0,826	-0,683	-0,376	-0,039	-0,100	0,938	0,894	-0,999	-0,993	0,936	0,936	1,000

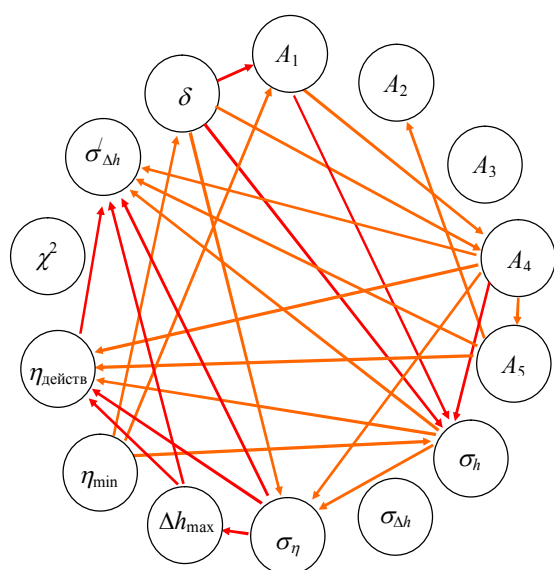


Рисунок 3 – Графическое представление корреляционной связи диагностических параметров для ТЭД ЭК810Ч после ремонта

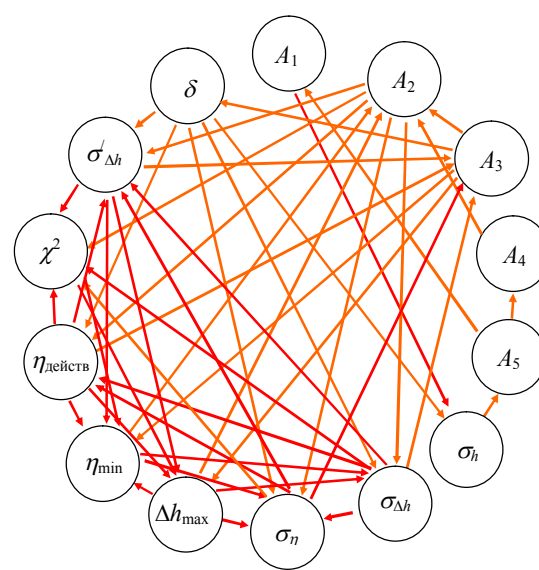


Рисунок 4 – Графическое представление корреляционной связи диагностических параметров для ТЭД ЭК810Ч после проведения приемосдаточных испытаний

5. Параметры δ , A_1 и σ_h двигателей ЭД133 после дефовского ремонта имеют весьма высокую корреляционную связь между собой. Параметр $\eta_{\text{действ}}$ имеет высокую и заметную связь с параметрами A_3 , A_4 , A_5 . Параметр σ_η имеет весьма высокую связь с $\sigma_{h/}$ и заметную – с $\Delta h_{\max}$ (таблица 5 и рисунок 5).

Таблица 5 – Результаты расчета коэффициента корреляции параметров коллектора ТЭД ЭД133 после ремонта

	δ	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	σ_h	$\sigma_{\Delta h}$	σ_η	$\Delta h_{\max}$	$\eta_{\min}^{\prime\prime}$	$\eta_{\text{действ}}$	$\sigma_{\eta^{\prime\prime}}$	χ^2
δ	1,000													
A_1	0,945	1,000												
A_2	0,360	0,296	1,000											
A_3	-0,146	-0,211	-0,018	1,000										
A_4	0,360	0,156	0,050	0,489	1,000									
A_5	0,342	0,208	0,091	0,382	0,473	1,000								
σ_h	0,964	0,993	0,323	-0,156	0,252	0,274	1,000							
$\sigma_{\Delta h}$	0,069	0,057	-0,270	-0,121	-0,076	0,176	0,046	1,000						
σ_η	-0,028	-0,100	0,057	0,028	-0,060	0,355	-0,101	0,405	1,000					
$\Delta h_{\max}$	-0,033	-0,196	-0,066	-0,118	-0,107	0,097	-0,207	0,487	0,570	1,000				
$\eta_{\min}$	-0,041	0,102	-0,101	0,128	0,086	-0,143	0,115	-0,314	-0,822	-0,847	1,000			
$\eta_{\text{действ}}$	0,325	0,133	0,080	0,611	0,898	0,668	0,231	0,072	0,174	0,004	-0,033	1,000		
$\sigma_{\eta^{\prime\prime}}$	-0,183	-0,311	-0,019	0,212	0,101	0,351	-0,285	0,415	0,900	0,644	-0,752	0,342	1,000	
χ^2	-0,012	0,077	0,074	-0,152	-0,329	-0,302	0,057	0,161	0,022	0,069	0,044	-0,203	0,103	1,000

6. Параметры δ , A_1 и σ_h имеют весьма высокую корреляционную связь между собой. Параметр $\sigma_{\Delta h}$ двигателей ЭД133 после проведения приемосдаточных испытаний имеет весьма высокую степень связи с параметром $\Delta h_{\max}$, высокую – с параметрами δ , A_1 , σ_h , заметную связь – с параметрами A_4 , χ^2 . Параметр $\Delta h_{\max}$ имеет высокую корреляционную связь с параметрами δ , A_1 , σ_h , заметную связь – с параметрами A_4 , $\eta_{\min}$. Параметр σ_h имеет высокую корреляционную связь с параметрами σ_η , $\eta_{\min}$, $\eta_{\text{действ}}$, χ^2 , а также заметную – с параметрами A_2 , A_3 , A_4 (таблица 6 и рисунок 6).

Таблица 6 – Результаты расчета коэффициента корреляции параметров коллектора ТЭД ЭД133 после проведения приемосдаточных испытаний

	δ	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	σ_h	$\sigma_{\Delta h}$	σ_η	$\Delta h_{\max}$	$\eta_{\min}$	$\eta_{\text{действ}}$	$\sigma_{\eta//}$	χ^2
δ	1,000													
A_1	0,975	1,000												
A_2	-0,198	-0,270	1,000											
A_3	-0,418	-0,320	-0,545	1,000										
A_4	0,389	0,454	-0,280	0,242	1,000									
A_5	0,315	0,206	0,195	-0,264	0,085	1,000								
σ_h	0,985	0,996	-0,241	-0,377	0,457	0,236	1,000							
$\sigma_{\Delta h}$	0,825	0,806	-0,445	-0,276	0,532	0,034	0,826	1,000						
σ_η	-0,067	0,085	-0,420	0,521	0,657	-0,188	0,045	0,082	1,000					
$\Delta h_{\max}$	0,889	0,873	-0,425	-0,251	0,583	0,139	0,885	0,949	0,210	1,000				
$\eta_{\min}$	-0,323	-0,414	0,298	-0,186	-0,748	-0,102	-0,403	-0,294	-0,834	-0,501	1,000			
$\eta_{\text{действ}}$	-0,013	0,024	-0,430	0,677	0,208	0,377	-0,011	-0,226	0,330	-0,066	-0,365	1,000		
$\sigma_{\eta//}$	0,171	0,260	-0,555	0,571	0,504	0,209	0,225	0,057	0,707	0,262	-0,788	0,837	1,000	
χ^2	0,258	0,162	-0,148	-0,389	-0,179	-0,384	0,192	0,529	-0,351	0,430	0,277	-0,633	-0,503	1,000

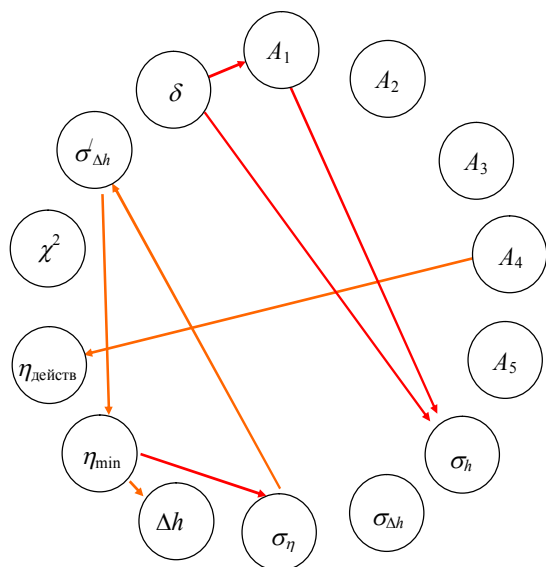


Рисунок 5 – Графическое представление корреляционной связи диагностических параметров для ТЭД ЭД133 после ремонта

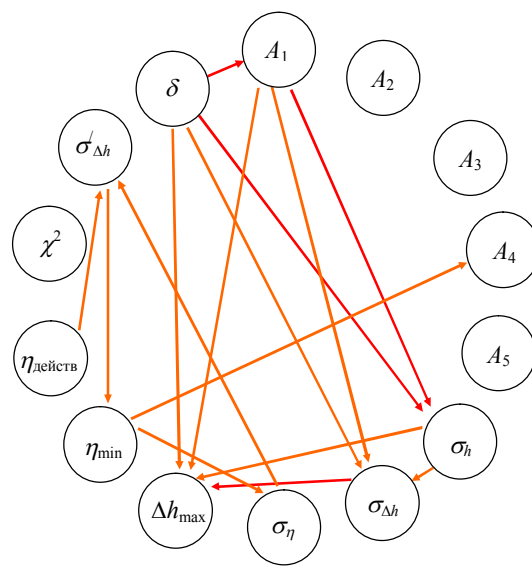


Рисунок 6 – Графическое представление корреляционной связи диагностических параметров для ТЭД ЭД133 после проведения приемосдаточных испытаний

Таким образом, на основании комплекса проведенных исследований выявлена различная степень взаимосвязи между диагностическими параметрами, характеризующими состояние профиля коллектора ТЭД. Учитывая, что рассмотренные ТЭД работают на локомотивах в сходных режимах и наблюдаются близкие значения их электромеханических параметров, можно с некоторой степенью достоверности сделать общие выводы для такого класса электрических машин. Установлено, что большинство известных диагностических параметров имеют явно выраженную корреляционную связь между собой, таким образом, имеется множество диагностических параметров, которое может быть описано обобщенными параметрами, характеризующими профиль коллектора. Такое соотношение связей имеется для раз-

личных стадий ремонта различных ТЭД, что позволяет сделать вывод о возможности предложения использования идентичных диагностических параметров для оценки состояния поверхности коллектора ТЭД.

На основе проведенных исследований выявлены диагностические параметры, имеющие диагностическую ценность и не связанные между собой корреляционными связями, которые условно разделены на четыре группы: биение, вторая (овальность) и третья (треугольность) гармоники профиля коллектора характеризуют высоты коллекторных пластин; вторая группа – среднее квадратическое отклонение перепадов высот коллекторных пластин характеризует первую производную профиля коллектора; третья группа – среднее квадратическое значение второй производной функции профиля коллектора характеризует ускорение, сообщаемое щетке со стороны коллектора; четвертая группа – критерий согласия вида закона распределения χ^2 . Разработанные на кафедре «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС прибор профиля коллектора ПКП-4М и программное обеспечение позволяют определить численные значения выявленных диагностических параметров. Определение интервалов значений диагностических параметров для конкретного типа ТЭД представляет направление дальнейшей научной проработки.

Список литературы

1. Авилов, В. Д. Решение проблемы оптимизации коммутационного процесса в электрических машинах постоянного тока / В. Д. Авилов, Ш. К. Исмаилов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2012. – № 4 (12). – С. 2 – 9.
2. Авилов, В. Д. Методика нормирования качества коммутации в тяговых электрических машинах / В. Д. Авилов, Ш. К. Исмаилов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2012. – № 2 (10). – С. 2 – 7.
3. Авилов, В. Д. Методы анализа и настройки коммутации машин постоянного тока / В. Д. Авилов. – Москва : Энергоатомиздат, 1995. – 237 с. – Текст : непосредственный.
4. Стратегия научно-технологического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2025 года. «Белая книга». – Москва, 2015. – 63 с. – Текст : электронный. – Инновационный дайджест rzd-expo : сайт. – URL: http://www.rzd-expo.ru/innovation/BelKniga_2015.pdf (дата обращения: 23.12.2020).
5. Зиннер, Л. Я. Тангенциальные колебания щеток / Л. Я. Зиннер, А. И. Скороспешкин. – Текст : непосредственный // Известия ТПИ. – 1968. – Т. 190. – С. 257 – 267.
6. Зиннер, Л. Я. Некоторые вопросы динамики скользящего контакта «щетka – коллектор» / Л. Я. Зиннер, А. И. Скороспешкин. – Текст : непосредственный // Известия ТПИ. – 1967. – Т. 172. – С. 296 – 307.
7. Харламов, В. В. Методы и средства диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей и других коллекторных машин постоянного тока / В. В. Харламов. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2002. – 233 с. – Текст : непосредственный.
8. Ахунов, Д. А. Совершенствование методов оценки технического состояния коллектора электрических машин постоянного тока : специальность 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ахунов Данил Асгатович ; Омский государственный университет путей сообщения. – Омск, 2013. – 21 с. : ил. – Место защиты: Омский государственный технический университет. – Текст : непосредственный.
9. Долгова, А. В. Совершенствование технологии диагностирования коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей магистральных электропоездов : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Долгова Анна Владимировна ; Омский государственный университет путей сообщения. – Омск, 2013. – 20 с. :

ил. – Место защиты : Омский государственный университет путей сообщения. – Текст : непосредственный.

10. Елисеева, И. И. Эконометрика : учебник / под ред. И. И. Елисеевой. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Финансы и статистика, 2007. – 576 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Avilov V. D., Ismailov Sh. K. Solution of the problem of optimization of the switching process in direct current electric machines [Reshenie problemy optimizatsii kommutatsionnogo processa v elektricheskikh mashinah postoyannogo toka]. *Izvestiia Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2012, no. 4 (12), pp. 2 – 9.

2. Avilov V. D., Ismailov Sh. K. Methodology for standardizing the quality of commutation in traction electric machines [Metodika normirovaniya kachestva kommutatsii v tyagovykh elektricheskikh mashinah]. *Izvestiia Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2012, no. 2 (10), pp. 2 – 7.

3. Avilov V. D. *Metody analiza i nastroyki kommutatsii mashin postoyannogo toka* (Methods of analysis and tuning of switching DC machines). Moscow: Energoatomizdat, 1995, 237 p.

4. *Strategiia nauchno-tekhnologicheskogo razvitiia kholdinga «Rossiiskie zheleznye dorogi» na period do 2020 goda i na perspektivu do 2025 goda. «Belaia kniga»* (The strategy of scientific and technological development of the holding «Russian Railways» for the period until 2020 and for the future until 2025. «White paper»), Available at: http://www.rzd-expo.ru/innovation/BelKniga_2015.pdf (accessed 23 December 2020).

5. Zinner L. Ya., Skorospeshkin A. I. Tangential vibrations of brushes [Tangencial'nye kolebaniya shchetok]. *Izvestiia TPU – News of the TPI*, 1968, no. 190, pp. 257 – 267.

6. Zinner L. Ya., Skorospeshkin A. I. Some questions of the sliding contact dynamics of the brush-collector [Nekotorye voprosy dinamiki skol'zyashchego kontakta shchetka-kollektor]. *Izvestiia TPU – News of the TPI*, 1967, no. 172, pp. 296 – 307.

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

8. Akhunov D. A. Improvement of methods for assessing the technical condition of the collector of direct current electric machines [Sovershenstvovanie metodov ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya kollektora elektricheskikh mashin postoyannogo toka]: Ph.D. thesis abstract, Omsk, 2013, 21 p.

9. Dolgova A. V. Improvement diagnosing technology of main electric locomotives traction motors collector-brush assembly [Sovershenstvovanie tehnologii diagnostirovaniya kollektorno-shchetchnogo uzla tyagovykh elektrodvigatelej magistral'nykh jelektrovozov]: Ph. D. thesis abstract, Omsk, 2013, 20 p.

10. Eliseeva I. I. *Ekonometrika: uchebnik* (Econometrics: textbook). Moscow: Finansy i statistika Publ., 2007, 576 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Шкодун Павел Константинович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Shkodun Pavel Konstantinovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Electrical machines and general electrical engineering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru

Шкодун, П. К. Разработка комплекса диагностических параметров оценки технического состояния тяговых электродвигателей подвижного состава / П. К. Шкодун. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 4 (44). – С. 56 – 65.

Shkodun P. K. Development of a complex of diagnostic parameters for assessing the technical state of traction electric motors of rolling stock. Journal of Transsib Railway Studies, 2020, no. 4 (44), pp. 56 – 65 (In Russian).

УДК 629.423:621.311.004.18

А. А. Бакланов, А. П. Шияков, А. В. Раздобаров

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

ПРИНЦИПЫ КЛАССИФИКАЦИИ ВЛИЯЮЩИХ ФАКТОРОВ НА РАСХОД ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНЫМ СОСТАВОМ

Аннотация. Рассмотрены известные подходы к классификации факторов, влияющих на энергозатраты поезда, выявлены их основные недостатки. Оценена обоснованность существующих методов классификации и полнота учета в них влияющих на энергозатраты факторов. Показано, что ни один из известных подходов к классификации не дает полное представление о всех влияющих факторах и степени их влияния на энергозатраты поезда, поскольку не учитывает в полной мере физическую сущность отдельных составляющих и в целом расхода электроэнергии на тягу.

На основе анализа энергетического баланса движения поезда сформулированы принципы и критерии классификации факторов, влияющих на расход электроэнергии, рассмотрены взаимопревращения различных видов энергии и характеризующие их энергетические диаграммы в различных режимах движения поезда.

Проведенный анализ позволил выявить факторы, действующие на расход электроэнергии поезда во всех режимах движения, и оценить их по различным критериям.

Предложена классификация факторов, влияющих на расход электроэнергии поезда, позволяющая обосновать правильную методику учета каждого фактора, разрабатывать мероприятия по уменьшению влияния отдельных факторов на энергозатраты, усовершенствовать систему анализа, нормирования и прогнозирования расхода электроэнергии на тягу поездов, грамотно решать другие задачи энергетики электрической тяги.

Ключевые слова: электровоз, поезд, режимы движения, электроэнергия, энергетический баланс, классификация факторов.

Alexander A. Baklanov, Andrey P. Shilyakov, Aleksey V. Razdobarov

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

PRINCIPLES OF CLASSIFICATION OF INFLUENCING FACTORS ON THE ENERGY CONSUMPTION OF ELECTRIC ROLLING STOCK

Abstract. The known approaches to the classification of factors affecting the energy consumption of the train are considered, and their main disadvantages are identified. The validity of existing classification methods and the completeness of accounting for factors affecting energy consumption are evaluated. It is shown that none of the known approaches to classification gives a complete picture of all the influencing factors and the degree of their influence on the energy consumption of the train, since it does not fully take into account the physical nature of the individual components and the overall power consumption for traction.

Based on the analysis of the energy balance of the train articulated principles and criteria for the classification of factors influencing energy consumption, considers the interconversion of different forms of energy and describe their energy diagrams in the different modes of the train movement.

The analysis made it possible to identify the factors that affect the power consumption of the train in all modes of movement, and evaluate them according to various criteria.

A classification of factors affecting the train's electricity consumption is proposed, which allows us to justify the correct method of accounting for each factor, develop measures to reduce the influence of individual factors on energy consumption, improve the system of analysis, rationing and forecasting of electricity consumption for train traction, and competently solve other problems of electric traction energy.

Keywords: electric locomotive, train, mode of motion, electric energy, energy balance, classification of factors.

Одной из важнейших задач, определяемых стратегией развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г., является повышение энергетической эффективности электрической тяги поездов. Для успешного решения этой задачи необходимо правильно понимать, какие факторы и в какой степени влияют на энергозатраты поездов.

Количественная сторона взаимопревращения различных видов энергии в процессе движения электровоза с поездом определяется различными факторами. Для выявления действующих факторов и установления степени влияния каждого из них на отдельные составляющие и расход электроэнергии в целом все факторы целесообразно классифицировать. Классификация факторов позволяет глубже и полнее познать их сущность, взаимосвязи и влияние как в отдельности, так и в совокупности на расход энергии, обосновать правильную методику учета каждого из них. Она помогает также разрабатывать мероприятия по уменьшению влияния отдельных факторов на расход энергии.

Существуют разные подходы к классификации и оценке факторов, влияющих на расход электроэнергии поезда. Так, в работах [1 – 3] используется подход, базирующийся в основном на практическом опыте авторов. Для классификации и оценки влияющих на энергозатраты поездов факторов наиболее распространенным является подход, основанный на анализе статистических данных [4 – 6]. При этом выбор влияющих факторов и их количество обычно определяются на основании статистических критериев либо субъективного мнения исследователя. Преимущественно используют математические модели линейной множественной регрессии и коэффициенты влияния отдельных факторов на энергозатраты поезда. Используют также кусочно-линейные и другие модели. В работе [7] на основе существующей теории тяги поездов рассматриваются влияющие на расход энергии факторы с учетом их физической сущности, однако при этом не все факторы учитываются и всесторонняя оценка их влияния на энергозатраты не дается. В работах [8 – 10] рассматривается в основном влияние отдельных факторов на расход электроэнергии поезда на основании экспериментальных данных.

Следовательно, известные примеры классификации факторов, влияющих на расход энергии поездом, как правило, основаны на практическом опыте работы, зачастую не лишенном субъективности, и не учитывают полностью физическую сущность процесса движения поезда, происходящие при этом взаимопревращения различных видов энергии, действующие факторы, их взаимосвязи и т. п. В рассмотренных работах не приводится достаточное обоснование количества принятых во внимание факторов и степени их влияния на расход энергии.

Таким образом, анализ показывает, что ни один из указанных выше подходов не дает полного представления обо всех влияющих факторах и степени их влияния на энергозатраты поезда, поскольку не учитывает в полной мере физическую сущность отдельных составляющих и в целом расхода электроэнергии на тягу. Физическую сущность расхода электроэнергии на тягу, его отдельных составляющих и влияющих факторов раскрывает энергетический баланс движения (ЭБД) поезда [11], базирующийся на основном физическом законе – законе сохранения и превращения энергии.

Введем основные понятия, используемые ниже: объект классификации, признак и класс (группа). В нашем случае объектом классификации являются факторы, влияющие на расход энергии. Для правильной их классификации большое значение имеет выбор наиболее существенных признаков классификации и главных факторов. Учитывая физическую сущность процесса движения поезда и происходящие при этом энергетические преобразования, классификацию факторов, влияющих на отдельные составляющие ЭБД поезда и расход энергии в целом, их разделение на классы (группы) целесообразно произвести по следующим признакам: по виду воздействия – прямые и косвенные; по уровню значимости – основные и дополнительные; по характеру проявления – детерминированные и случайные; по продолжительности – кратковременные и длительные; по управляемости – управляемые и неуправляемые;

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

по сфере возникновения – технические и организационные; по отношению к производственному персоналу – зависящие от персонала и не зависящие от него.

Общая классификация факторов, влияющих на расход электроэнергии в тяге поездов, характеризующая признаки классификации, уровни управления и планирования, приведена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Общая классификация факторов, влияющих на расход электроэнергии поезда

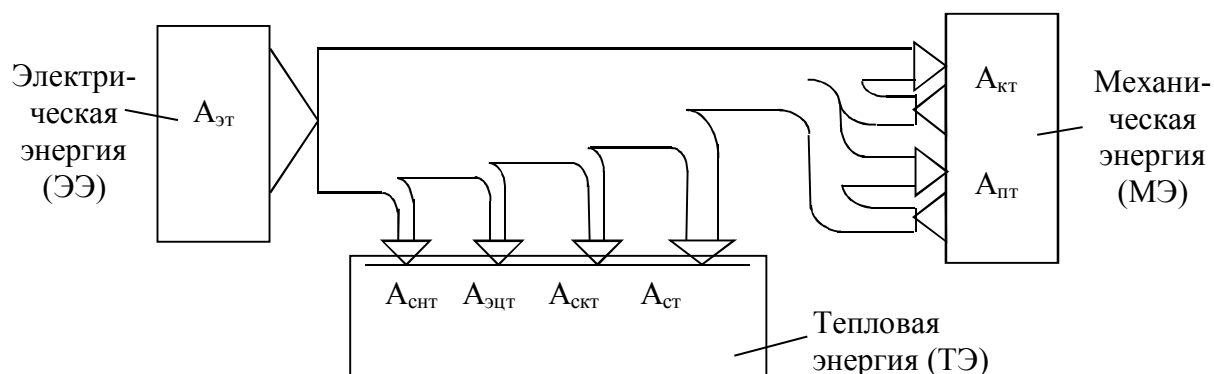
Для выявления и систематизации факторов, влияющих на расход электроэнергии поезда, рассмотрим энергетические диаграммы движения поезда, полученные на основании анализа ЭБД поезда, характеризующие составляющие энергобаланса, их направленность и сочетание в отдельных режимах и в целом во всех режимах движения (рисунки 2, 3).

В режиме тяги (рисунок 2, а) подводимая к электровозу электрическая энергия $A_{\text{эт}}$ затрачивается на увеличение кинетической $A_{\text{кт}}$ и потенциальной $A_{\text{пт}}$ энергии поезда, преодоление работы сил сопротивления движению $A_{\text{ст}}$, собственные нужды $A_{\text{снт}}$, потери в энергетической цепи $A_{\text{эцт}}$ и избыточное проскальзывание колес электровоза относительно рельсов $A_{\text{скт}}$. Та часть электроэнергии, которая расходуется на преодоление сил сопротивления движению, собственные нужды, потери в энергетической цепи и избыточное проскальзывание колес электровоза относительно рельсов, в конечном итоге диссипирует, т. е. рассеивается в окружающее пространство. Следовательно, потребляемая электровозом электрическая энергия в режиме тяги преобразуется в механическую (МЭ) и частично в тепловую энергию (ТЭ). В этом же режиме часть накопленной механической энергии может затрачиваться на преодоление сил сопротивления движению.

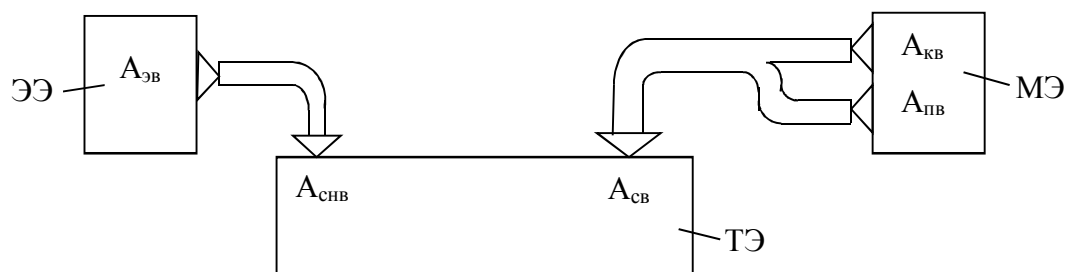
В режиме выбега (рисунок 2, б) движение поезда осуществляется за счет накопленной им ранее механической энергии (кинетической $A_{\text{кв}}$ и потенциальной $A_{\text{пв}}$), которая компенсирует работу сил сопротивления движению $A_{\text{св}}$, т. е. происходит полная диссипация механи-

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

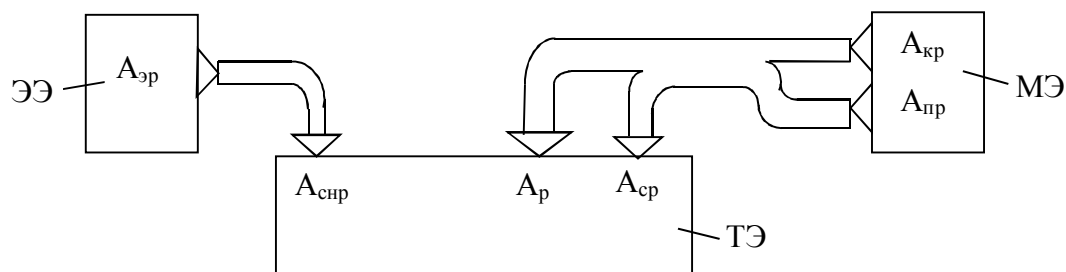
ческой энергии. Потребляемая в этом режиме электроэнергия $A_{эв}$ расходуется только на собственные нужды электровоза и поезда в целом.



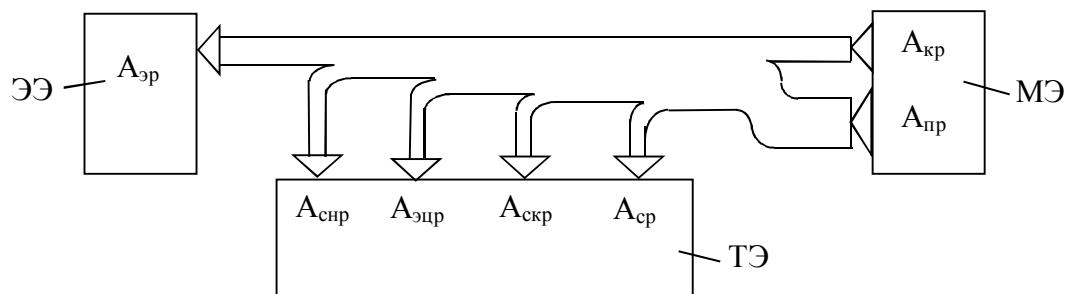
а



б



в



г

Рисунок 2 – Энергетические диаграммы движения поезда в различных режимах: а – тяга; б – выбег; в – механическое торможение; г – рекуперативное торможение

В режиме торможения (рисунки 2, в, г) накопленная ранее механическая энергия поезда частично затрачивается на преодоление работы сил сопротивления движению $A_{ср}$, а оставшаяся ее часть A_p , представляющая собой полную избыточную энергию поезда, либо рассеивается в окружающее пространство с помощью механического или реостатного торможения (см. рисунок 2, в), т. е. превращается в тепловую энергию, либо с помощью системы рекуперативного торможения преобразуется в электрическую энергию $A_{эп}$ и возвращается в тяговую сеть (см. рисунок 2, г). В последнем случае часть вырабатываемой электроэнергии затрачивается на компенсацию потерь в энергетической цепи $A_{эцп}$, избыточное проскальзывание колес электровоза относительно рельсов $A_{скр}$ и собственные нужды электровоза $A_{снр}$. Следовательно, в режиме торможения накопленная механическая энергия поезда превращается либо полностью в тепловую, либо в тепловую и электрическую энергию, при этом последняя используется полезно другими потребителями. Потребляемая в режиме механического или реостатного тормоза электроэнергия $A_{эп}$ расходуется только на собственные нужды электровоза и поезда в целом.

Результирующие энергетические диаграммы движения поезда с механическим тормозом (рисунок 3, а) и с рекуперативным и механическим тормозами (рисунок 3, б) получены путем синтеза энергетических диаграмм движения поезда в отдельных режимах. Они показывают прежде всего, что во всех режимах для движения поезда может частично или полностью использоваться накопленная им ранее механическая энергия с превращением кинетической энергии в потенциальную и наоборот. Следовательно, происходит своеобразное перекачивание энергии и чем больше кинетической энергии превратится в потенциальную и наоборот, тем меньше получится расход подведенной к электровозу электрической энергии. Снижению расхода электроэнергии способствует также более высокая степень использования механической энергии поезда в режиме рекуперативного торможения, т. е. максимальное ее преобразование в электрическую энергию.

В общем виде энергетические диаграммы характеризуются выражениями:
в режиме тяги –

$$A_{эт} = A_{кт} + A_{пт} + A_{ст} + A_{эцт} + A_{скт} + A_{снт} = (A_{кт} + A_{пт} + A_{ст})/\eta_{дт} + A_{снт}; \quad (1)$$

в режиме выбега –

$$A_{эв} = A_{снв}; \quad (2)$$

в режимах механического или реостатного торможения –

$$A_{эп} = A_{снр}; \quad (3)$$

в режиме рекуперативного торможения –

$$A_{эп} = A_{кр} + A_{пр} + A_{ср} + A_{эцп} + A_{скр} + A_{снр} = (A_{кр} + A_{пр} + A_{ср})\eta_{др} + A_{снр}, \quad (4)$$

где $\eta_{дт}$, $\eta_{др}$ – эксплуатационные КПД энергетической цепи тяговых двигателей электровоза в режимах тяги и рекуперативного торможения.

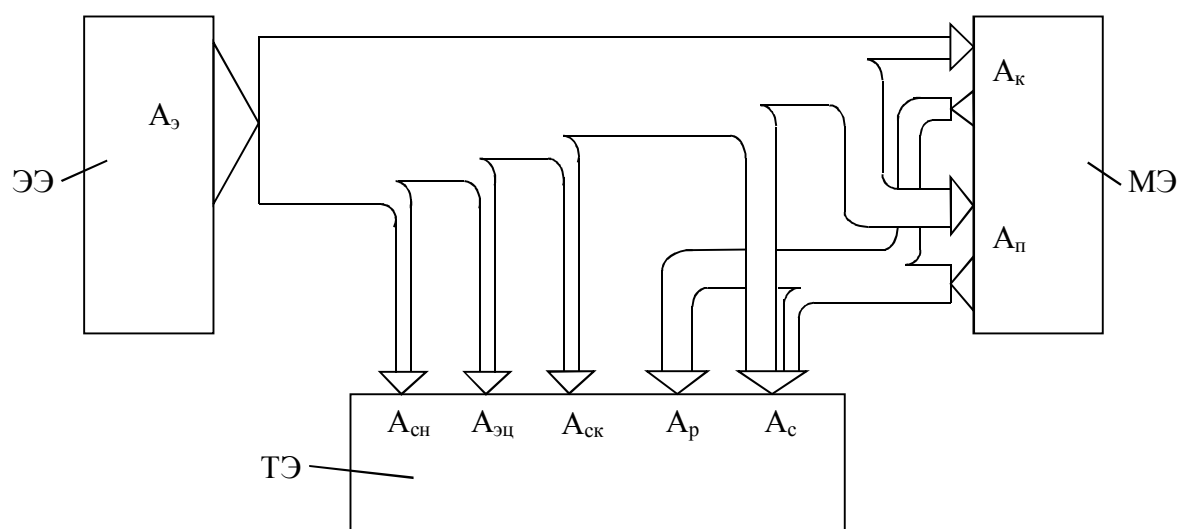
Результирующее уравнение для всех режимов движения поезда, характеризующее общий расход электроэнергии, имеет вид:

$$A_{э} = A_{эт} + A_{эв} + A_{эп}. \quad (5)$$

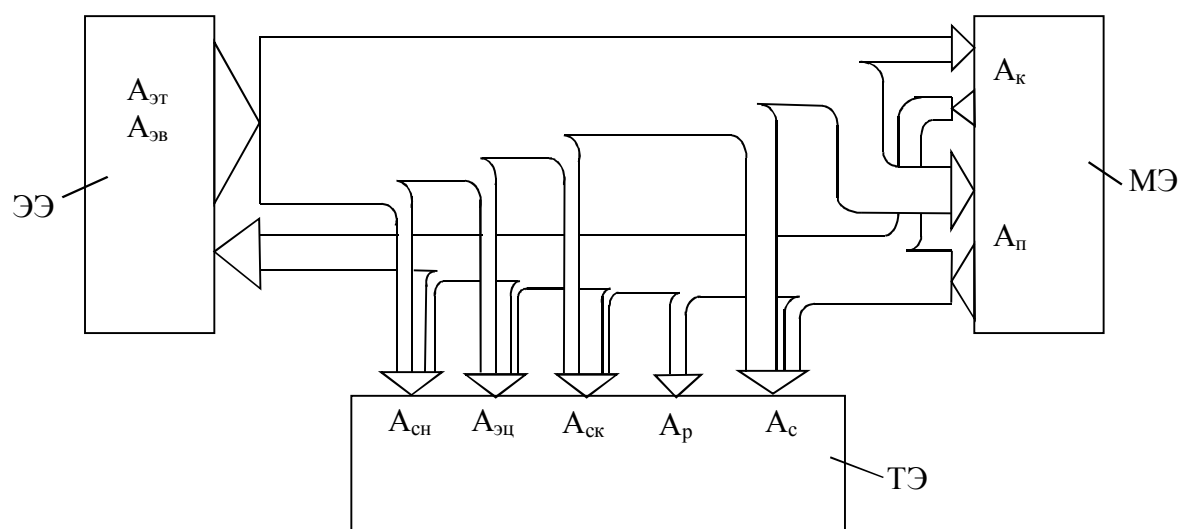
Здесь нужно иметь в виду, что в уравнении (5) в случае применения рекуперативного торможения величина $A_{эп}$ будет отрицательная.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Детальный анализ показывает, что составляющие ЭБД поезда зависят от конкретных факторов, при этом каждая составляющая зависит от массы поезда и длины участка следования поезда, т. е. от времени и скорости движения, а также от своих специфических факторов, рассмотренных в работе [11].



а



б

Рисунок 3 – Результирующие энергетические диаграммы движения поезда:
а – с механическим тормозом; б – с рекуперативным и механическим тормозами

Исходя из принятых выше основных принципов классификации к прямым относятся факторы, которые непосредственно влияют на расход электроэнергии и входят в уравнения отдельных составляющих ЭБД поезда [11]. Это такие факторы, как масса, скорость движения и ее изменения и характеристика сопротивления движению поезда, профиль и план пути, мощность собственных нужд и КПД тяговых двигателей электровоза, продолжительности режимов движения, время хода и длина участка. Косвенными являются факторы, которые не входят в уравнения (1) – (5), но тем не менее действуют непосредственно на прямые факторы и опосредованно на расход энергии. Это прежде всего техническое состояние подвижного состава, пути, устройств электроснабжения, сигнализации и связи, квалификация машинистов и другие факторы.

К основным факторам относятся масса и скорость движения поезда, профиль и план пути и т. д. Дополнительными факторами являются, например, износ (прокат) бандажей колесных пар подвижного состава, схема формирования состава вагонов поезда и т. п.

К детерминированным факторам относятся параметры поезда и участка пути, допускаемые скорости движения на станциях и перегонах и т. д. Случайными факторами являются условия движения (поездная ситуация), климатические факторы и т. п.

К зависящим от производственного персонала факторам можно отнести режим ведения поезда, фактическую скорость его движения, поездную ситуацию и т. д. Не зависящими от персонала являются климатические факторы; не зависят от локомотивных бригад, а зависят от работников подразделений других служб параметры и техническое состояние состава вагонов, пути, устройств электроснабжения, сигнализации и связи.

Аналогично все факторы могут быть классифицированы и по другим признакам. Необходимо отметить, что некоторые факторы в зависимости от решаемой задачи могут быть отнесены к одному либо к другому классу, т. е. они занимают промежуточное положение по отношению к рассмотренным выше классам. Например, скорость движения поезда с одной стороны определяется параметрами электровоза, состава вагонов и других технических устройств, а с другой стороны зависит от организации движения поездов на данном участке, поэтому в конкретных задачах она может быть техническим либо организационным фактором.

Одни и те же факторы могут быть отнесены к разным классам в зависимости от уровня планирования и управления железнодорожным транспортом, на котором они рассматриваются. Например, масса и другие параметры поезда, параметры профиля и плана пути участка на уровне поездки являются конкретными, т. е. детерминированными, факторами, а на более высоких уровнях (ОАО «РЖД», дорога и др.) их можно считать случайными факторами. Перечень факторов, влияющих на расход электроэнергии поезда, приведен на рисунке 4.

Выполненный анализ взаимопревращений различных видов энергии при движении поезда и разработанная классификация факторов позволяют перейти к подробному изучению количественных соотношений между отдельными составляющими ЭБД поезда и действующими на них факторами.

Расход электроэнергии поезда в каждом конкретном случае определяется количеством, сочетанием и значениями действующих факторов, зависящих в свою очередь от параметров поезда, электровоза, профиля и плана пути, условий движения, прежде всего скорости движения, параметров устройств тягового электроснабжения, сигнализации и связи, климатическими факторами, квалификацией обслуживающего персонала и др.

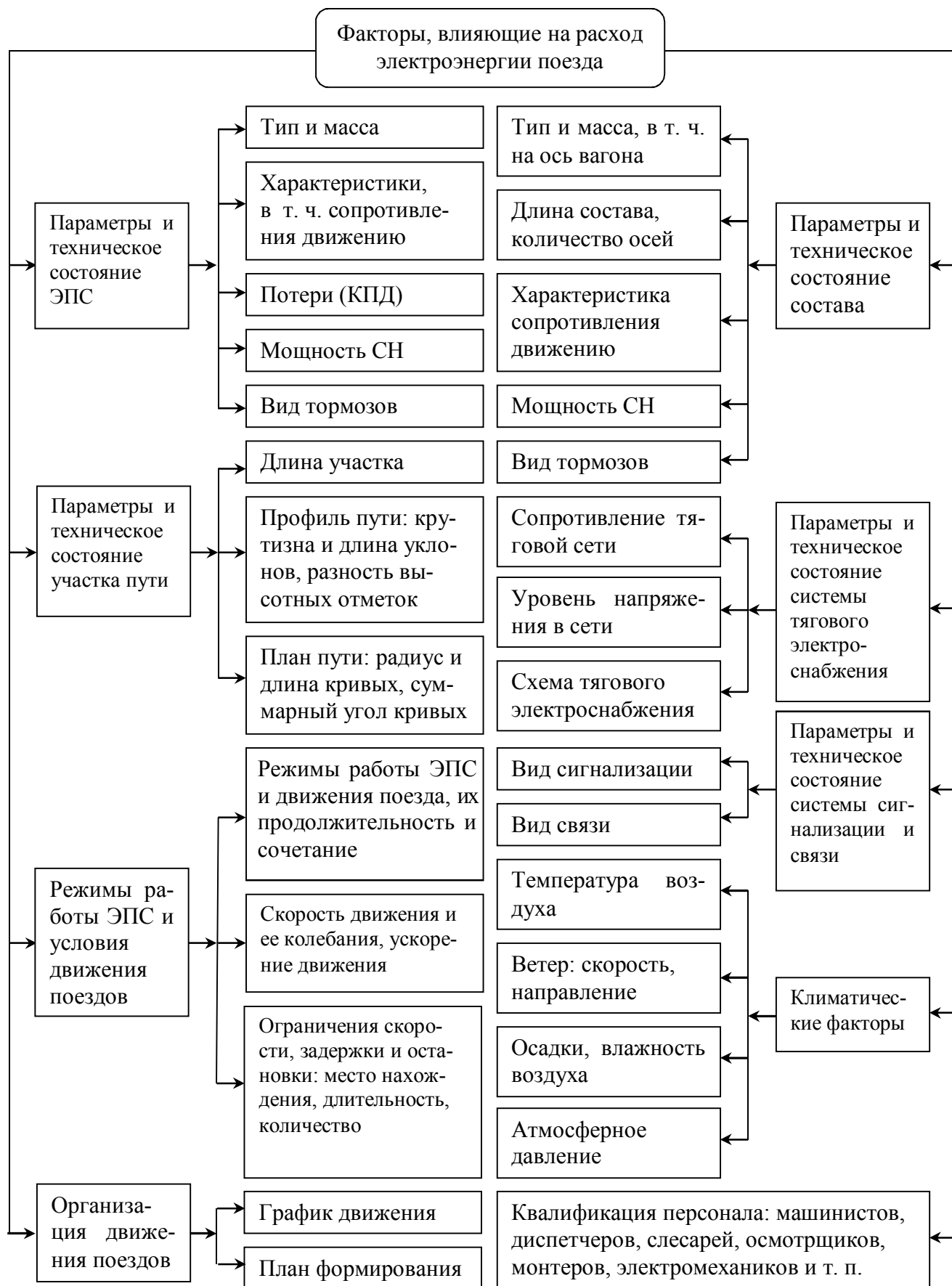


Рисунок 4 – Факторы, влияющие на расход электроэнергии поезда

Наиболее строгая и объективная классификация факторов, влияющих на расход электроэнергии поезда, может быть произведена только на основе энергетического баланса движения поезда, который полностью соответствует закону сохранения и превращения энергии, позволяет систематизировать все влияющие факторы, получить их качественную и количественную оценку.

Разработанная классификация факторов, влияющих на расход электроэнергии поезда, позволяет обосновать правильную методику учета каждого фактора, составлять мероприятия по уменьшению влияния отдельных факторов на энергозатраты, усовершенствовать систему анализа, нормирования и прогнозирования расхода электроэнергии на тягу поездов, грамотно решать другие задачи энергетики электрической тяги.

Список литературы

1. Рациональные режимы вождения поездов и испытания локомотивов / под ред. С. И. Осипова. – Москва : Транспорт, 1984. – 280 с. – Текст : непосредственный.
2. Кирик, Н. В. Энергоэффективные технологии эксплуатации локомотивов / Н. В. Кирик. – Текст : непосредственный // Транспортні системи та технології перевезень: Збірник наукових праць Дніпропетровського нац. ун-ту залізничного трансп. ім. академіка В. Лазаряна. – Дніпропетровськ : Дніпропетровський нац. ун-т залізничного трансп. ім. академіка В. Лазаряна, 2015. – № 10. – С. 44 – 49.
3. Цукало, П. В. Экономия электроэнергии на электроподвижном составе / П. В. Цукало. – Москва : Транспорт, 1983. – 174 с. – Текст : непосредственный.
4. Статистика железнодорожного транспорта : учебник / под ред. А. А. Вовка, А. А. Поликарпова. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2012. – 515 с. – Текст : непосредственный.
5. Котюков, В. И. Многофакторные кусочно-линейные модели / В. И. Котюков. – Москва : Финансы и статистика, 1984. – 216 с. – Текст : непосредственный.
6. Мугинштейн, Л. А. О нормировании и анализе расхода топливно-энергетических ресурсов в депо / Л. А. Мугинштейн, А. В. Лохач. – Текст : непосредственный // Локомотив. – 2002. – № 3. – С. 35 – 37.
7. Современная методология технического нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов локомотивами на тягу поездов / Л. А. Мугинштейн, А. И. Молчанов [и др.]. – Текст : непосредственный // Сборник трудов ученых ОАО «ВНИИЖТ». – Москва : ВМТ-Принт, 2014. – 144 с.
8. Мазнев, А. С. Повышение эффективности электроподвижного состава / А. С. Мазнев, А. М. Евстафьев. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2010. – № 9. – С. 33 – 36.
9. Мельниченко, О. В. Повышение энергетических показателей электровозов / О. В. Мельниченко, Ю. В. Газизов. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2010. – № 3. – С. 50 – 51.
10. Сопов, В. И. Количественная оценка объемов энергии тяги и торможения на основе обработки экспериментальных данных / В. И. Сопов, А. А. Штанг, Е. А. Спиридонов. – Текст : непосредственный // Транспортные системы Сибири : материалы междунар. науч.-техн. конф. – Красноярск : Красноярский гос. техн. ун-т, 2004. – С. 143.
11. Бакланов, А. А. Энергетический баланс движения для решения задач снижения расхода электроэнергии на тягу поездов / А. А. Бакланов. – Текст : непосредственный // Транспорт: наука, техника, управление. – 2005. – № 6. – С. 32 – 35.

References

1. Osipov S. I. *Ratsional'nyye rezhimy vozhdeniya poyezdov i ispytaniya lokomotivov* (Rational train driving and locomotive testing). Moscow: Transport Publ., 1984, 280 p.
2. Kirik N. V. Energy efficient technologies for locomotive operation [Energoeffektivnyye tekhnologii ekspluatatsii lokomotivov]. *Transportnye sistemy i tekhnologii perevozok: Sbornik*

nauchnykh trudov Dnepropetrovskogo nacional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta imeni akademika V. Lazaryana (Transport systems and transport technologies: Collection of scientific papers of the Dnepropetrovsk national University of railway transport named after academician V. Lazaryan). – Dnepropetrovsk, 2015, no. 10, pp. 44 – 49.

3. Tsukalo P. V. *Ekonomiya elektroenergii na elektropodvizhnom sostave* (Saving electricity on electric rolling stock), Moscow: Transport Publ., 1983, 174 p.

4. Vovk A. A., Polikarpov A. A. *Statistika zheleznodorozhnogo transporta: uchebnik* (Railway statistics: textbook). Moscow: Uchebno-metod. tsentr po obrazovaniyu na zh.-d. transp. Publ., 2012, 515 p.

5. Kotyukov V. I. *Mnogofaktornyye kusochno-lineynyye modeli* (Multivariate piecewise linear models). Moscow: Finansy i statistika Publ., 1984, 216 p.

6. Muginshtein L. A., Lokhach A. V. On rationing and analysis of the consumption of fuel and energy resources in the depot [O normirovanii i analize raskhoda toplivno-energeticheskikh resursov v depo]. *Lokomotiv – The Locomotive*, 2002, no. 3, pp. 35 – 37.

7. Muginshtein L. A., Molchanov A. I., Vinogradov S. A., Popov K. M., Shkolnikov E. N. *O normirovanii i analize raskhoda toplivno-energeticheskikh resursov v depo: sbornik trudov uchenykh OAO «VNIIZHT»* (Modern methodology of technical regulation of fuel and energy resources consumption by locomotives for train traction: collection of works of scientists of JSC «VNIIZHT»). Moscow: VMT-Print Publ., 2014, 144 p.

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

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

10. Sopov V. I., Shtang A. A., Spiridonov E. A. Quantification of traction and braking energy volumes based on experimental data processing [Kolichestvennaya otsenka ob'yemov energii tyagi i tormozheniya na osnove obrabotki eksperimental'nykh dannykh]. *Materialy II mezhdunarodnoy nauch.-tekhn. konf. «Transportnyye sistemy Sibiri»* (Materials of the second international scientific and technical conf. «Transport systems of Siberia»). – Krasnoyarsk: KSTU Publ., 2004, p. 143.

11. Baklanov A. A. Energy balance of movement to solve problems of reducing electricity consumption for traction of trains [Energeticheskiy balans dvizheniya dlya resheniya zadach snizheniya raskhoda elektroenergii na tyagu poyezdov]. *Transport: nauka, tekhnika, upravleniye – The Transport: science, technology, management*, 2005, no. 6, pp. 32 – 35.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бакланов Александр Алексеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-34-19.

E-mail: aleksbakl@mail.ru

Шияков Андрей Петрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-34-19.

E-mail: doc135@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Baklanov Alexandr Alexeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Rolling stock of electric Railways», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-34-19.

E-mail: aleksbakl@mail.ru

Shilyakov Andrey Petrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Rolling stock of electric Railways», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-34-19.

E-mail: doc135@mail.ru

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Раздобаров Алексей Васильевич

Омский государственный университет путей
сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Фе-
дерация.

Старший преподаватель кафедры «Подвижной
состав электрических железных дорог», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-34-19.

E-mail: RazdobarovAV@omgups.ru

Razdobarov Aleksey Vasilevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Senior lecturer of the department «Rolling stock of
electric railways», OSTU.

Phone: (3812) 31-34-19.

E-mail: RazdobarovAV@omgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Бакланов, А. А. Принципы классификации влияю-
щих факторов на расход энергии электроподвижным
составом / А. А. Бакланов, А. П. Шилияков, А. В. Раздоба-
ров. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. –
2020. – № 4 (44). – С. 65 – 75.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Baklanov A. A., Shilyakov A. P., Razdobarov A. V.
Principles of classification of influencing factors on the
energy consumption of electric rolling stock. Journal of
Transsib Railway Studies, 2020, no. 4 (44), pp. 65 – 75
(In Russian).

УДК 629.4-592

Ю. В. Кривошея, Д. С. Кривошея

Донецкий институт железнодорожного транспорта (ДонИЖТ), г. Донецк, Донецкая Народная Республика

КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ ПОКОЯ ДИСКОВОГО ТОРМОЗА

Аннотация. Статья посвящена экспериментальному исследованию силового взаимодействия рабочих элементов дискового тормоза с целью установления зависимости коэффициента трения покоя, принятого в качестве критерия потенциальных фрикционных свойств узла трения, от силы прижатия тормозных накладок к тормозному диску и коэффициента взаимного перекрытия. Эксперименты выполнены на натурном стенде, основой которого являются электрический привод мощностью 75,0 кВт и натуральный дисковый тормоз трамвая ЛТ-10. Стенд позволяет осуществлять замеры силы трения покоя в условиях реальных сил, давлений, геометрии области контакта, а также коэффициента взаимного перекрытия. В качестве фрикционных материалов для тормозных накладок взяты TR119 и УТ22-В, у первого из которых согласно заявленным производителем характеристикам коэффициент трения снижается с ростом температуры, у второго – растет. Данные материалы при проведении экспериментов работали в паре трения с материалом сталь 35, из которого изготовлен тормозной диск. Результаты экспериментов обработаны с помощью методов математической статистики и представлены в графической форме. Показано, что в диапазоне нагрузок, реализуемых при торможении, напряженно-деформированное состояние области контакта рабочих элементов дискового тормоза по критерию микродеформаций соответствует ненасыщенному упругому контакту. Этот вид контакта характерен для исследуемых коэффициентов взаимного перекрытия (0,33; 0,66; 0,98). Установлено, что с ростом силы прижатия тормозных накладок к тормозному диску коэффициент трения покоя имеет тенденцию к снижению, а с ростом коэффициента взаимного перекрытия наблюдается увеличение коэффициента трения покоя для всех заданных величин усилия прижатия. При этом для материала УТ22-В характерны более низкие значения коэффициента трения покоя по сравнению с материалом TR119. Область применения результатов: разработка и проектирование перспективных конструкций дисковых тормозов.

Ключевые слова: торможение, коэффициент трения покоя, коэффициент взаимного перекрытия, упругий ненасыщенный контакт.

Yuriy V. Krivosheya, Darya S. Krivosheya

Donetsk Institute of Railway Transport (DRTI), Donetsk, Donetsk People's Republic

DISC BRAKE STATIC FRICTION COEFFICIENT

Abstract. The article is devoted to the experimental study of the force interaction of the working elements of a disc brake in order to establish the dependence of the coefficient of static friction, taken as a criterion for the potential frictional properties of the friction unit, on the pressing force of the brake linings to the brake disc and the coefficient of mutual overlap. The experiments were performed on a full-scale stand, the basis of which is an electric drive with a

power of 75.0 kW and a full-scale disc brake of the LT-10 tram. The stand allows to measure the static friction force under conditions of real forces, pressures, geometry of the contact area, as well as the coefficient of mutual overlap. TR119 and UT22-B were taken as friction materials for brake linings, in the first of which, according to the characteristics declared by the manufacturer, the coefficient of friction decreases with increasing temperature, in the second it increases. During the experiments, these materials worked in a pair of friction with the material steel 35, from which the brake disc is made. The experimental results were processed using the methods of mathematical statistics and presented in graphical form. It is shown that in the range of loads realized during braking, the stress-strain state of the contact area of the working elements of the disc brake according to the criterion of microstrains corresponds to an unsaturated elastic contact. This type of contact is typical for the studied overlap coefficients (0,33; 0,66; 0,98). It was found that with an increase in the pressing force of the brake linings to the brake disc, the static friction coefficient tends to decrease, and with an increase in the overlap coefficient, an increase in the static friction coefficient is observed for all specified values of the pressing force. At the same time, the UT22-V material is characterized by lower values of the coefficient of static friction compared to the TR119 material. Field of application of the results: development and design of advanced designs of disc brakes.

Keywords: braking, coefficient of static friction, coefficient of mutual overlap, elastic unsaturated contact.

Торможение подвижного состава реализуется в условиях, когда прижатие тормозных колодок к тормозному диску дискового тормоза осуществляется в широком диапазоне сил и скоростей относительного перемещения элементов трения [1 – 4]. В процессе торможения характеристики трения дискового тормоза изменяются в зависимости от фрикционных свойств рабочих элементов дискового тормоза, интенсивности действия нагрузочно-скоростных факторов, а также от уровня генерируемой при торможении тепловой энергии [5 – 8].

Характеристикой уровня тепловой энергии является температура, которая зависит от количества подведенной к дисковому тормозу механической энергии, физико-механических и теплотехнических свойств материалов элементов трения и эффективности диссипации энергии в окружающую среду [7, 8]. В связи с этим коэффициент трения покоя дискового тормоза, который по определению не учитывает влияние температуры, можно рассматривать как характеристику потенциальных фрикционных свойств дискового тормоза, предопределяющих интенсивность реализации процесса торможения [5, 6].

Рассмотрим результаты экспериментального исследования зависимости коэффициента трения покоя, который характеризует потенциальные фрикционные свойства дискового тормоза, от силы прижатия тормозных накладок к тормозному диску и коэффициента взаимного перекрытия.

Известно [5, 6], что напряженно-деформированное состояние области контакта элементов трения можно классифицировать по критерию микродеформаций в области контакта. Согласно этому критерию представляется возможным идентифицировать напряженно-деформированное состояние элементов трения по трем видам контакта:

- упругий контакт (ненасыщенный и насыщенный);
- пластический контакт (ненасыщенный и насыщенный);
- контакт, при котором проявляется интерференция деформаций микронеровностей.

В зависимости от вида контакта изменяются характеристики трения. На рисунке 1 представлена классическая закономерность изменения коэффициента трения в зависимости от контурных давлений [5], которые являются прямым следствием влияния уровня нормальной нагрузки прижатия тормозной накладки к тормозному диску. Зона 1 относится к упругому контакту (ненасыщенному и насыщенному), зона 2 – к пластическому контакту (ненасыщенному и насыщенному), зона 3 – к контакту, при котором проявляется интерференция деформаций микронеровностей.

Зависимость, представленная на рисунке 1, проходит через минимум, соответствующий точке перехода преимущественно упругих деформаций в преимущественно пластические деформации микронеровностей. Максимум коэффициента трения покоя соответствует точке, в которой начинает проявляться влияние интерференций деформаций микронеровностей.

В данной работе соответствие виду контакта элементов дискового тормоза при их силовом взаимодействии установлено на основании экспериментального исследования. Эксперименты выполнены на натурном стенде [9, 10], представленном на рисунке 2. Стенд позволяет

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

осуществлять замеры силы трения покоя в условиях реальных сил, давлений и геометрии области контакта, а также коэффициента взаимного перекрытия $K_{в.п.}$.

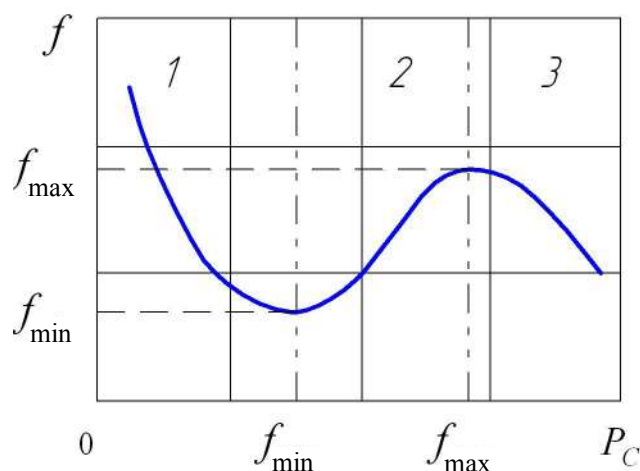


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента трения f от контурных давления P_c в области контакта

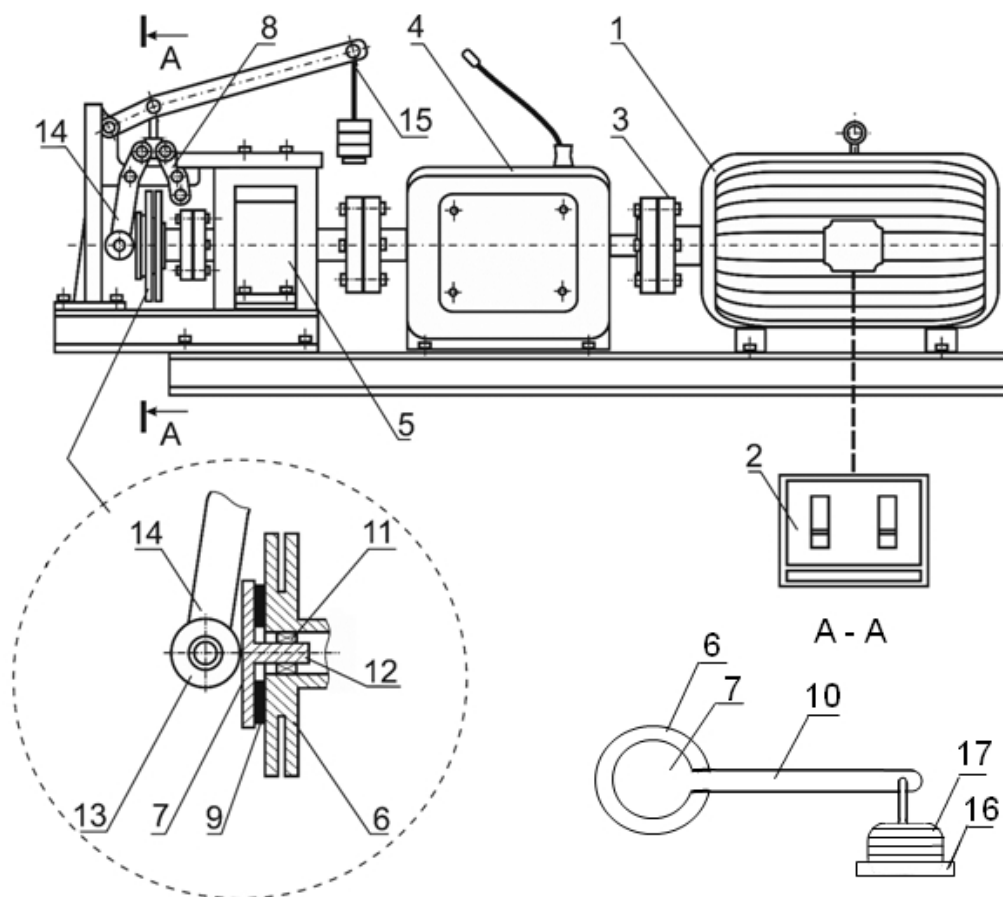


Рисунок 2 – Стенд для исследования коэффициента трения дискового тормоза:

- 1 – асинхронный электродвигатель; 2 – блок управления; 3 – упругая муфта; 4 – коробка передач;
5 – подшипниковый узел; 6 – тормозной диск; 7 – тормозная колодка; 8 – упор; 9 – тормозные накладки;
10 – кронштейн; 11 – подшипник; 12 – вал; 13 – подшипник; 14 – рычаг; 15 – механизм нагружения тормозной колодки; 16 – платформа; 17 – груз

Исходные параметры проведения экспериментов сведены в таблицу. Для повышения уровня обобщения результатов исследования в качестве исходных фрикционных материалов для тормозной накладки взяты материалы TR119 и УТ22-В, первому из которых характерно

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

снижение коэффициента трения покоя f под влиянием температуры, второму – повышение коэффициента трения покоя f под влиянием температуры [7, 11].

Исходные параметры экспериментов

Параметр	Количественная оценка
Коэффициент взаимного перекрытия $K_{в.п}$	0,33; 0,66; 0,98
Сила прижатия тормозных накладок F , кН	1,5; 2,0; 2,5; 3,0
Материал тормозных накладок	TR119; УТ22-В (углерод-углеродный композит)
Материал тормозного диска	Сталь 35

При проведении экспериментов контролировались следующие характеристики:

- коэффициент взаимного перекрытия $K_{в.п}$;
- тангенциальная сила нагружения рабочих элементов дискового тормоза;
- нормальная сила F прижатия тормозных накладок к тормозному диску.

Эксперименты выполнены в соответствии со следующим алгоритмом:

- устанавливалась тормозная колодка 7 с заданным коэффициентом $K_{в.п}$;
- тормозной диск 6 механически фиксировался с целью недопущения его поворота;
- создавалось заданное нормальное усилие F прижатия тормозных накладок к тормозному диску за счет механизма нагружения 15;
- осуществлялось постепенное пошаговое механическое нагружение рычага 14;
- нагружение продолжалось до момента перехода трения покоя в режим трения скольжения;
- рассчитывался коэффициент трения покоя.

По результатам замеров выполнено графическое построение зависимостей коэффициента трения покоя f от нормальной силы F прижатия тормозной накладки 9 к тормозному диску 6. Результаты экспериментов представлены на рисунках 3 и 4.

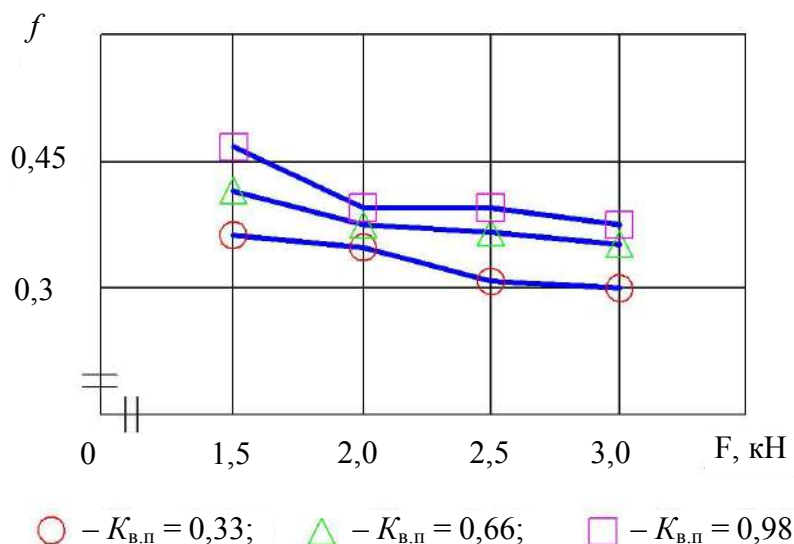


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента трения покоя f от силы прижатия F тормозной колодки к тормозному диску для пары трения TR119 – сталь 35

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

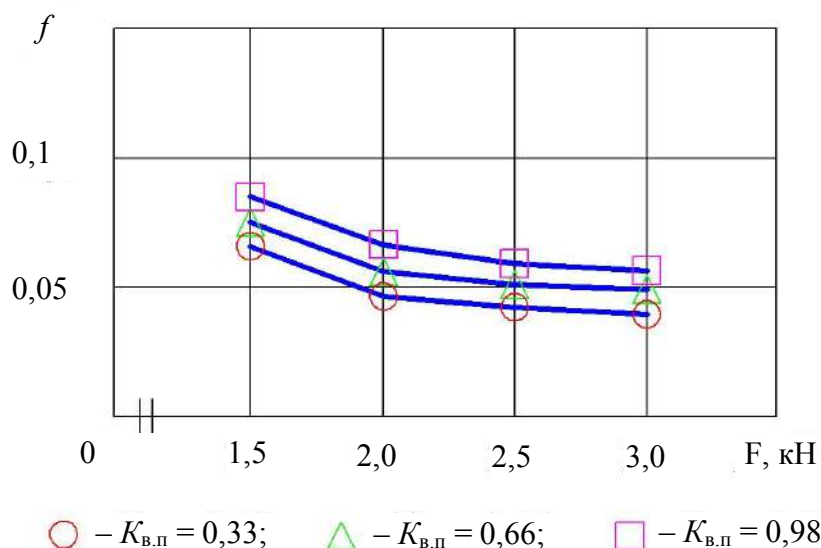


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента трения покоя f от силы прижатия F тормозной колодки к тормозному диску для пары трения УТ22-В – сталь 35

Как следует из приведенных результатов, снижение коэффициента трения покоя во всем диапазоне реализуемых сил прижатия F однозначно указывает на то, что напряженно-деформированное состояние рабочих элементов дискового тормоза при силовом взаимодействии соответствует упругому контакту. Эта закономерность наблюдается для пар трения TR119 – сталь 35 и УТ22-В – сталь 35.

С ростом коэффициента взаимного перекрытия $K_{в.п}$ при прочих равных условиях наблюдается увеличение коэффициента трения покоя, что вероятнее всего объясняется снижением давления в области контакта тормозной накладки и тормозного диска.

На основании изложенного можно сделать выводы.

1. В диапазоне реальных нагрузок, реализуемых при торможении в области контакта тормозной накладки с тормозным диском, напряженно-деформированное состояние контакта по критерию микродеформаций в контакте соответствует упругому контакту.

2. С ростом силы нормального прижатия тормозной накладки к тормозному диску коэффициент трения покоя имеет тенденцию к снижению, а с ростом коэффициента взаимного перекрытия $K_{в.п}$ – тенденцию к увеличению. Отмеченные закономерности наблюдаются для пар трения TR119 – сталь 35 и УТ22-В – сталь 35.

Список литературы

1. Иноземцев, В. Г. Тормоза железнодорожного подвижного состава. Вопросы и ответы / В. Г. Иноземцев. – Москва : Транспорт, 1986. – 283 с. – Текст : непосредственный.
2. Асадченко, В. Р. Автоматические тормоза подвижного состава / В. Р. Асадченко. – Москва : Маршрут, 2006. – 392 с. – Текст : непосредственный.
3. Ehlers H.-R. Potential and limits of opportunities of the block brake. *Glaser's Annalen*, 2002, no. 6/7, pp. 290 – 300.
4. Моисеенко, М. А. Анализ нагруженности деталей дискового тормоза скоростного вагона / М. А. Моисеенко // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 2. – Текст : электронный. – URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=5906> (дата обращения: 21.04.2020).
5. Крагельский, И. В. Узлы трения машин : справочник / И. В. Крагельский, Н. М. Михин. – Москва : Машиностроение, 1984. – 280 с. – Текст : непосредственный.

6. Справочник по триботехнике / под общ. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. В 3 т. – Т. 1. Теоретические основы. – Москва : Машиностроение, 1989. – 400 с. – Текст : непосредственный.
7. Фрикционные материалы на базе углерод-углеродных и углерод-асбестовых волокон для тормозных устройств / В. Н. Старченко, В. А. Гурин [и др.]. – Текст : непосредственный // Железные дороги мира. – 2006. – № 2. – С. 38 – 42.
8. Чичинадзе, А. В. Расчет и исследование внешнего трения при торможении / А. В. Чичинадзе. – Москва : Наука, 1967. – 231 с. – Текст : непосредственный.
9. Стенд для исследования характеристик взаимодействия элементов трения дискового тормоза / Ю. В. Кривошея, В. В. Бугаенко [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник РГУПС. – 2020. – № 1 (77). – С. 83 – 88.
10. Патент № 144107 Украина, МПК G01L 5/28. Стенд для исследования взаимодействия рабочих элементов дискового тормоза подвижного состава : № u 2019 10169; заявлено 03.10.2019 : опубликовано 10.09.2020 / Кривошея Ю. В., Бугаенко В. В., Осенин Ю. И., Антошкина Л. И., Шапран Е. Н. – 5 с.: ил. – Текст : непосредственный.
11. Вуколов, Л. А. Сравнительные характеристики тормозных колодок различных поставщиков / Л. А. Вуколов, В. А. Жаров. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТа. – 2005. – № 2. – С. 16 – 20.

References

1. Inozemtsev V. G. *Tormoza zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Voprosy i otvety* (Railway rolling stock brakes. Questions and answers). Moscow: Transport Publ., 1986, 283 p.
2. Asadchenko V. R. *Avtomaticheskie tormoza podvizhnogo sostava* (Automatic rolling stock brakes). Moscow: Marshrut Publ., 2006, 392 p.
3. Ehlers H.-R. et al. Potential and limits of opportunities of the block brake. *Glaser's Annalen*, 2002, no. 6/7, pp. 290 – 300.
4. Moiseenko M. A., Moiseenko M. A. Analysis of loading of high-speed car disk brake parts [Analiz nagruzhennosti detalej diskovogo tormoza skorostnogo vagona]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia – Modern problems of science and education*, 2012, no. 2, Available at: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=5906> (accessed 21 April 2020).
5. Kragelsky I. V., Mikhlin N. M. *Uzly treniya mashin* (Friction units of machines). Moscow: Mashinostroenie Publ., 1984, 280 p.
6. *Spravochnik po tribotekhnike* (Handbook of tribotechnics). Ed. M. Hebby, A. V. Chichinadze. Moscow: Mashinostroenie Publ., vol. 1, 1989, 400 p.
7. Starchenko V. N., Gurin V. A., Bykadorov V. P., Shapran E. N. Friction materials based on carbon-carbon and carbon-asbestos fibers for braking devices [Friksionnye materialy na baze uglerod-uglerodnyh i uglerod-asbestovyh volokon dlja tormoznyh ustrojstv]. *Zheleznye dorogi mira – Railways of the world*, 2006, no. 2, pp. 38 – 42.
8. Chichinadze A. V. *Raschet i issledovanie vneshnego trenija pri tormozhenii* (Calculation and study of external friction during braking). Moscow: Nauka Publ., 1967, 231 p.
9. Krivosheya Yu. V., Bugaenko V. V., Sosnov I. I., Malakhov O. V., Malakhova V. V. Stand for studying the characteristics of interaction of friction elements of a disc brake [Stend dlya issledovaniya harakteristik vzaimodejstviya elementov treniya diskovogo tormoza]. *Vestnik RGUPS – Bulletin of RGUPS*, 2020, no.1 (77), pp. 83 – 88.
10. Krivosheya Y.V., Bugaenko V.V., Osenin Y.I., Antoshkina L.I., Shapran E.N. *Patent. 144107 Ukraine*, № u 2019 10169, 10.09.2020.
11. Vukolov L. A., Zharov V. A. Comparative characteristics of brake pads from different suppliers [Sravnitel'nye harakteristiki tormoznyh kolodok razlichnyh postavschikov]. *Vestnik VNIIZhTa – Bulletin of VNIIZhT*, 2005, no. 2, pp. 16 – 20.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кривошея Юрий Владимирович

Донецкий институт железнодорожного транспорта (ДонИЖТ).

Горная ул., д. 6, г. Донецк, 283018, Донецкая Народная Республика.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог», ДонИЖТ.

Тел.: +38 (071) 333-19-37.

E-mail: krivosheya.drtdi@yandex.ru

Кривошея Дарья Сергеевна

Донецкий институт железнодорожного транспорта (ДонИЖТ).

Горная ул., д. 6, г. Донецк, 283018, Донецкая Народная Республика.

Старший преподаватель кафедры «Подвижной состав железных дорог», ДонИЖТ.

Тел.: +38 (071) 333-19-35.

E-mail: krivosheya.drtdi@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Кривошея, Ю. В. Коэффициент трения покоя дискового тормоза / Ю. В. Кривошея, Д. С. Кривошея. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 4 (44). – С. 75 – 81.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Krivosheya Yuriy Vladimirovich

Donetsk Railway Transport Institute (DRTI).

6, Gornaya st., Donetsk, 283018, Donetsk People's Republic.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Rolling stock of railways», DRTI.

Phone: +38 (071) 333-19-37.

E-mail: krivosheya.drtdi@yandex.ru

Krivosheya Darya Sergeevna

Donetsk Railway Transport Institute (DRTI).

6, Gornaya st., Donetsk, 283018, Donetsk People's Republic.

Senior Lecturer of the department «Rolling stock of railways», DRTI.

Phone: +38 (071) 333-19-35.

E-mail: krivosheya.drtdi@yandex.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Krivosheya Y. V., Krivosheya D. S. Disc brake static friction coefficient. Journal of Transsib Railway Studies, 2020, no. 4 (44), pp. 75 – 81 (In Russian).

УДК 629.4.053.3

О. Е. Пудовиков, Н. О. Жухин

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

НОВЫЕ ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ ДЛИННОСОСТАВНЫХ ПОЕЗДОВ

Аннотация. Один из способов повышения пропускной и провозной способности железных дорог – применение длинносоставных грузовых поездов с системой распределенной тяги. С целью снижения влияния человеческого фактора на локомотивах таких поездов целесообразно применение систем автоматического управления скоростью движения, учитывающих переходные процессы, протекающие в поезде. Определение продольных сил, возникающих в поезде, может осуществляться путем использования либо эталонной математической модели поезда, либо заранее рассчитанных зависимостей этих сил от параметров движения поезда. Второй способ позволяет упростить структуру и повысить быстродействие систем автоматического управления.

Ключевые слова: длинносоставный поезд, математическая модель поезда, показатели качества управления, система автоматического управления скоростью, система распределенной тяги.

Oleg E. Pudovikov, Nikita O. Zhukhin

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

NEW APPROACHES TO THE DEVELOPMENT OF AUTOMATIC SPEED CONTROL SYSTEMS FOR LONG-DISTANCE TRAINS

Abstract. One of the ways to increase the capacity of railways is to use long-distance freight trains with a distributed traction system. In order to reduce the influence of the human factor, it is advisable to use automatic speed control

systems on the locomotives of such trains, that take into account the transients occurring in the train. Determination of the longitudinal forces that occur in the train can be carried out by using either a reference mathematical model of the train, or pre-calculated dependencies of these forces on the parameters of the train movement. The second method allows you to simplify the structure and improve the performance of automatic control systems.

Keywords: long-distance train, mathematical model of the train, control quality indicators, automatic speed control system, distributed traction system.

В том случае, когда отдельные участки железных дорог приближаются к пределу пропускной и провозной способности, происходит снижение средней скорости движения поездов, повышение времени доставки грузов и оборота вагонов.

Повышение пропускной либо провозной способности железных дорог осуществляют различными способами. Так, повысить провозную способность участка можно за счет применения грузовых поездов повышенной массы и длины с использованием системы распределенной тяги (РТ). В отличие от сосредоточенной тяги, когда локомотив располагается в голове поезда, при использовании распределенной тяги применяют несколько локомотивов, распределенных по длине поезда.

Система РТ позволяет повысить массу и длину грузовых поездов. В то же время она предъявляет дополнительные требования по формированию поезда и управлению им. При невыполнении этих требований могут возникать различные негативные последствия: от усиленного износа механической части подвижного состава до разрывов поездов или схода вагонов с рельсов. Существенное влияние на безопасность движения оказывают ошибочные или нерациональные действия локомотивной бригады по управлению тяговыми и тормозными средствами локомотива и состава. Снизить влияние человеческого фактора, а следовательно, повысить безопасность движения поездов позволяет применение систем автоматического ведения поездов (САВП), внешним контуром которых является контур регулирования времени хода, а внутренним – система автоматического управления (САУ) скоростью. Также находят применение системы автоматического управления несколькими локомотивами, распределенными по поезду; взаимодействие между локомотивами осуществляется с применением средств технологической радиосвязи.

В настоящее время разработаны различные системы управления локомотивами поездов, в том числе с распределенной тягой [1 – 4]. В частности, одна из систем учитывает особенности протекания переходных процессов, возникающих в длинносоставных поездах [4]. При этом исходными данными являются параметры поезда (в том числе вес и число вагонов) и параметры его движения (например, фактическая скорость).

Данная САУ использует эталонную модель поезда – его дискретную многомассовую модель [5]. Уравнение движения каждого экипажа поезда представляет собой следующую систему уравнений (1):

$$\begin{cases} \dot{v}_i = \frac{S_{i+1} - S_i + F_i}{m_i}, & i = \overline{1, n}; S_{n+1} = 0; \\ \dot{q}_i = v_{i-1} - v_i, & i = \overline{2, n}; \\ \dot{x}_1 = v_1 = -q_1, \end{cases} \quad (1)$$

где v_i – скорость центра масс i -го экипажа; S_i – продольная сила в i -й межвагонной связи; F_i – результирующая внешняя сила, действующая на i -й экипаж; m_i – масса i -го экипажа; n – число экипажей в поезде; q_i – деформация i -го межвагонного соединения; $\dot{q}_i$ – скорость деформации i -го межвагонного соединения.

Модели межвагонных связей учитывают наличие автосцепок и зазоров в них, кроме этого при выполнении расчетов сделано допущение, что все вагоны и локомотивы поезда оборудованы поглощающими аппаратами типа ШТМ. Характеристики межвагонных связей представлены на рисунке 1, соответствующие им уравнения приведены в работе [5]. На рисунке 1 приняты следующие обозначения: S_ϕ – фактическая величина продольной силы в

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

межвагонной связи; s_0 – сила затяжки поглощающего аппарата; Δ – деформация, при которой закрываются поглощающие аппараты; q_Φ – деформация межвагонной связи; q – перемещение центров масс соседних экипажей относительно друг друга; δ_0 – зазор в межвагонной связи.

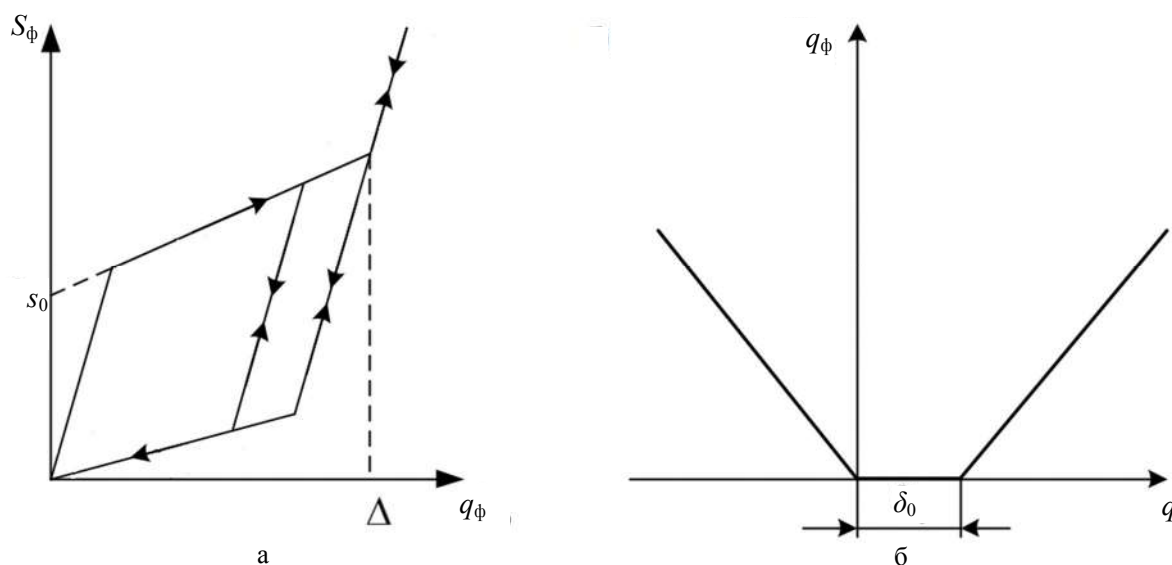


Рисунок 1 – Графики зависимостей продольной силы от деформации межвагонной связи (а) и деформации межвагонной связи от перемещения центров масс соседних экипажей относительно друг друга (б)

Используя модель, представленную на рисунке 1, в САУ рассчитывают величины продольных динамических и квазистатических сил, возникающих в поезде в процессе движения по заданному участку пути. При оценке качества управления САУ использованы как традиционные критерии, известные из теории автоматического управления, так и специфические, характеризующие объект управления (поезд) в различных режимах движения [6]. К последним относятся максимальная величина продольной динамической силы, сумма усталостных повреждений, накопленных в упряжных приборах поезда и минимальная величина коэффициента запаса устойчивости вагонов против схода с рельсов.

Величина последнего определяется согласно методике, приведенной в источнике [7], по формуле:

$$k_{yI,II} = \frac{\operatorname{tg} \beta - \mu}{1 + \mu \operatorname{tg} \beta} \times$$

$$\left(P_T + \frac{F}{1 - \frac{F}{F_{\text{кpa}}}} \left[\frac{\delta L}{l^2} \left(1 + \frac{L}{a} \right) \frac{h_{\text{п}}}{h_{\text{ц}}} \pm \alpha \frac{L_{\text{с}}}{R} \right] \frac{h_{\text{ц}}}{s} \right) \times$$

$$\frac{\mu P_T + \frac{2F}{1 - \frac{F}{F_{\text{кpa}}}} \left\{ \left[\frac{\delta L}{l^2} \left(1 + \frac{L}{a} \right) \frac{h_{\text{п}}}{h_{\text{ц}}} \pm \alpha \frac{L_{\text{с}}}{R} \right] \left(1 - \mu \frac{h_{\text{ц}}}{s} \right) \mp \alpha \frac{L_{\text{с}} (h_{\text{п}} - h_{\text{ц}})}{2sR} \right\}}{1 - \frac{F}{F_{\text{кpa}}}},$$

где $k_{yI,II}$ – коэффициент устойчивости против схода с рельсов для двух положений экипажа; β – угол между образующей гребня колеса и рельсом; μ – коэффициент трения колеса о рельс; P_T – вертикальная нагрузка от тележки на рельсы; F – сила, сжимающая вагон; $F_{\text{кpa}}$ – критическое значение сжимающей силы; δ – начальный перекоз вагона в рельсовой колее; L – половина длины вагона (по упорным плитам автосцепок); l – половина базы вагона; a – длина корпуса автосцепки; $h_{\text{п}}$ – высота плоскости подпятника над уровнем головок рельсов; $h_{\text{ц}}$ – высота центра тяжести вагона над уровнем головок рельсов; α – угол перекоза ваго-

на; L_c – половина длины вагона (по осям сцепления автосцепок); R – радиус кривой пути; s – половина ширины рельсовой колеи.

Согласно источникам [7, 8], если экипаж находится в кривом участке пути, при действии продольных сжимающих сил возможно вкатывание колеса экипажа на наружный или на внутренний рельс. Поэтому для кривых участков пути осуществляется расчет двух коэффициентов устойчивости экипажа – для вкатывания колеса как на наружный, так и на внутренний рельс. Из двух полученных значений коэффициента устойчивости против схода с рельсов выбирают минимальное как менее предпочтительное.

Соблюдение показателей качества, характеризующих протекание переходных процессов в поезде (величина продольной динамической силы, величина суммы накопленных усталостных повреждений в автосцепных приборах поезда), обеспечивается выбором структуры системы автоматического управления скоростью [6] и параметров закона управления и элементов такой САУ. Эти параметры получают, решая задачу параметрического синтеза САУ [9]. Соблюдение требований к величине показателя качества, характеризующего медленно меняющиеся квазистатические процессы (величина коэффициента запаса устойчивости против схода), обеспечивается коррекцией задания скорости и ускорения ведомого локомотива. Эта коррекция осуществляется на основе информации о величинах продольных сил, действующих в поезде и полученных с использованием эталонной модели поезда, находящейся в САУ.

Использованный в работе [4] способ определения продольных сил является достаточно затратным с точки зрения применения вычислительных ресурсов, так как требует решения в режиме реального времени системы из n нелинейных алгебраических и дифференциальных уравнений второго порядка, где n – число экипажей в поезде.

Вместе с этим возможен другой способ определения возникающих в поезде продольных квазистатических сил, позволяющий оценить их величины без использования дискретной модели поезда. Как известно, в установившемся режиме движения величины продольных сил, возникающих в межвагонных соединениях, зависят от величин равнодействующих всех сил, действующих на соседние экипажи. При известных значениях силы тяги локомотива, сил сопротивления движению экипажей, масс и ускорений каждого экипажа в данный момент времени легко определить значения продольных сил, возникающих в автосцепках поезда. Так, в общем случае, величина продольной силы в автосцепке за локомотивом в режиме тяги представляет собой величину силы тяги локомотива за вычетом той доли силы тяги, которая затрачивается на ускорение локомотива и на преодоление силы сопротивления движению локомотива. Соответственно в квазиустановившемся режиме движения величину продольной силы в автосцепке за любым экипажем поезда можно определить, зная значение продольной силы в автосцепке перед этим экипажем, значение силы сопротивления движению и вес данного экипажа, а также среднее значение ускорения экипажей поезда в данный момент времени.

При расчете продольных сил в межвагонных связях этим способом на первом этапе определяют сопротивление движению каждого экипажа в текущий момент времени:

$$W_i = m_i(w_{oi} + w_i); \quad (3)$$

где W_i – полное сопротивление движению i -го экипажа; w_{oi} – основное удельное сопротивление движению i -го экипажа; w_i – дополнительное удельное сопротивление движению i -го экипажа.

Основное удельное сопротивление движению экипажа зависит от его типа (локомотив либо вагон), а для локомотива – и от режима движения (тяга либо выбег). Согласно Правилам [10] для локомотива в режиме тяги и вагона составляющие w'_{oi} и w''_{oi} основного удельного сопротивления движению экипажа определяют по формулам:

$$w'_{oi} = a_1 + b_1 v_i + c_1 v_i^2; \quad (4)$$

$$w''_{oi} = a_2 + \frac{b_2 + c_2 v_i + d_1 v_i^2}{q_i}, \quad (5)$$

где a, b, c, d – коэффициенты, зависящие от типа подвижного состава, пути и режима движения; q_i – нагрузка на ось i -го экипажа.

В качестве дополнительного сопротивления движению экипажей рассматривается сопротивление движению от уклона и от кривых участков пути. Оно определяется по формулам, приведенным в Правилах [10], для каждого экипажа в каждый момент времени в зависимости от расположения локомотивов и вагонов поезда на плане и профиле пути.

Зная силу тяги локомотива, силу сопротивления движения для каждого экипажа и вес поезда, определим среднее значение ускорения экипажей поезда в данный момент времени:

$$a_{\text{ср}} = \frac{F_k + \sum W_i}{P(1 + \gamma_{\text{л}}) + \sum Q_i(1 + \gamma_{\text{в}})}, \quad (6)$$

где $a_{\text{ср}}$ – среднее значение ускорения экипажей поезда; F_k – сила тяги локомотива; $\sum W_i$ – полное сопротивление движению всех экипажей; P – вес локомотива; $\sum Q_i$ – вес состава; $\gamma_{\text{л}}$ и $\gamma_{\text{в}}$ – коэффициенты инерции вращающихся частей локомотива и вагона.

Используя значение среднего ускорения, определим расчетные значения продольных сил S_p в межвагонных связях поезда. Для связи между локомотивом и первым вагоном расчетная продольная сила определяется по формуле:

$$S_{p1} = F_k - W_1 - a_{\text{ср}} P(1 + \gamma_{\text{л}}), \quad (7)$$

где W_1 – полное сопротивление движению локомотива.

Для связи между вагонами с номерами i и $i - 1$ расчетная продольная сила определяется по уравнению:

$$S_{pi} = S_{pi-1} - W_1 - a_{\text{ср}} Q(1 + \gamma_{\text{в}}), \quad (8)$$

где W_1 – полное сопротивление движению локомотива; S_{pi-1} – расчетное значение продольной силы в предыдущей межвагонной связи; Q – вес вагона.

Этот способ позволяет достаточно точно оценить величины продольных сил, когда их изменение носит квазистатический характер. Он подходит, в частности, для определения величины коэффициента устойчивости против схода с рельсов. В то же время этот способ не позволяет определять продольные динамические силы, возникающие в переходных режимах движения поезда.

При применении в качестве прототипа системы автоматического управления скоростью движения с распределенной тягой, использующей эталонную модель поезда [5], разработана САУ, реализующая предлагаемый способ вычисления продольных сил, функциональная схема которой приведена на рисунке 2.

Схема содержит в себе следующие элементы: вышестоящую систему автоведения АВ, задатчик скорости Z_v контроллера машиниста, элемент ИЛИ-min1, выбирающий минимальное из двух значений заданной скорости, задатчик параметров поезда ЗПП, электронную карту пути и профиля ЭК; модуль адаптации А, определяющий параметры закона управления; промежуточное устройство ПУ4, осуществляющее расчет величин продольных сил, возникающих в поезде в соответствии с предложенной методикой. На основе этих величин промежуточное устройство ПУ1 рассчитывает величины коэффициентов устойчивости всех экипажей против схода с рельсов. При снижении данного показателя качества ниже допус-

тимого значения ПУ1 осуществляет коррекцию заданной скорости либо заданного ускорения ведущего или ведомого локомотива. Промежуточное устройство ПУ2 обеспечивает сглаживание скачкообразно изменяющегося входного сигнала, промежуточное устройство ПУ3 реализует пропорционально-интегральный закон управления скоростью движения на основании информации о рассогласовании заданной и фактической скоростей, которое вычисляется устройством сравнения УС.

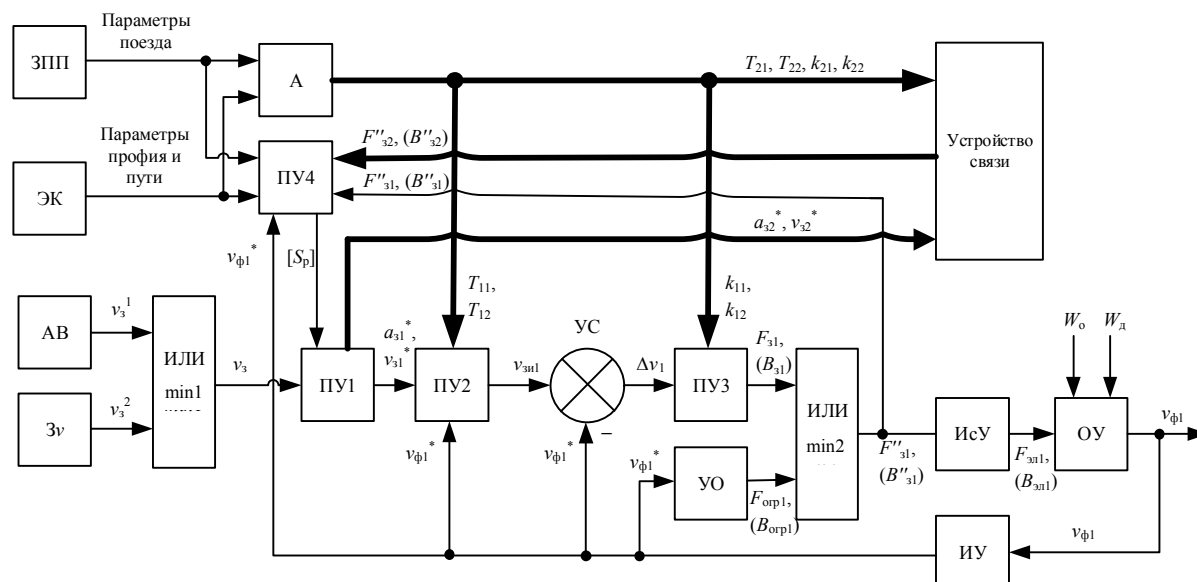


Рисунок 2 – Функциональная схема САУ скоростью локомотива грузового поезда с распределенной тягой

Устройство ограничений УО вводит информацию об ограничениях на тяговые и тормозные характеристики локомотива. Элемент ИЛИ-min2 пропускает на выход минимальное из двух значений заданной силы тяги (силы торможения). Ограниченное значение силы тяги (торможения) поступает на вход исполнительного устройства ИсУ – автоматизированного тягового привода. Он, в свою очередь, обеспечивает силовое воздействие на объект управления ОУ – ведущий локомотив грузового поезда. Фактическая скорость движения локомотива измеряется измерительным устройством ИУ; устройство связи обеспечивает связь САУ ведущего и ведомого локомотивов.

Выполним исследование работы САУ скоростью со структурой, приведенной на рисунке 2. Моделировалось движение поезда массой 5850 т, состоящего из 63 вагонов массой 90 т каждый и электровоза массой 180 т в режиме трогания с места и начала разгона. На рисунке 3, *а* приведен график зависимости скорости движения от времени $v(t)$, на рисунке 3, *б* – график зависимости величины продольной силы между локомотивом и первым вагоном, вычисленной в соответствии с предлагаемой методикой (кривая S_{pl}).

Здесь же, для сравнения, приведен график зависимости величины продольной силы между локомотивом и первым вагоном, вычисленный с использованием дискретной модели поезда (кривая S_I). При выполнении расчетов рассматривается движение предварительно сжатого поезда.

Как видно, по мере увеличения скорости движения локомотива из-за увеличения силы тяги происходит поочередное трогание вагонов с места. Это ведет к возникновению колебаний величины продольной силы (см. рисунок 3, б, кривая S_1), при этом наибольшее ее значение достигает величины 150 кН. По мере приведения экипажей поезда в движение амплитуда и частота колебаний продольной силы уменьшаются. После прохождения волны растяжения вдоль всего поезда до последнего вагона отраженная волна возвращается к локомотиву, при этом наблюдается резкое уменьшение величины продольной силы до 170 кН (момент времени 37 с), а затем ее дальнейший рост по мере нарастания силы тяги локомотива. Как видно, величина

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

продольной силы, определенная в соответствии с предложенной методикой (см. рисунок 3, б, кривая S_1), представляет собой «усредненное» значение фактической продольной силы. После завершения процесса трогания поезда с места расчетное и фактическое значения продольной силы становятся практически одинаковыми как качественно, так и количественно.

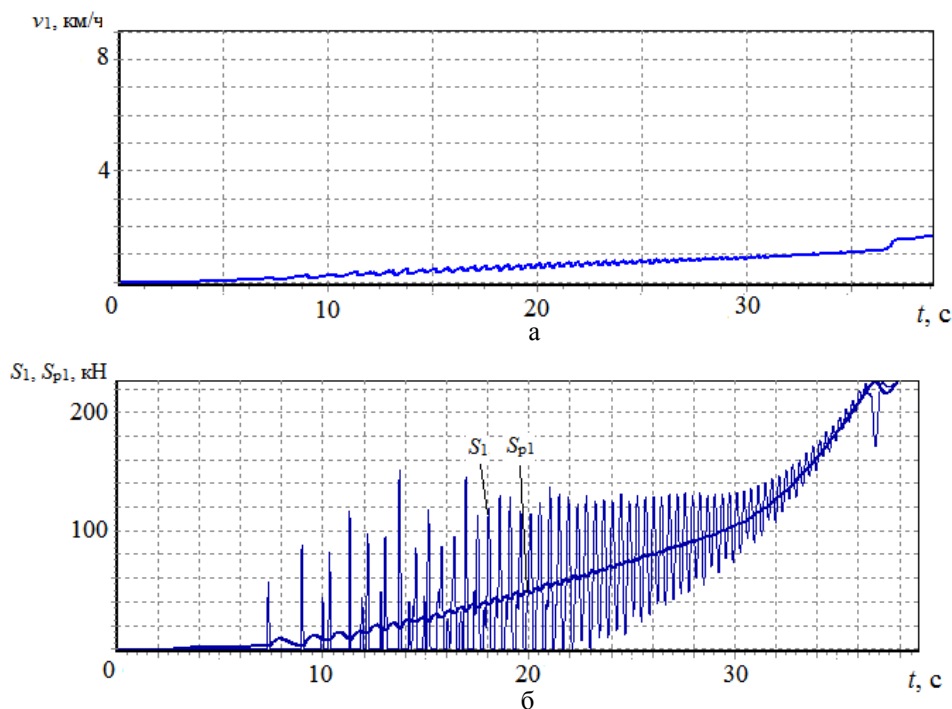


Рисунок 3 – Графики зависимостей скорости локомотива от времени (а) и величины продольной силы, рассчитанной двумя способами (б)

Было выполнено моделирование движения поезда с распределенной тягой, состоящего из 63 вагонов массой 90 т каждый, с расположением локомотивов в головной (первый экипаж) и хвостовой (последний экипаж) частях поезда. При этом первый локомотив реализует силу тяги, равную 145 кН, второй, обеспечивающий «подталкивание», – 190 кН. На рисунке 4 приведены результаты расчетов для установившегося режима движения по подъему крутизной 5,7 ‰ в виде эпюры распределения величин продольных сил по длине грузового поезда. Принятым расположением локомотивов и реализуемых ими сил тяги определяются как величины продольных сил, действующих в поезде, так и состояние упряжных приборов – часть поезда между первым локомотивом и вагоном № 28 растянута, оставшаяся часть сжата. Отметим, что результаты расчетов, полученные как с использованием дискретной модели поезда (линия S_1), так и в соответствии с предлагаемой методикой (линия S_{p1}), практически совпадают.

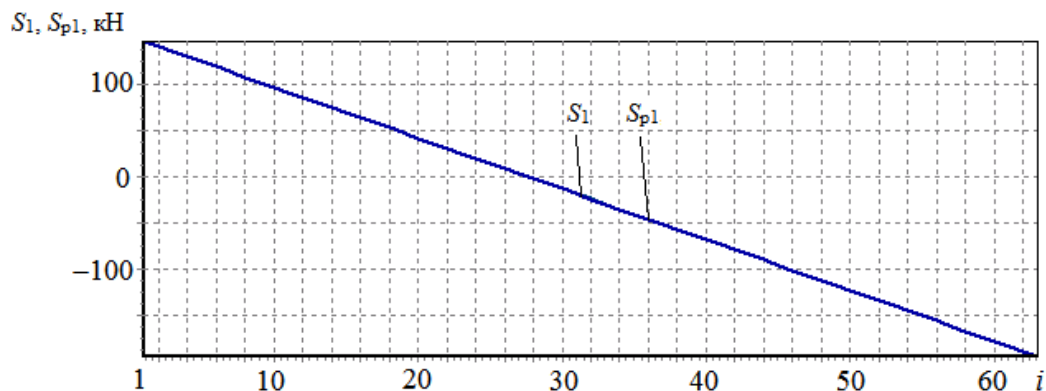


Рисунок 4 – Эпюра продольных сил в грузовом поезде с двумя локомотивами, рассчитанная двумя способами

Таким образом, предлагаемый метод оценки величин продольных сил в поезде допустимо использовать в системе автоматического управления скоростью движения грузового поезда с распределенной тягой для коррекции задания режимов движения ведомого локомотива с целью обеспечения соблюдения критерия коэффициента запаса устойчивости вагона от схода с рельсов.

Список литературы

1. Пудовиков, О. Е. Автоматическое управление скоростью движения длинносоставного грузового поезда / О. Е. Пудовиков. – Текст : непосредственный // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. – № 8. – С. 51 – 57.
2. Интеллектуальная система автоматизированного вождения поездов повышенной массы и длины с распределенными по длине локомотивами ИСАВП-РТ: Руководство по эксплуатации АЮВП. 468382. 004РЭ. – Текст : электронный. – URL: <https://docplayer.ru/35979306-Intellektualnaya-sistema-avtomatizirovannogo-vozhdeniya-poezdov-povyshennoy-massy-i-dliny-s-raspredelennymi-po-dline-lokomotivami-isavp-rt.html> (дата обращения: 10.12.2020).
3. Railways in the Coal Fields of Queensland. *Technology in Australia 1788-1988*. Chapter 6, page 382. Retrieved 2008-11-16.
4. Pudovikov O. E., Bespal'ko S. V., Kiselev M. D., Serdobintsev E. V. Application of reference train model in automatic control system of freight-train speed. *Russian Electrical Engineering*, 2017, no. 9, pp. 563 – 567.
5. Расчеты и испытания тяжеловесных поездов / Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин, Е. Л. Стамблер [и др.]; под ред. Е. П. Блохина. – Москва : Транспорт, 1986. – 263 с. – Текст : непосредственный.
6. Киселев, М. Д. Система критериев качества для оценки перспективных систем автоматического управления скоростью грузовых поездов с распределенной тягой / М. Д. Киселев, О. Е. Пудовиков. – Текст : непосредственный // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2016. – № 2. – С. 11 – 14.
7. Вершинский, С. В. Динамика вагона / С. В. Вершинский, В. Н. Данилов, В. Д. Хусидов. – Москва : Транспорт, 1991. – 360 с. – Текст : непосредственный.
8. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые: требования к прочности и динамическим качествам. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 53 с. – Текст : непосредственный.
9. Пудовиков, О. Е. Система автоматического управления скоростью грузового поезда с распределенной тягой / О. Е. Пудовиков, В. Г. Сидоренко [и др.]. – Текст : непосредственный // Электротехника. – 2019. – № 9. – С. 47 – 54.
10. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – Москва : Транспорт, 1985. – 287 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Pudovikov O. E. Automatic speed control of a long-distance freight train [Avtomaticeskoe upravlenie skorostiu dvijenia dlinnosostavnogo gruzovogo poezda]. *Mechatronica, Avtomatizacia, Upravlenie – The journal of Mechatronics, Automation, and Control*, 2010, no. 8, pp. 51 – 57.
2. *Intellectualnaya sistema avtomatizirovannogo vozdenia porezdov povishennoi massi i dlini s raspredelyonnimi pod line locomotivami ISAVP–RT* [An intelligent system for automated driving of trains of increased mass and length distributed along the length of the locomotives ISADT-DT], Available at : <https://docplayer.ru/35979306-Intellektualnaya-sistema-avtomatizirovannogo-vozhdeniya-poezdov-povyshennoy-massy-i-dliny-s-raspredelennymi-po-dline-lokomotivami-isavp-rt.html> (accessed 10 December 2020).
3. Railways in the Coal Fields of Queensland. *Technology in Australia 1788-1988*. Chapter 6, page 382. Retrieved 2008-11-16.

4. Pudovikov O. E., Bepal'ko S. V., Kiselev M. D., Serdobintsev E. V. Application of reference train model in automatic control system of freight-train speed. *Russian Electrical Engineering*, 2017, no. 9, pp. 563 – 567.
5. Blochin E. P., Manashkin L. A., Stambler E. L. *Rascheti i ispitania tyajelovesnih poezdov* (Calculations and tests of heavy trains). Moscow: Transport Publ., 1986, 260 p.
6. Kiselev M. D., Pudovikov O. E. A system of quality criteria for evaluating promising systems for automatic speed control of freight trains with distributed traction [Systema citeriev kachestva dlya ochenki perspektivnih system avtomaticheskogo upravleniya skorostiu gruzovih poezdov s raspredelennoi tyagoi]. *Electronica i elektrooborudovanie transporta – The journal of Electronics and Transport electric equipment*, 2016, no. 2, pp. 11 – 14.
7. Vershinskii S. V., Danilov V. N., Husidov V. D. *Dinamica vagona* (The dynamics of the car). Moscow: Transport Publ., 1991, 360 p.
8. *Vagoni gruzovie: trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam*, GOST 57564-2017 (Freight cars. Requirements for strength and dynamic qualities, International Standard 33211-2014). Moscow, Standardinform, 2016, 53 p.
9. Pudovikov O. E., Sidorenko V. G., Sidorova N. N., Kiselev M. D. Automatic speed control system for a freight train with distributed traction [Systema avtomaticheskogo upravleniya skorostiu dvizheniya gruzovogo poezda s raspredelennoi tyagoi]. *Electrotechnica – The journal of electrical engineering*, 2019, no. 9, pp. 47 – 54.
10. *Pravila tyagovih rasetov dlya poezdnoi raboti* (Rules of traction calculations for train operation). Moscow: Transport Publ., 1985, 287 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пудовиков Олег Евгеньевич

Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ)).

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

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

Тел.: +7 (916) 182-78-24.

E-mail: olegep@mail.ru

Жухин Никита Олегович

Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ)).

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

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

Тел.: +7 (916) 859-49-37.

E-mail: rzd1997@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Пудовиков, О. Е. Новые подходы к разработке систем автоматического управления скоростью длинно-составных поездов / О. Е. Пудовиков, Н. О. Жухин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 4 (44). – С. 81 – 89.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pudovikov Oleg Evgenievich

Russian University of Transport (RUT(MIIT)).

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

Doctor of Sciences in Engineering, Head of the department «Locomotives and multiple-unit trains», RUT (MIIT).

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

E-mail: olegep@mail.ru

Zhukhin Nikita Olegovich

Russian University of Transport (RUT(MIIT)).

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

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

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

E-mail: rzd1997@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Pudovikov O. E., Zhukhin N. O. New approaches to the development of automatic speed control systems for long-distance trains. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2020, no. 4 (44), pp. 81 – 89 (In Russian).

Р. А. Сахаров, К. К. Ким, Я. С. Ватулин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС),
Российская Федерация

ОЦЕНКА КРИТИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ МЕТАЛЛА ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС

Аннотация. В данной статье рассмотрен альтернативный подход к решению задач технического диагностирования железнодорожных колес, который заключается в разработке системы мониторинга критических состояний приповерхностных слоев металла, обладающей способностью обнаружения зарождающихся дефектов в структуре металла поверхности катания колеса.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, мониторинг, магнитное поле, энергия, внутренние напряжения.

Roman A. Sakharov, Konstantin K. Kim, Yan S. Vatulin

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU), the Russian Federation

ASSESSMENT OF CRITICAL STATES OF METAL ROLLING SURFACE OF RAILWAY WHEELS

Annotation. In this paper we consider an alternative method to solving problems of technical diagnostics of railway wheels, which consists in developing a system for monitoring critical states of near-surface layers of metal, which has the ability to detect incipient defects in the metal structure of the rolling surface of a wheel.

Keywords: nondestructive control, monitoring, magnetic field, energy, internal tensions.

В процессе обслуживания железнодорожных колес для оценки их технического состояния (ТС) применяются традиционные методы неразрушающего контроля (НК), которые малоприменимы для непрерывного контроля параметров, но что может выполняться в процессе мониторинга. На практике время образования дефектов на поверхности катания железнодорожных колес зачастую намного меньше назначенных межремонтных периодов, что повышает вероятность возникновения аварийных ситуаций. Самыми распространенными причинами возникновения аварийных ситуаций на железнодорожном транспорте являются усталостные разрушения материалов, предупреждение которых возможно за счет разработки системы мониторинга критических состояний металла приповерхностных слоев ответственных узлов и деталей оборудования, обладающей способностью обнаружения зарождающихся дефектов в структуре металла (СМ). [1]

Согласно ГОСТу [2] классификация методов НК предполагает их деление на «пассивные» – использующие собственные физические поля, отображающие внутреннюю энергию материала объектов контроля, и «активные» – с созданием в материале исследуемых объектов «принудительного» физического поля заданной ориентации [3]. «Активным» методам НК свойственны сложность проведения измерений, громоздкость оборудования и негативное влияние на остаточный ресурс (ОР) колес, что делает их малоприменимыми для массовой экспертизы. Поэтому наиболее пригодными для непрерывного мониторинга критических состояний металла приповерхностных слоев ответственных узлов и деталей оборудования являются «пассивные» методы НК, для которых характерны небольшие габариты, простота процесса диагностирования, возможность его автоматизации и отсутствие негативного влияния на ОР железнодорожных колес.

Представляется целесообразным разделить процесс технического диагностирования железнодорожных колес с момента их ввода в эксплуатацию на две стадии. На первой ста-

дии осуществляется непрерывный мониторинг критических состояний металла приповерхностных слоев железнодорожных колес по установленному показателю с помощью «пассивного» экспресс-метода согласно ГОСТу [4], а на второй – при достижении значений установленного показателя выше критического, соответствующего предельному критическому состоянию металла приповерхностных слоев, использование традиционных «активных» методов НК для непосредственного поиска дефектов.

В работах [5, 6] показывается наличие взаимосвязи между структурой металлов и их магнитными и механическими свойствами, отмечается влияние внутренних напряжений в СМ на магнитные свойства железнодорожных колес, характеризующиеся обобщенными показателями усталости металла. Поскольку степень усталости металла является не столько особенностью процесса эксплуатации колес, сколько внутренним обобщенным свойством самого материала, то целесообразно использовать в качестве «пассивного» экспресс-метода [4] для мониторинга критических состояний металла приповерхностных слоев измерение магнитных свойств по аналогии с методикой магнитной разведки [7].

Исходными данными для решения задачи технического диагностирования железнодорожных колес являются измеренные (наблюдаемые) значения магнитной индукции, выявленные в процессе мониторинга, анализ которых при наложении на физику внутренних процессов при эксплуатации можно выполнить с помощью вейвлет-преобразования, при котором происходит представление исходного сигнала в виде функции. Последующее преобразование временного ряда накопленных данных с помощью специальных средств интеллектуального анализа данных позволяет автоматически генерировать гипотезы [8], т. е. прогнозировать поведение трендов сигнала. К средствам интеллектуального анализа данных относятся нейронные сети, генетические алгоритмы, фреймовые модели и ленымы [9].

В работе [10] проведен сравнительный анализ существующих датчиков измерения электромагнитных полей, согласно которому анизотропно-магниторезистивные (АМР) датчики по своим техническим характеристикам являются наиболее пригодными для мониторинга степени усталости металла (СУМ). На основе АМР датчиков авторами было разработано устройство для магнитометрии [11], функциональная блок-схема которого приведена на рисунке 1.

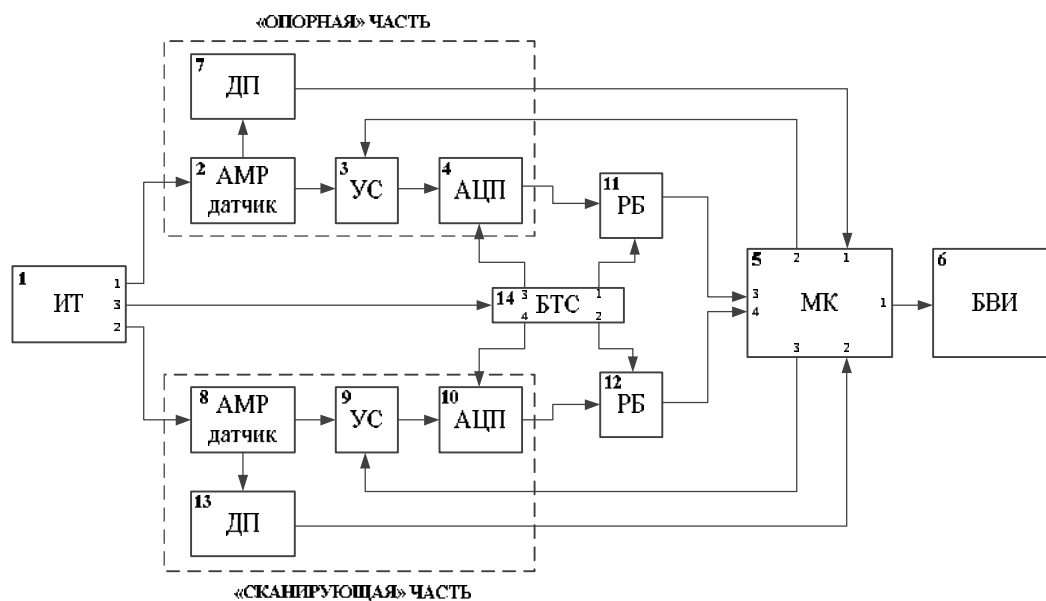


Рисунок 1 – Функциональная блок-схема устройства для магнитометрии: 1 – источник тока; 2 и 8 – датчики магнитного поля; 3 и 9 – усилители; 4 и 10 – аналого-цифровые преобразователи; 5 – микроконтроллерный блок; 6 – блок вывода информации; 7 и 13 – датчики положения; 11 и 12 – регистрирующие блоки; 14 – блок тактовой синхронизации

Разрабатываемое устройство относится к области контрольно-измерительной техники и предназначено для мониторинга интенсивности и ориентации магнитных полей, в частности, вблизи поверхности изделий, например, тел вращения из ферромагнитных материалов [11].

Благодаря введению дополнительных дублирующих блоков 8, 9, 10, 13 относительно блоков 2, 3, 4, 7 устройство можно условно разделить на «опорную» и «сканирующую» части. Причем каждая из условных частей может выступать как в качестве «сканирующей», так и в качестве «опорной». Это обусловлено необходимостью учета влияния неоднородности магнитного поля в пространстве. Данное конструктивное решение обеспечивает стабильность измерений даже при сильных внешних возмущениях магнитного поля без уменьшения разрешающей способности и динамического диапазона измерительной системы [11].

В «опорной» части датчик положения 7 определяет начало и направление координат для позиционирования прибора в плоскости, параллельной относительно прикладываемой поверхности изделия, а анизотропный магниторезистивный датчик 2 служит для определения вектора и «эталонной» величины магнитного поля в пространстве. В «сканирующей» части датчик положения 13 определяет координаты позиционирования относительно «опорной» части, а анизотропный магниторезистивный датчик 8 определяет ориентацию и величину магнитного поля при каждой конкретной координате измерения. Затем в микроконтроллерном блоке 5 происходит сравнение значений «сканирующей» и «опорной» частей с последующим определением разницы значений характеристик магнитного поля и присвоения им координат точек измерения, что образует «виртуальный» мост Уитстона, за счет чего и достигается повышение точности регистрации дефектов. Результаты отображаются в блоке вывода информации 8 в параметрическом виде в форме функциональной поверхности отклика для возможности определения на плоскости показателя интенсивности и направления происходящих процессов в магнитном поле по следу или касательной искомой точки кривой [11].

С помощью представленного устройства для магнитометрии [11] в дефектоскопической лаборатории на кафедре «Методы и приборы неразрушающего контроля» ПГУПСа проведен эксперимент по измерению магнитных свойств вблизи поверхности катания вагонных колесных пар диаметром 910 мм.

Обод всех четырех вагонных колесных пар был условно разделен на 16 равных частей (областей) – через каждые 65 мм по кругу катания, по которым была измерена твердость *НВ* (по Бриннелю) при помощи электронного малогабаритного переносного программируемого твердомера НПП «Технотест-М», ТЭМП-4 (кафедра «Технология металлов» ПГУПСа) (рисунок 2).



а



б

Рисунок 2 – Фотографии колесной пары (КП) в дефектоскопической лаборатории ПГУПСа:

а – 1-я КП; б – 3-я КП (ползун)

Данные измерений твердости четырех вагонных колесных пар (ВКП) по кругу катания сведены в таблицу 1.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Таблица 1 – Данные измерений твердости четырех вагонных колесных пар по кругу катания

№ КП	Номер области КП															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1-я КП	342	325	357	327	326	330	325	349	357	336	325	336	329	325	331	388
2-я КП	351	339	323	344	339	311	305	340	340	344	330	364	340	352	351	338
3-я КП	381	403	462	455	395	374	375	366	401	384	378	366	372	428	336	364
4-я КП	403	415	336	325	330	404	340	362	313	397	434	344	333	327	403	404

Данные измерений индукции магнитного поля по кругу катания всех четырех ВКП на расстоянии 40 мм от поверхности сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Данные измерений магнитной индукции четырех вагонных колесных пар по кругу катания на расстоянии 40 мм от поверхности

№ КП	Номер области КП															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1-я КП	410	421	468	400	353	401	357	422	452	435	412	438	425	409	441	470
2-я КП	436	410	326	487	372	296	100	302	350	470	400	410	347	367	438	402
3-я КП	225	236	301	250	180	219	180	-63	53	45	25	11	189	278	235	276
4-я КП	390	519	455	239	561	400	212	319	-364	542	787	787	690	542	638	400

Графическое изображение зависимости твердости HB и индукции магнитного поля B от номера области КП на расстоянии 40 мм от поверхности по кругу катания всех четырех ВКП приведено на рисунках 3 и 4.

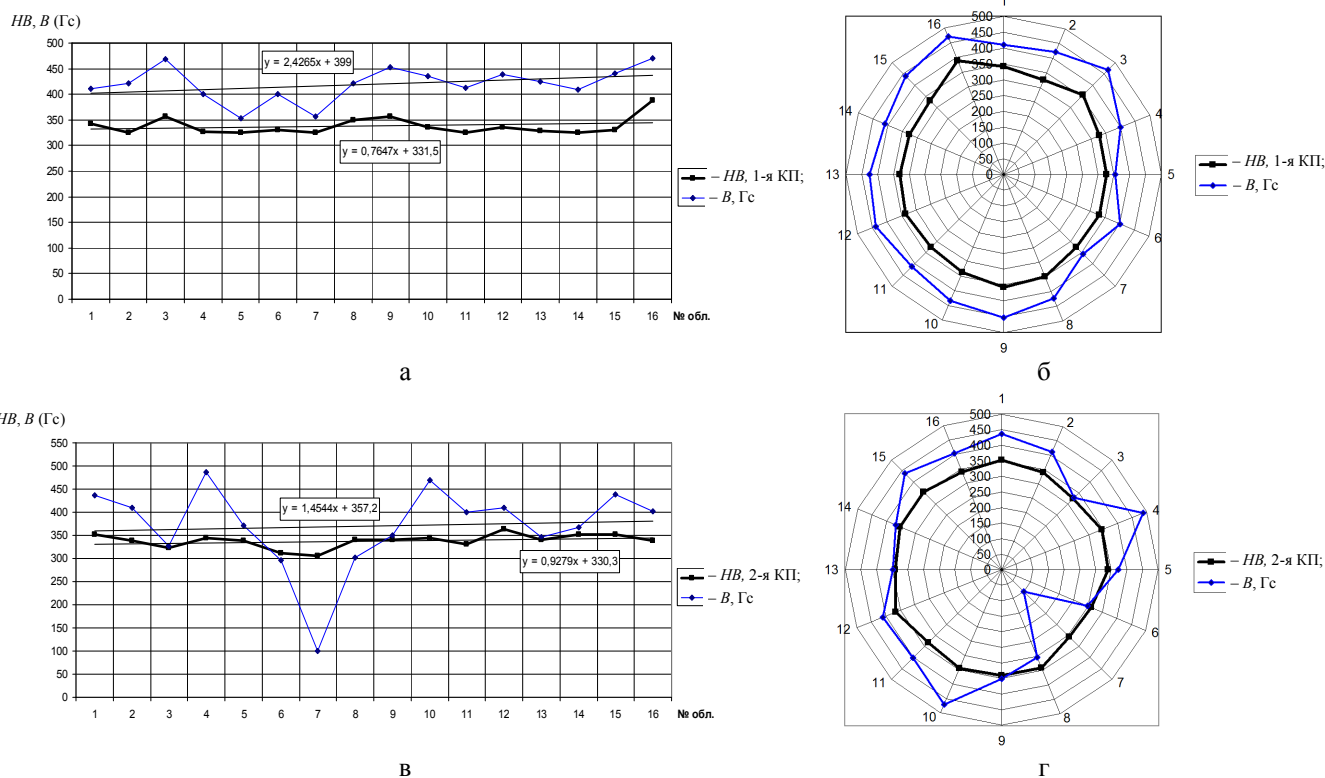


Рисунок 3 – Графическое изображение зависимости твердости HB и индукции магнитного поля B от номера области КП по кругу катания колесных пар на расстоянии 40 мм от поверхности (а, б – 1-я КП; в, г – 2-я КП)

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

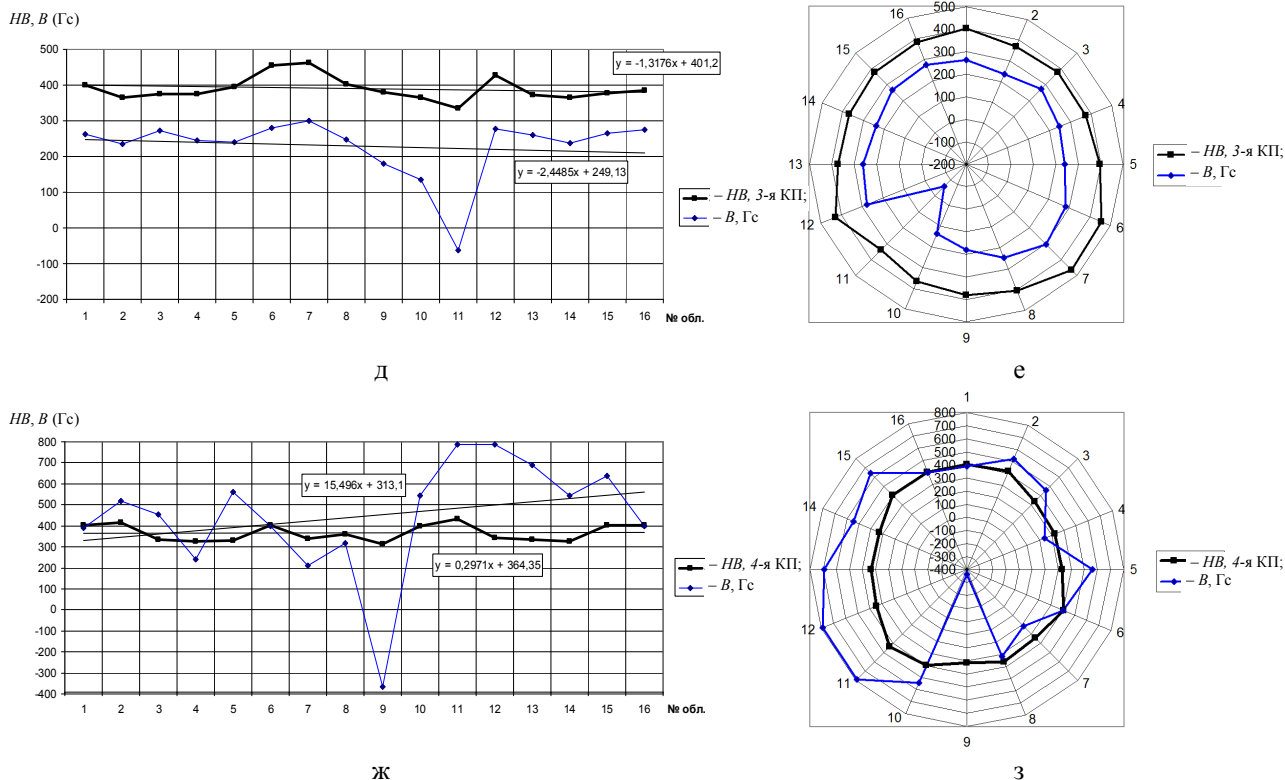


Рисунок 4 – Графическое изображение зависимости твердости HB и индукции магнитного поля B от номера области КП по кругу катания колесных пар на расстоянии 40 мм от поверхности (д, е – 3-я КП (ползун); ж, з – 4-я КП)

Из рисунков 3 и 4 видно, что 1-я КП (рисунок 3, а, б) имеет удовлетворительный запас внутренней энергии в металле, а 3-я КП (рисунок 4, д, е) уже полностью израсходовала свой технический ресурс, все показатели индукции собственного магнитного поля меньше показателей твердости по одной и той же шкале. Кроме того, у 2-й КП (рисунок 3, в, г) и 4-й КП (рисунок 4, ж, з) структура металла имеет некоторые фазовые превращения, природа которых требует более детальных исследований.

При многократном повторении процесса измерения с каждым поворотом колеса в пути следования поезда полученные линейные сглаживающие аппроксимирующие кривые будут показывать картину изменения значений индукции магнитного поля B в динамике, что может дать более достоверную информацию о тенденции внутренних изменений в структуре металла колеса, а также возможность оперативной оценки остаточного технического ресурса по фактическому состоянию колес.

Полученные в ходе эксперимента данные показывают наличие всплесков нормальной составляющей индукции собственного магнитного поля к профилю катания при прохождении участков с повышенной твердостью, что дает возможность выявления на ранней стадии дефектов в структуре металла.

Кроме того, при более детальном рассмотрении получено наглядное подтверждение корреляции значений индукции собственного магнитного поля B и твердости HB , соответствующих рабочим значениям твердости $\sim 250 \div 400$ HB металла поверхности катания цельнокатаных колес грузовых вагонов.

Выявлена закономерность чувствительности нормальной составляющей индукции собственного магнитного поля B к качественному изменению структуры металла образцов после отметки по шкале твердости $400 \div 420$ HB , которая соответствует образованию α -фазы в структуре металла, склонной к растрескиванию.

Таким образом, подтверждено наличие зависимости характера распределения собственных магнитных полей от механических свойств металла железнодорожных колес, благодаря чему появляется возможность решения задач технического диагностирования на основе данных мониторинга критических состояний металла поверхности катания железнодорожных колес. Однако вопросы использования разработанного устройства непосредственно на подвижном составе, а также вопросы прогнозирования остаточного технического ресурса железнодорожных колес требуют дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Сахаров, Р. А. Решение задачи технического диагностирования ответственных узлов и деталей оборудования / Р. А. Сахаров, Я. С. Ватулин. – Текст : непосредственный // Транспорт России: проблемы и перспективы-2015 : междунар. науч.-практ. конф. : сб. статей : в 3 т. – Санкт-Петербург : Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко Российской академии наук, 2015. – Т. 3. – С. 98 – 102.
2. ГОСТ 18353-79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. – Москва : Изд-во стандартов, 1987. – 18 с. – Текст : непосредственный.
3. Дубов, А. А. О новой классификации методов НК с позиции оценки рисков и ресурса оборудования / А. А. Дубов, В. Т. Власов. – Текст : непосредственный // Диагностика оборудования и конструкций с использованием метода магнитной памяти металла : сб. докладов междунар. науч.-техн. конф. – Москва : Энергодиагностика, 2007. – С. 30 – 31.
4. ГОСТ Р 53006-2008. Оценка ресурса потенциально опасных объектов на основе экспресс-методов. – Москва : Стандартинформ, 2009. – 15 с. – Текст : непосредственный.
5. Акулов, Н. С. Магнитный метод исследования внутренних упругих напряжений в ферромагнитных материалах / Н. С. Акулов, С. В. Киренский. – Текст : непосредственный // Журнал технической физики. – 1939. – Т. 9. – Вып. 13. – С. 1145 – 1150.
6. Сахаров, Р. А. Модель процесса технического диагностирования металлических конструкций пассивным экспресс-методом / Р. А. Сахаров. – Текст : непосредственный // Морской вестник. – 2016. – № 3 (59). – С. 24 – 26.
7. Блох, Ю. И. Совместная интерпретация данных магниторазведки и метода незаземленной петли при определении магнитных свойств магнетитовых руд / Ю. И. Блох. – Текст : непосредственный // Известия АН СССР. Физика Земли. – 1981. – № 11. – С. 74 – 81.
8. Технологии анализа данных: Data Mining, Visual Mining, Text Mining, OLAP / А. А. Барсегян, М. С. Куприянов [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2007. – 384 с. – Текст : непосредственный.
9. Камынина, М. А. Возможности нейронных сетей при решении задач интеллектуального анализа данных в системе управления сетью передачи данных / М. А. Камынина, А. К. Канаев. – Текст : непосредственный // Труды 68-й науч.-техн. конф. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), 2013. – С. 193 – 194.
10. Федоров, И. С. Выбор типа магниточувствительного элемента для устройства определения концентрации полезного компонента в рудах черных и цветных металлов / И. С. Федоров. – Текст : непосредственный // Автоматизация виробничих процесів. – Днепропетровск : Национальный горный университет, 2010. – С. 55 – 61.
11. Патент № 155669 Российская Федерация. МПК G01R 33/00 (2006.01). Устройство для магнитометрии : № 2015126439/28 : заявлено 01.07.2015 : опубликовано 20.10.2015 / Сахаров Р. А., Ватулин Я. С. – 9 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Sakharov R. A., Vatulin Y. S. Solution of the problem of technical diagnostics of critical units and parts of equipment [Reshenie zadachi tekhnicheskogo diagnostirovaniia otvetstvennykh uzlov i detalei oborudovaniia]. *Transport Rossii: problemy i perspektivy-2015: mezhdunar. nauch.-*

prakt. konf.: sb. statei : v 3 t. (Transport of Russia: problems and prospects-2015: international scientific and practical conference: collection of articles : in 3 vols.). – Saint-Petersburg: N. S. Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences Publ., 2015, vol. 3, pp. 98 – 102.

2. *Kontrol' nerazrushaiushchii. Klassifikatsiia vidov i metodov, GOST 18353-79* (Non-destructive testing. Classification of types and methods, GOST 18353-79). Moscow: Standards Publ., 1987, 18 p.

3. Dubov A. A., Vlasov V. T. On a new classification of NDT methods from the standpoint of risk assessment and equipment resource [O novoi klassifikatsii metodov NK s pozitsii otsenki riskov i resursa oborudovaniia]. *Diagnostika oborudovaniia i konstruktssii s ispol'zovaniem metoda magnitnoi pamiati metalla: sb. dokladov mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* (Diagnostics of equipment and structures using the metal magnetic memory method: fourth international scientific and technical conference collection of reports). – Moscow: Energodiagnostika Publ., 2007, pp. 30 – 31.

4. *Otsenka resursa potentsial'no opasnykh ob'ektov na osnove ekspress-metodov, GOST R 53006-2008* (Evaluation of the resource of potentially dangerous objects based on express methods, National Standard 53006-2008). Moscow: Standardinform, 2009, 15 p.

5. Akulov N. S., Kirenskiy S. V. Magnetic method for studying internal elastic stresses in ferromagnetic materials [Magnitnyi metod issledovaniia vnutrennikh uprugikh napriazhenii v ferromagnitnykh materialakh]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki – Technical Physics Journal*, 1939, vol. 9, issue 13, pp. 1145 – 1150.

6. Sakharov R. A. Model of the process of technical diagnostics of metal structures by the passive express method [Model' protsessa tekhnicheskogo diagnostirovaniia metallicheskih konstruktssii passivnym ekspress-metodom]. *Morskoi vestnik – Marine Bulletin*, 2016, no. 3 (59), pp. 24 – 26.

7. Blokh Yu. I. Joint interpretation of magnetic exploration data and the ungrounded loop method in determining the magnetic properties of magnetite ores [Sovmestnaia interpretatsiia dannykh magnitorazvedki i metoda nezazemlen-noi petli pri opredelenii magnitnykh svoistv magnetitovykh rud]. *Izvestiia AN SSSR. Fizika Zemli – Izvestiya AN SSSR. Earth Physics*, 1981, no. 11, pp. 74 – 81.

8. Barseghyan A. A., Kupriyanov M. S., Stepanenko V. V., Cold I. I. *Tekhnologii analiza dannykh: Data Mining, Visual Mining, Text Mining, OLAP* (Data analysis technologies: Data Mining, Visual Mining, Text Mining, OLAP). Saint-Petersburg: BHV-Petersburg Publ., 2007, 384 p.

9. Kamynina M. A., Kanaev A. K. Possibilities of neural networks in solving problems of data mining in a data transmission network control system [Vozmozhnosti neironnykh setei pri reshenii zadach intellektual'nogo analiza dannykh v sisteme upravleniia set'iu peredachi dannykh]. *Trudy 68-i nauch.-tekhn. konf.* (proceedings of 68th scientific and technical conference, section: «Telecommunications in railway transport»). – Saint-Petersburg: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi elektrotekhnicheskii universitet «LETI» im. V. I. Ul'ianova (Lenina) Publ., 2013, p. 193 – 194.

10. Fedorov I. S. The choice of the type of magnetically sensitive element for the device for determining the concentration of the useful component in the ores of ferrous and non-ferrous metals [Vybor tipa magnitochuvstvitel'nogo elementa dlia ustroistva opredeleniia kontsentratsii poleznogo komponenta v rudakh chernykh i tsvetnykh metallov]. *Avtomatizatsiia proizvodstvennykh protsessov – Automation of production processes*, Dnepropetrovsk: National Mining University Publ., 2010, p. 55 – 61.

11. Sakharov R. A., Vatulin Ya. S. *Patent RU 155669*, 20.10.2015.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сахаров Роман Александрович

Петербургский государственный университет
путей сообщения Императора Александра I (ПУПС).
Московский пр., д. 9, г. Санкт-Петербург, 190031,
Российская Федерация.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sakharov Roman Aleksandrovich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport
University (SPSTU).
9 Moskovsky Ave., Saint Petersburg, 190031, Rus-
sian Federation.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Аспирант кафедры «Электротехника и теплоэнергетика», ПГУПС.

Тел.: +7 (911) 224-53-57.

E-mail: sakhar.ok@mail.ru

Ким Константин Константинович

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС).

Московский пр., д. 9, г. Санкт-Петербург, 190031, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электротехника и теплоэнергетика», ПГУПС.

Тел.: 8 (812) 457-81-42.

E-mail: kimkk@inbox.ru

Ватулин Ян Семенович

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС).

Московский пр., д. 9, г. Санкт-Петербург, 190031, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Подъемно-транспортные, путевые и строительные машины», ПГУПС.

Тел.: 8 (812) 436-91-40.

E-mail: Kaf-ap-pgups@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Сахаров, Р. А. Оценка критических состояний металла поверхности катания железнодорожных колес/ Р. А. Сахаров, К. К. Ким, Я. С. Ватулин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 4 (44). – С. 90 – 97.

Postgraduate student of the department «Electrical and heat engineering», SPSTU.

Phone: +7 (911) 224-53-57.

E-mail: sakhar.ok@mail.ru

Kim Konstantin Konstantinovich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (SPSTU).

9 Moskovsky Ave., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, Professor, Head of Department «Electrical and heat engineering», SPSTU.

Phone: 8 (812) 457-81-42.

E-mail: kimkk@inbox.ru

Vatulin Yan Semenovich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (SPSTU).

9 Moskovsky Ave., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate Professor of the Department «Mechanical Handling and Road Building Machines», SPSTU.

Phone: 8 (812) 436-91-40.

E-mail: Kaf-ap-pgups@yandex.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Sakharov R. A., Kim K. K., Vatulin Y. S. Assessment of critical states of metal rolling surface of railway wheels. Journal of Transsib Railway Studies, 2020, no. 4 (44), pp. 90 – 97 (In Russian).

УДК 621.331 : 621.311 + 06

В. А. Осипов, П. А. Логунова

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ ЭНЕРГИИ В ТЯГОВОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Аннотация. Статья посвящена вопросу измерения потерь мощности в тяговых сетях постоянного тока. Целью работы является определение показателей, которые характеризуют степень точности оценки значений потерь энергии при использовании метода восстановления поездной ситуации. В публикации проведен анализ величины методической погрешности, возникающей при измерении потерь энергии в тяговой сети постоянного тока.

Возникновение меры неопределенности обусловлено методом косвенных измерений, в основе которого лежит принцип синтеза мгновенных схем в режиме реального времени. Синтез осуществляется на основе проведения прямых измерений величин токов и напряжений на шинах смежных питающих и коммутационных точек, например, тяговой подстанции и поста секционирования. Полученные данные обрабатываются в соответствии с принятыми в статье алгоритмами, в результате чего вычисляются координаты нагрузок и потребляемый ими ток. В процессе синтеза мгновенных схем возможно появление такой поездной ситуации, которая приведет к возникновению методической погрешности измерения, обусловленной особенностями логико-математического аппарата метода восстановления поездной ситуации.

В работе выполнен вероятностный анализ возможности возникновения методической погрешности, когда на измерительном участке будет присутствовать одновременно несколько тяговых нагрузок, т. е. зави-

симость возникновения меры неопределенности от суточного размера движения поездов и зависимость возникновения меры неопределенности от минимального межпоездного интервала.

В результате исследования установлены границы использования предлагаемой методики по критерию возникновения допустимой погрешности измерения потерь энергии. Проведена оценка значения методической погрешности метода измерения при различных вариантах движения на исследуемом участке железной дороги.

Ключевые слова: потери энергии, постоянный ток, методическая погрешность, метод восстановления поездной ситуации, определение вероятности.

Vladimir A. Osipov, Polina A. Logunova

Rostov State Transport University (RSTU), Rostov-on-Don, the Russian Federation

DETERMINATION OF THE METHODOLOGICAL ERROR IN MEASURING THE ACTIVE ENERGY LOSS IN THE DC TRACTION NETWORK

Abstract. The article is devoted to the issue of power loss measurement in DC traction networks. The purpose of the work is to define the indicators characterizing the degree of determining the energy loss values accuracy when using the method of restoration of the train situation. In the article the analysis of methodical error the value arising at measurement of power losses in a traction DC network is conducted.

The occurrence of the error is caused by the indirect measurement method, which is based on the principle of synthesis of instantaneous circuits in real time. The synthesis is based on direct measurements of currents and voltages on the busbars of adjacent feeding and switching points, for example, a traction substation and a sectionalizing station. The data obtained are processed in accordance with the algorithms adopted in the article, as a result of which the coordinates of loads and their current consumption are calculated. In the process of synthesizing instantaneous circuits, it is possible that such a train situation may occur, which will lead to the emergence of a methodical measurement error, due to the peculiarities of the logical and mathematical apparatus of the train situation recovery method.

In this paper, has been performed a probabilistic analysis of the possibility of occurrence of methodological error when several traction loads will be present simultaneously on the measuring section, that is, the dependence of the occurrence of the measure of uncertainty on the daily size of train traffic and the dependence of the occurrence of the measure of uncertainty on the minimum inter-train interval.

As a result of the study, the proposed method application the limits were established by energy loss measurement the permissible error the criterion. The methodological error the value of the measurement at different variants method of movement on the railroad studied section was assessed

Keywords: energy loss, direct current, methodical error, method of the train situation recovery, probability determination.

Измерение потерь энергии в тяговой сети электрифицированных железных дорог в рамках реализации программы повышения энергоэффективности перевозочного процесса является одной из весьма важных задач. Известно, что в процессе выполнения любых измерений возникает ряд погрешностей, существенно влияющих на точность конечного результата [1 – 4]. В данной работе приводятся результаты исследований методической составляющей погрешности измерения потерь энергии в тяговых сетях постоянного тока.

В статье в качестве метода определения потерь энергии в тяговой сети постоянного тока используется метод восстановления поездной ситуации [5]. В настоящее время известен ряд методов, позволяющих определить количество энергии, потребляемой ЭПС от тяговой подстанции [3, 4]. Метод измерения расхода энергии, потребляемой ЭПС [3], предполагает установку на ЭПС системы GPS/ГЛОНАСС с привязкой к расходу электроэнергии, что бесспорно позволяет обеспечить высокую точность измерения расхода энергии на тягу. К сложностям практической реализации такого подхода следует отнести частичное отсутствие указанной аппаратуры на некоторых эксплуатируемых ЭПС, что снижает точность измерения расхода энергии на тягу. Задачей, решаемой в статье, является определение потерь энергии в тяговых сетях с целью их снижения для повышения технико-экономических показателей работы участков железной дороги постоянного тока.

В процессе определения потерь энергии возникновение методической составляющей погрешности измерения [6 – 8] объясняется некоторым несовершенством используемого метода составления мгновенных схем [5]. Значение потерь энергии определяется как интегральная функция при расчете ряда мгновенных схем на основе результатов прямых измере-

ний токов и напряжений на шинах, ограничивающих участок анализа. Как правило, это шины ближайшей тяговой подстанции и поста секционирования. При интервале попутного следования, меньшем времени прохода поездом зоны измерения, очевидна вероятность ситуации, когда на указанной зоне окажутся две единицы электроподвижного состава (ЭПС). Существенным недостатком принятого метода создания мгновенных схем является невозможность определить количество потребителей на измерительном участке, в результате чего алгоритм принимает всех потребителей эквивалентными одной тяговой нагрузке. С учетом того, что потери мощности представляют собой квадратичную функцию тока [9], такое эквивалентирование повлечет за собой возникновение методической погрешности. Исследования, представленные в данной работе, направлены на определение границ такой погрешности.

Исследуя затронутую проблему, можно убедиться в том, что возникновение ситуации, когда на межподстанционной зоне между шинами поста секционирования и шинами тяговой подстанции будет находиться несколько потребителей, будет тем выше, чем больше длина данной зоны. Введение дополнительных точек измерения на участке между смежными шинами технически возможно, но нуждается в существенных капиталовложениях и монтаже в пределах перегона специализированной измерительной аппаратуры. Такое решение требует экономического обоснования, так как обслуживание указанных измерительных узлов будет весьма затруднено. Одновременно с этим можно столкнуться с проблемами подвода питания к измерительной и передающей аппаратуре. Для принятия обоснованного решения о необходимости введения дополнительных точек измерения с целью снижения методической погрешности будем использовать основные сведения, известные из теории вероятности. Очевидно, что при отсутствии вероятности возникновения ситуации с наличием нескольких нагрузок на измерительном перегоне методическая составляющая погрешности будет исключена.

В процессе анализа будем полагать, что на основании обработки некоторой репрезентативной выборки были получены сведения о распределении поездов на участке железной дороги. Также допустим, что распределение поездов весьма устойчиво и подчиняется биномиальному закону распределения [10].

В связи с принятыми допущениями вероятность одновременного движения по анализируемому участку m единиц ЭПС можно определить по выражению [10]:

$$p(m) = C_n^m \left(\frac{N}{N_0} \right)^m \cdot \left(1 - \frac{N}{N_0} \right)^{n-m}, \quad (1)$$

где $p(m)$ – значение вероятности движения по рассматриваемой зоне нескольких (m) ЭПС;

m – число потребителей, находящихся на исследуемой зоне;

N – число заполненных нитей графика движения;

N_0 – общее число нитей графика движения;

n – максимально возможное число ЭПС на рассматриваемом участке.

Используя выражение (1), определим зависимость вероятности появления двух и более единиц ЭПС на исследуемом участке как функцию от суточных размеров движения в заданной зоне и построим график зависимости (рисунок 1).

В качестве исходных данных принят минимальный межпоездной интервал, равный 8 мин, а средняя скорость движения ЭПС 60 км/ч.

Ранее указывалось, что методическая погрешность предлагаемого способа определения потерь мощности возникает в случае нахождения на рассматриваемом участке двух и более поездов.

Из полученного графика (см. рисунок 1) видно, что вероятность появления на исследуемой зоне двух и более единиц электроподвижного состава ожидаемо нарастает с увеличением интенсивности движения.

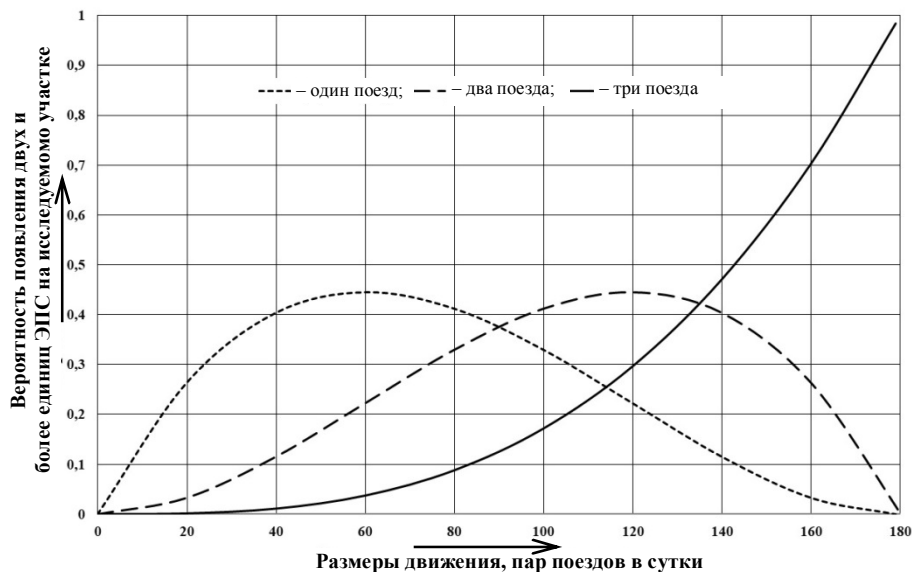


Рисунок 1 – График зависимости появления различного количества ЭПС как функция от суточного размера движения поездов

Для малодеятельных участков с размерами движения менее 50 пар поездов в сутки вероятность возникновения указанной проблемы незначительна.

Рассмотрим влияние значения величины межпоездного интервала на вероятность появления методической меры неопределенности при нахождении на зоне длиной $L = 13$ км двух ЭПС как функцию от размеров движения по этой зоне. Результаты расчета приведены на рисунке 2.

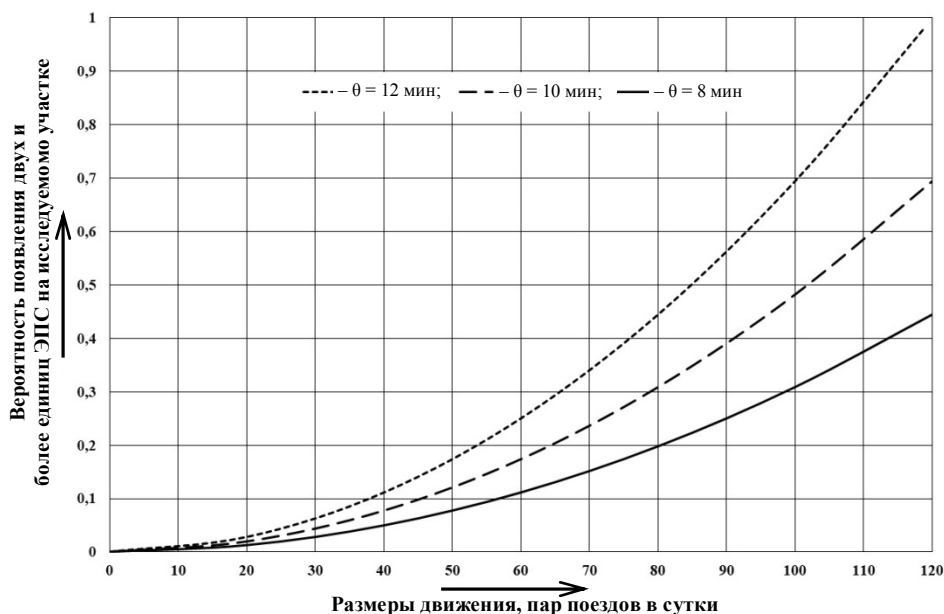


Рисунок 2 – График зависимости вероятности возникновения погрешности при различном значении межпоездного интервала

Из полученной зависимости можно сделать вывод о том, что с уменьшением межпоездного интервала вероятность возникновения методической погрешности будет расти. Однако такое заключение справедливо только для случаев, когда заполненное число нитей графика значительно меньше общего числа, т. е. для малодеятельных участков железных дорог.

Во всех дальнейших рассуждениях будем рассматривать наиболее вероятную ситуацию, когда на участке измерения расположены только две нагрузки. Ввиду того, что участок по-

лучает питание от системы постоянного тока, ограничимся рассмотрением процессов, протекающих на одном пути зоны «пост секционирования – тяговая подстанция».

Как указывалось выше, в процессе построения мгновенной схемы алгоритм, заложенный в методе восстановления поездной ситуации, построит эквивалентную схему замещения, в которой вместо двух реальных потребителей (рисунок 3) появится один фиктивный.

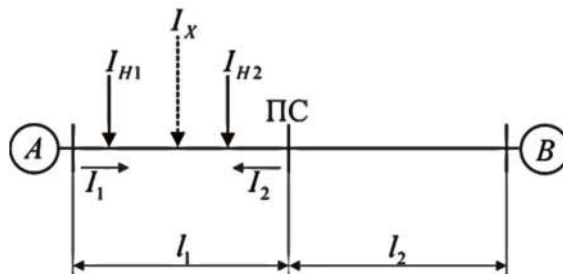


Рисунок 3 – Расчетная мгновенная схема с фиктивным током

Действительное значение потерь мощности на рассматриваемом участке определяется выражением:

$$P_d = r \cdot x_1 \cdot I_A^2 + r \cdot (x_2 - x_1) \cdot (I_A - I_{H1})^2 + r \cdot (l_1 - x_2) \cdot I_{ПС}^2, \quad (2)$$

где I_{H1} , I_{H2} – токи нагрузки от ЭПС1 и ЭПС2 соответственно;

l_1 и l_2 – расстояния от тяговой подстанции А до поста секционирования и от поста секционирования до подстанции В соответственно;

I_A , $I_{ПС}$ – токи на шинах тяговой подстанции А и поста секционирования соответственно;

r – сопротивление тяговой сети (зависит от типа контактной сети);

x_1 , x_2 – координаты электроподвижных составов с нагрузками I_{H1} и I_{H2} соответственно.

В качестве исходных данных для выражения (2) используются данные, полученные по результатам компьютерного моделирования в программном комплексе «Кортэс».

Значение потерь мощности, измеренное с использованием метода восстановления поездной ситуации, определяется выражением:

$$P_{изм} = r \cdot x \cdot I_1^2 + r \cdot (l_1 - x) \cdot I_2^2, \quad (3)$$

где I_1 , I_2 – регистрируемые измерительной аппаратурой токи фидера тяговой подстанции А и на шинах поста секционирования соответственно;

x – координата фиктивного ЭПС.

Координата фиктивного электроподвижного состава определяется выражением [5]:

$$x = \frac{I_2}{I_1 + I_2} \cdot l_1 + \frac{U_1 - U_2}{r \cdot (I_1 + I_2)} \quad (3')$$

где U_1 , U_2 – напряжение на шинах тяговой подстанции А и на посту секционирования соответственно.

Относительная методическая погрешность метода восстановления поездной ситуации будет иметь вид:

$$\delta = \frac{P - P_{изм}}{P_d} \cdot 100\%. \quad (4)$$

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Выполним расчет методической погрешности по выражению (4) и на основании полученных данных построим график зависимости относительной погрешности измерения от отношения тока ЭПС1 к току ЭПС2 (рисунок 4).

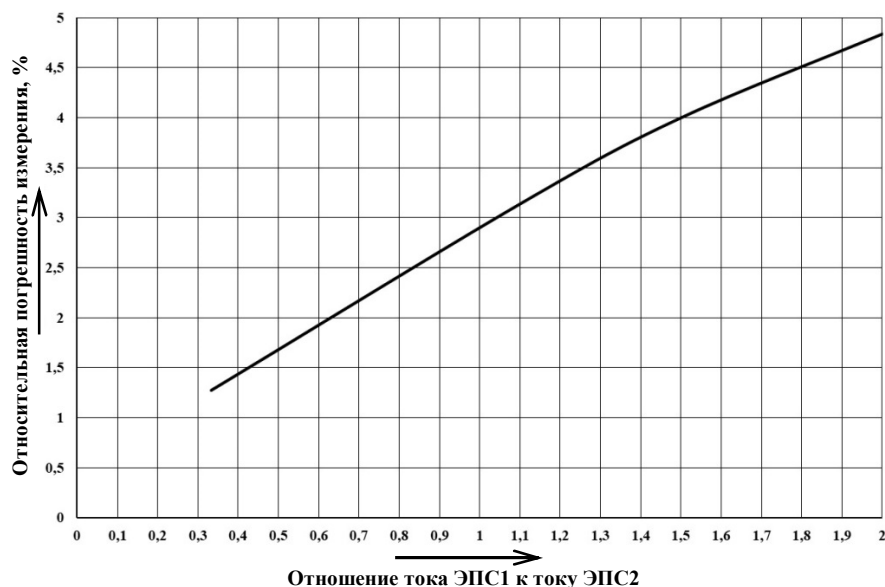


Рисунок 4 – График зависимости модуля среднего значения относительной погрешности от соотношения токов, потребляемых ЭПС1 и ЭПС2 на зоне

Анализируя полученную зависимость, можно сделать следующие выводы. Во-первых, среднее значение методической составляющей относительной погрешности колеблется в весьма узких пределах и даже при значительном отличии величин нагрузок не превышает 5 %. Во-вторых, влияние нагрузок обоих поездов на результирующее значение методической погрешности неодинаково. При условии, что нагрузка, расположенная ближе к питающему центру, будет больше удаленной, значение погрешности будет значительно ниже, чем при их обратном размещении. В-третьих, при наиболее вероятном соотношении значений тяговых нагрузок, когда их величины незначительно отличаются друг от друга, значение методической погрешности не будет превышать 4 %.

Полученные результаты позволяют сделать выводы о величине неопределенности, возникающей при расчете потерь энергии рассмотренным методом. Данная информация необходима для определения границ неисключенной методической погрешности при практическом использовании метода восстановления поездной ситуации на полигоне железных дорог постоянного тока.

Список литературы

1. Хряков, А. А. Расчет расхода электрической энергии в зонах учета электрической тяги постоянного тока с использованием новых технических средств / А. А. Хряков. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2011. – № 2 (6). – С. 42 – 45.
2. Кузнецов, В. Г. Оценка потерь электроэнергии в тяговой сети магистральных железных дорог / В. Г. Кузнецов, Р. С. Мыцко, Д. А. Босый. – Текст : непосредственный // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. – 2007. – № 18. – С. 34 – 37.
3. Патент № 2572797 Российская Федерация. МПК В60М3/00 В60L3/12 G01R21/133. Способ определения технологических потерь электроэнергии в тяговой сети железнодорожного транспорта : № 2014110999/11 : заявлено 21.03.2014 : опубликовано 20.01.2016 / Каштанов А. Л., Незевак В. Л., Никифоров М. М., Ушаков С. Ю., Черемисин В. Т. – 6 с.: ил. – Текст : непосредственный.

4. Патент № 2281518 Российская Федерация. МПК G01R 19/00, B60L 3/00. Способ прямого определения энергии, потребленной электроподвижным составом из тяговой сети : № 2004127967/28 : заявлено 22.09.2004 : опубликовано 10.08.2006 / Гречишников В. А., Федотов А. А., Пупынин В. Н. – 4 с.: ил. – Текст : непосредственный.

5. Осипов, В. А. Методика определения составляющих для построения мгновенной схемы участка железной дороги постоянного тока / В. А. Осипов, П. А. Логунова. – Текст : непосредственный // Вестник РГУПС. – 2019. – № 4 (76). – С. 120 – 126.

6. Метрология / под общ. ред. С. А. Зайцева. – Москва : Форум, 2009. – 464 с. – Текст : непосредственный.

7. Попова, Н. А. Перспективы и тенденции совершенствования устройств тягового электроснабжения в современных условиях эксплуатации / А. Н. Попова, П. А. Бодров, О. В. Кубкина. – Текст : непосредственный // Транспорт: наука, образование, производство : сб. науч. тр. – Т. 3. Технические науки. – Ростов-на-Дону : Ростовский гос. ун-т путей сообщения, 2018. – С. 307 – 310.

8. Лазебник, А. И. Аналитический метод расчета производных от потерь мощности в электрической сети / А. И. Лазебник. – Текст : непосредственный // Применение математических методов и вычислительных машин в энергетике. – Кишинев : АН Молдавской ССР, 1968. – Вып. 2. – С. 16 – 23.

9. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники : учебник / Л. А. Бессонов. – Ленинград : Печатный двор, 1972. – 750 с. – Текст : непосредственный.

10. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог : учебник / К. Г. Марквардт. – Москва : Транспорт, 1965. – 464 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Khryakov A. A. Calculation of electric energy consumption in the areas of electric traction DC with the use of new technical means [Raschet raskhoda elektricheskoy energii v zonakh ucheta elektricheskoy tiagi postoyannogo toka s ispolzovaniem novykh tehnicheskikh sredstv]. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2011, no. 2 (6), pp. 42 – 45.

2. Kuznetsov V. G., Mytsko R. S., Bosy D. A. Estimation of electric power losses in traction network of main Railways [Ocenka poter' elektroenergii v tiagovoy seti magistral'nykh zheleznnykh dorog]. *Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta im. Akademika V. Lazariana – Bulletin of Dnipropetrovsk national University of railway transport. Academician V. Lazaryan*, 2007, no. 18, pp. 34 – 37.

3. Kashtanov A. L., Nezevak V. L., Nikiforov M. M., Ushakov S. J., Cheremisin V. T. *Patent RU № 2014110999/11*, 20.01.2016.

4. Grechishnikov V. A., Fedotov A. A., Pupynin V. N. *Patent RU №2004127967/28*, 10.08.2006.

5. Osipov V. A., Logunova P. A. The method of determining components for building instant diagrams of railway DC [Metodika opredeleniy sostavliayuschikh dlia postroeniya mgnovennoy skhemy uchastka zheleznoy dorogi postoyannogo toka]. *Vestnik RGUPSa – Vestnik RGUPS*, 2019, no. 4 (76), pp. 120 – 126.

6. Zaytsev S. A., Bryuchovets A. A. and others. *Metrologia (Metrology)*. Moscow: Forum Publ., 2009, 464 p.

7. Popova N. A., Bodrov P. A., Kubkina O. V. Prospects and tendencies of improvement of devices of traction power supply in modern operating conditions [Perspektivy i tendencii sovershenstvovaniya ustroystv tiagovogo elektrosnabzheniya v sovremennykh usloviyakh ekspluatatsii]. *Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo: sb. nauch. tr. T. 3. Tekhnicheskie nauki* (Collection of scientific works «Transport: science, education, production», vol. 3, Technical Sciences). – Rostov-on-Don, 2018, pp. 307 – 310.

8. Lazebnik A. I. Analytical method for calculating derivatives of power losses in the electric network [Analiticheskiy metod rascheta proizvodnykh ot poter' moschnosti v elektricheskoy seti]. *Primenenie matematicheskikh metodov i vychislitel'nykh mashin v energetike – Application of*

mathematical methods and computing machines in the energy sector, Kishinev: AN Moldavskoi SSR Publ., 1968, vol. 2, pp. 16 – 23.

9. Bessonov L. A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki: uchebnik* (Theoretical bases of electrotechnology: textbook). Leningrad: Printing yard Publ., 1972, 72 p.

10. Markvardt K. G. *Elektrosnabzhenie elektrificirovannykh zheleznnykh dorog: uchebnik* (Power supply of electrified railways: textbook). Moscow: Transport Publ., 1965, 464 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Осипов Владимир Александрович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретические основы электротехники», РГУПС.

Тел.: (863) 272-65-15.

E-mail: dw_@ramabler.ru

Логунова Полина Александровна

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС).

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

Старший преподаватель кафедры «Теоретические основы электротехники», РГУПС.

Тел.: +7 (903) 474-30-12.

E-mail: polina_buteneva@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Osipov Vladimir Alexandrovich

Rostov State Transport University (RSTU).

2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, Russia, 344038,

Ph. D. in Engineering, Associate professor of the department «Theoretical basis of electrotechnology», RSTU.

Phone: (863) 272-65-15.

E-mail: dw_@ramabler.ru

Logunova Polina Alexandrovna

Rostov State Transport University (RSTU).

2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, Russia, 344038.

Senior teacher of the department «Theoretical basis of electrotechnology», RSTU.

Phone: +7 (903) 474-30-12.

E-mail: polina_buteneva@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Осипов, В. А. Определение методической погрешности при измерении потерь активной энергии в тяговой сети постоянного тока / В. А. Осипов, П. А. Логунова. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 4 (44). – С. 97 – 104.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Osipov V. A., Logunova P. A. Determination of the methodical error in measuring the active energy loss in the DC traction network. Journal of Transsib Railway Studies, 2020, no. 4 (44), pp. 97 – 104 (In Russian).

УДК 656. 073

Ж. Р. Кобулов, Ж. С. Баротов

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

ОРГАНИЗАЦИЯ ДВИЖЕНИЯ СБОРНЫХ ПОЕЗДОВ МЕЖДУ ТЕХНИЧЕСКИМИ СТАНЦИЯМИ ПРИ ДОСТАВКЕ ГРУЗОВ

Аннотация: В статье рассмотрены и проанализированы операции, которые выполняются со сборными поездами на участке, разработана математическая модель, регламентирующая время движения сборных поездов, предложен эффективный метод сокращения времени на передвижение поездов между двумя техническими станциями.

Ключевые слова: железная дорога, техническая станция, промежуточная станция, технологические операции, сборный поезд, доставка грузов.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Анализ показывает, что на сегодняшний день в АО «УТЙ» суточный пробег вагонов при перевозке грузов составляет 175 км, при этом в нормативных документах внутренних перевозок данное расстояние составляет 330 км в сутки. Во время передвижения по участку сборный поезд собирает освободившиеся из-под выгрузки и загруженные вагоны на промежуточных станциях и распределяет вагоны, намеченные для погрузочно-разгрузочных работ.

Сборные поезда, движущиеся в четном и нечетном направлениях согласно обычному графику, условно обозначим при помощи следующих элементов:

m – сборный поезд, движущийся в четном направлении;

n – сборный поезд, движущийся в нечетном направлении ($n \approx m$).

Время, затрачиваемое на операции, выполняемые со сборными поездами на участке, состоит из:

$t_{тр}$ – времени, затрачиваемого на трогание с места и отправление поезда, мин;

$t_{ост}$ – времени, затрачиваемого на остановку и прием поезда, мин;

$t_{проб}$ – пробы автотормозов, мин;

$t_{пр}$ – времени, затрачиваемого на прицепку локомотива к вагонам, мин;

$t_{отц}$ – времени, затрачиваемого на отцепку локомотива от вагонов, мин;

t_x – среднего времени, затраченного сборными поездами на передвижение по перегону в четном и нечетном направлениях, мин.

При передвижении сборных поездов по определенному участку на существующих промежуточных станциях время, затраченное на указанные выше операции, определяется следующим образом:

$$\begin{cases} t^n = t_{пр} + t_{проб} + t_{тр} + t_x + t_{ост} + t_{отц}; \\ t^m = t_{пр} + t_{проб} + t_{тр} + t_x + t_{ост} + t_{отц}, \end{cases} \quad (1)$$

где $t^m \approx t^n$.

Реальный график передвижения сборных поездов между техническими станциями А – Б АО «УТЙ» на сегодняшний день приведен на рисунке 2.

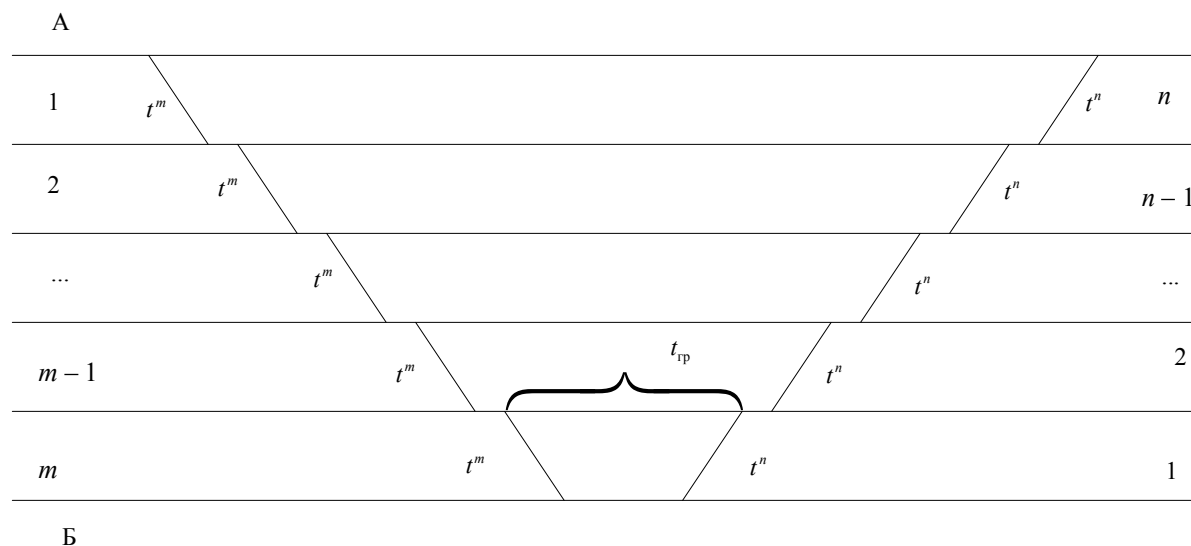


Рисунок 2 – Реальный график передвижения сборных поездов

Для определения времени передвижения сборных поездов по участку для начала вычислим суммарное время. Например, при остановке сборного поезда затрачивается время на отцепку необходимых вагонов и прицепку порожних или загруженных. Здесь мы приводим сумму норм времени, затрачиваемого на выполнение этих операций. После того как сборный

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

поезд вышел из технической станции А, доехал до технической станции Б и после выполнения всех грузовых операций он возвращается на техническую станцию А.

При определении времени передвижения сборных поездов как в нечетном, так и в четном направлениях общую сумму времени передвижения сборных поездов по этим направлениям находим следующим образом:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^n t^{\text{ч}} = t_1 + t_2 + \dots + t_{n-1} + t_n; \\ \sum_{k=1}^m t^{\text{нч}} = t_1 + t_2 + \dots + t_{m-1} + t_m; \end{cases} \quad (2)$$

$$\Theta^1 = \sum_{k=1}^n t^{\text{ч}} + t_{\text{гр}} + \sum_{k=1}^m t^{\text{нч}}, \quad (3)$$

где $\sum_{k=1}^n t^{\text{ч}}$ – сумма времени передвижения сборных поездов в четном направлении;

$\sum_{k=1}^m t^{\text{нч}}$ – сумма времени передвижения сборных поездов в нечетном направлении;

$t_{\text{гр}}$ – время, затраченное на грузовые операции станции;

Θ^1 – сумма времени передвижения сборного поезда до следующей технической станции и возвращения обратно.

Предлагаемый нами график передвижения сборных поездов представлен на рисунке 3.

Согласно предлагаемому графику движения поездов поезд нечетного направления следует до середины участка $[m/2 \approx n/2]$ (до определенной намеченной промежуточной станции) и возвращаются обратно в четном направлении. Вместе с тем сборный поезд четного направления возвращается с намеченной промежуточной станции в нечетном направлении.

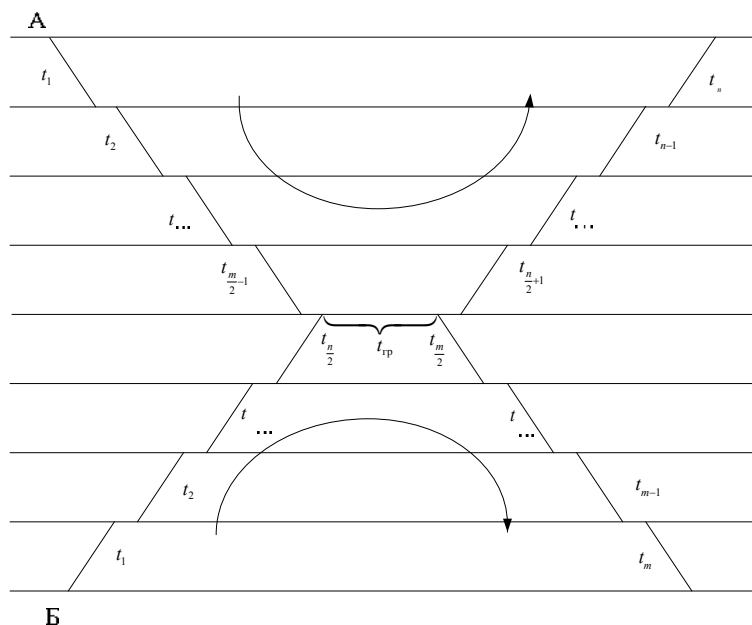


Рисунок 3 – Предлагаемый график эффективного движения сборных поездов

При этом сборный поезд с технической станции развозит вагоны (порожние или груженные) до намеченной промежуточной станции, забирает вагоны с промежуточных станций и вывозит их на техническую станцию. Теперь определим сумму времени передвижения сборных поездов при помощи предлагаемого способа движения поездов.

Определение суммы времени распределения вагонов до намеченной станции в нечетном направлении и времени сбора вагонов в четном направлении осуществляется по формулам:

$$\left\{ \begin{array}{l} t_1^{\text{нч}'} = t_{\text{пр}} + t_{\text{проб}} + t_{\text{тр}} + t_{\text{х}} + t_{\text{ост}} + t_{\text{отц}}; \\ t_2^{\text{нч}'} = t_{\text{проб}} + t_{\text{тр}} + t_{\text{х}} + t_{\text{ост}} + t_{\text{отц}}; \\ t_{\dots}^{\text{нч}'} = t_{\text{проб}} + t_{\text{тр}} + t_{\text{х}} + t_{\text{ост}} + t_{\text{отц}}; \\ t_{\frac{n}{2}}^{\text{нч}'} = t_{\text{проб}} + t_{\text{тр}} + t_{\text{х}} + t_{\text{ост}} + t_{\text{отц}}; \\ t_{\text{гр}}; \\ t_{\frac{m}{2}}^{\text{ч}'} = t_{\text{пр}} + t_{\text{проб}} + t_{\text{тр}} + t_{\text{х}} + t_{\text{ост}}; \\ t_{\dots}^{\text{ч}'} = t_{\text{пр}} + t_{\text{проб}} + t_{\text{тр}} + t_{\text{х}} + t_{\text{ост}}; \\ t_{m-1}^{\text{ч}'} = t_{\text{пр}} + t_{\text{проб}} + t_{\text{тр}} + t_{\text{х}} + t_{\text{ост}}; \\ t_m^{\text{ч}'} = t_{\text{пр}} + t_{\text{проб}} + t_{\text{тр}} + t_{\text{х}} + t_{\text{ост}} + t_{\text{отц}}; \end{array} \right. \quad (4)$$

$$K^{\text{нч}} = t_1^{\text{нч}'} + t_2^{\text{нч}'} + t_{\dots}^{\text{нч}'} + t_{\frac{n}{2}}^{\text{нч}'} + t_{\text{гр}} + t_{\frac{m}{2}}^{\text{ч}'} + t_{\dots}^{\text{ч}'} + t_{m-1}^{\text{ч}'} + t_m^{\text{ч}'} \quad (5)$$

Согласно формулам (5) определим сумму времени движения сборного поезда от станции Б до намеченной станции в четном направлении и возвращения в нечетном направлении:

$$\left\{ \begin{array}{l} t_1^{\text{ч}'} = t_{\text{пр}} + t_{\text{проб}} + t_{\text{тр}} + t_{\text{х}} + t_{\text{ост}} + t_{\text{отц}}; \\ t_2^{\text{ч}'} = t_{\text{проб}} + t_{\text{тр}} + t_{\text{х}} + t_{\text{ост}} + t_{\text{отц}}; \\ t_{\dots}^{\text{ч}'} = t_{\text{проб}} + t_{\text{тр}} + t_{\text{х}} + t_{\text{ост}} + t_{\text{отц}}; \\ t_{\frac{m}{2}-1}^{\text{ч}'} = t_{\text{пр}} + t_{\text{проб}} + t_{\text{тр}} + t_{\text{х}} + t_{\text{ост}}; \\ t_{\text{гр}}; \\ t_{\frac{n}{2}+1}^{\text{нч}'} = t_{\text{проб}} + t_{\text{тр}} + t_{\text{х}} + t_{\text{ост}} + t_{\text{отц}}; \\ t_{\dots}^{\text{нч}'} = t_{\text{пр}} + t_{\text{проб}} + t_{\text{тр}} + t_{\text{х}} + t_{\text{ост}}; \\ t_{n-1}^{\text{нч}'} = t_{\text{пр}} + t_{\text{проб}} + t_{\text{тр}} + t_{\text{х}} + t_{\text{ост}}; \\ t_n^{\text{нч}'} = t_{\text{пр}} + t_{\text{проб}} + t_{\text{тр}} + t_{\text{х}} + t_{\text{ост}} + t_{\text{отц}}; \end{array} \right. \quad (6)$$

$$K^{\text{ч}} = t_1^{\text{ч}'} + t_2^{\text{ч}'} + t_{\dots}^{\text{ч}'} + t_{\frac{m}{2}-1}^{\text{ч}'} + t_{\text{гр}} + t_{\frac{n}{2}+1}^{\text{нч}'} + t_{\dots}^{\text{нч}'} + t_{n-1}^{\text{нч}'} + t_n^{\text{нч}'}; \quad (7)$$

$$\mathcal{Z}^2 = K^{\text{нч}} + K^{\text{ч}}, \quad (8)$$

где $\mathcal{Z}^2$ – общее время, затрачиваемое на передвижение сборных поездов в четном и нечетном направлениях.

Здесь в основном учитывается время, затрачиваемое на отцепку вагонов $t_{\text{отц}}$ от сборного поезда на промежуточных станциях на пути от технической станции А к намеченной

станции, а также время, затрачиваемое на трогание поезда с места $t_{тр}$, время, затрачиваемое на остановку поезда $t_{ост}$, и время на передвижение по перегону t_x , однако в данном случае не учитывается время прицепки вагонов $t_{пр}$. После выполнения на намеченной промежуточной станции погрузочно-разгрузочных работ со сборным поездом он начинает движение в сторону технической станции А, при этом сборный поезд прицепляет и вывозит порожние и загруженные вагоны с попутных промежуточных станций. При возвращении сборного поезда подсчитываются время на прицепку вагонов $t_{пр}$, время на трогание с места $t_{тр}$, время остановки и время на передвижение по перегону t_x , но не учитывается время на отцепку вагонов $t_{отц}$. Точно так же сборный поезд, следующий с технической станции Б, возвращается назад, доехав при этом до намеченной промежуточной станции.

При передвижении сборных поездов до определенной станции постараемся эффективно воспользоваться временем прицепки вагонов, а при возвращении также с пользой используем время отцепки вагонов, т. е. $\min \Theta^2 < \min \Theta^1$.

Как видно из графика на рисунке 4, при данном способе в отличие от предлагаемого способа во время передвижения сборных поездов при прицепке и отцепке во время маневровых операций, т. е. при работах по прицепке и отцепке вагонов на каждой промежуточной станции, непроизводительно используется данное время для маневровых работ.

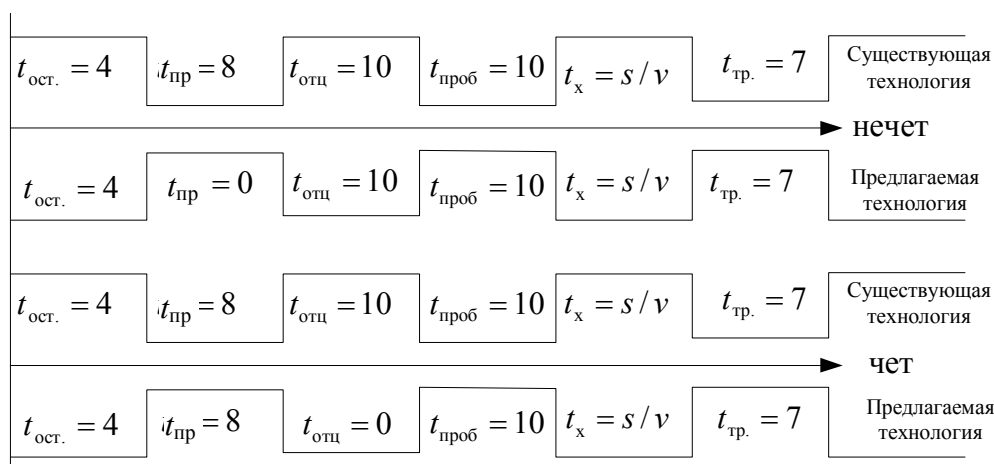


Рисунок 4 – Экономическая оценка обработки сборного поезда на промежуточной станции и участке

При предлагаемом способе два поездных локомотива двигаются по участку навстречу друг другу. При этом поезд доезжает до намеченной станции и возвращается обратно, по дороге распределяя вагоны по промежуточным станциям, а на обратном пути собирает их снова с этих станций. Из этого ясно, что если поезд будет двигаться по нечетному направлению, то он сэкономит время на прицепку вагонов $\sum t_{пр}$, а при движении от намеченной станции по четному направлению время на отцепку этих вагонов $\sum t_{отц}$.

Список литературы

1. Государственный комитет Республики Узбекистан по статистике : официальный сайт. – Текст : электронный. – URL : www.stat.uz (дата обращения: 23.10.2020).
2. Котенко, А. Г. Методология риск-ориентированного планирования качественных показателей эксплуатационной работы железных дорог : специальность 05.22.08 «Управление процессами перевозок» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Котенко Алексей Геннадьевич ; Петербургский гос. ун-т путей сообщения Императора Александра I. – Санкт-Петербург, 2014. – 330 с. – Текст : непосредственный.

3. Батури́н, А. П. Оптимальная схема прокладки сборных поездов / А. П. Батури́н, П. В. Никитин. – Текст : непосредственный // Мир транспорта. – 2013. – Т. 11. – № 3 (47). – С. 128 – 134.
4. Нурмухамедов, Р. З. Управление эксплуатационной работой железных дорог : учебное пособие / Р. З. Нурмухамедов. – Ташкент : Укитувчи, 1990. – 416 с. – Текст : непосредственный.
5. Кобулов, Ж. Р. Нормирование времени отправления грузовых вагонов со станций и оптимизация сроков доставки / Ж. Р. Кобулов, Ж. С. Баротов. – Текст : непосредственный // Вестник ТашИИТа. – 2019. – № 2. – С. 92 – 97.
6. Кобулов, Ж. Р. Эффективные способы эксплуатации вагонов на железнодорожном транспорте / Ж. Р. Кобулов, Ж. С. Баротов. – Текст : непосредственный // Вестник ТАДИ. – 2019. – № 1. – С. 92 – 97.
7. Определение причины потерь, влияющих на величину времени нахождения вагонов на станции / Д. Б. Бутунов, Ж. С. Баротов [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник ТАДИ. – 2019. – № 2. – С. 89 – 98.
8. Kobulov J. R., Barotov J. S. The Development Model of Dispatching Wagons from Stations. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*, 2019, vol. 6, Issue 5, pp. 9460 – 9466.
9. Kobulov J. R., Mukhamedova Z. G., Barotov J. S. Regulation of departure time of freight wagons from stations and optimization of delivery time of freight wagons from stations. *Science research development*, Barcelona, 2019, pp. 303 – 307.
10. Бутунов, Д. Б. Анализ времени нахождения транзитных вагонов с переработкой в парке приема и горки станции / Д. Б. Бутунов, Ж. С. Баротов. – Текст : непосредственный // Вестник Туринского политехнического университета в городе Ташкенте. – 2019. – № 1. – С. 115 – 119.
11. Кобулов, Ж. Р. Обоснование рационального способа использования рефрижераторного вагона / Ж. Р. Кобулов, Ж. С. Баротов. – Текст : непосредственный // Логистика: современные тенденции развития : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Санкт-Петербург : Гос ун-т морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, 2018. – Ч. 1. – С. 228 – 230.
12. Кобулов, Ж. Р. Систематизация основных факторов, влияющих на скорость охлаждения плодоовощей в рефрижераторных вагонах / Ж. Р. Кобулов. – Текст : непосредственный // Транспорт: наука, образование, производство : труды междунар. науч.-практ. конф. – Ростов-на-Дону : Ростовский гос. ун-т путей сообщения, 2016. – С. 91 – 93.

References

1. Gosudarstvennyi komitet Respubliki Uzbekistan po statistike (The State Committee of the Republic of Uzbekistan on Statistics), Available at: www.stat.uz (accessed 23 October 2020).
2. Kotenko A. G. *Metodologiya risk-orientirovannogo planirovaniya kachestvennih pokazateley ekspluatatsionnoy raboty jeleznix dorog* (Methodology of risk-based planning of Quality indicators of operational work of railways). Doctor's thesis, St. Petersburg, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 2014, 329 p.
3. Baturin A. P., Nikitin P. V. The optimal scheme for laying combined trains [Optimalnaya sxema prokladki sbornih poezdov]. *Mir transporta – World of Transport and Transportation*, 2013, vol. 11, no. 3 (47), pp. 128 – 134.
4. Nurmukhamedov R. Z. *Upravlenie ekspluatatsionnoy rabotoy jeleznix dorog: uchebnoe posobie* (Operational management of railways: training manual). Tashkent: Ukituvchi Publ., 1990, 416 p.
5. Kobulov J. R., Barotov J. S. Rationing the time of departure of freight cars from stations and optimizing delivery times [Normirovanie vremeni otpravleniya gruzovix vagonov so stanciy i optimizatsiya srokov dostavki]. *Vestnik TashIITa – Bulletin of Tashkent Institute of railway engineers*, 2019, no. 2, pp. 92 – 97.
6. Kobulov J. R., Barotov J. S. Effective ways to operate cars in railway transport [Effektivnie sposobi ekspluatatsii vagonov na jeleznodorojnom transporte]. *Vestnik TADI – Bulletin of Official*

website of the Tashkent institut of design, construction and maintenance of automobile roads, 2019, no. 1, pp. 92 – 97.

7. Butunov D. B., Barotov J. S., Kobulov J. R., Juraboev K. A. Determining the causes of losses affecting the amount of time the cars are at the station [Opređenje prichini poter, vliyayushie na velichinu vremeni nahojdeniya vagonov na stancii]. *Vestnik TADI – Bulletin of Official website of the Tashkent institut of design, construction and maintenance of automobile roads*, 2019, no. 2, pp. 89 – 98.

8. Kobulov J. R., Barotov J. S. The Development Model of Dispatching Wagons from Stations. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*, 2019, vol. 6, Issue 5, pp. 9460 – 9466.

9. Kobulov J. R., Mukhamedova Z. G., Barotov J. S. Regulation of departure time of freight wagons from stations and optimization of delivery time of freight wagons from stations. *Science research development*, Barcelona, 2019, pp. 303 – 307.

10. Butunov D. B., Barotov J. S. Analysis of the transit time of transit cars with processing in the reception park and slides of the station [Analiz vremeni nahojdeniya tranzitnix vagonov s pererabotkoy v parke priema i gorki stancii]. *Vestnik Turinskogo politekhnicheskogo universiteta v gorode Tashkente – Bulletin of Turen polytechnic univerity in Tashkent*, 2019, no. 1, pp. 115 – 119.

11. Kobulov J. R., Barotov J. S. Justification of a rational method of using a refrigerated car [Obosnovanie ratsionalnogo sposoba ispolzovaniya refrijeratornogo vagona]. *Logistika: sovremennye tendentsii razvitiia: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* (Logistics: modern development trends: materials of the international scientific and practical conference). – Saint-Petersburg, 2018, Part 1, pp. 228 – 230.

12. Kobulov J. R. Systematization of the main factors affecting the cooling rate of fruits and vegetables in refrigerated wagons [Sistematizatsiya osnovnix faktorov, vliyayushix na skorost oxlajdeniya plodoovoshey v refrijeratornix vagonax]. *Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo: trudy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* (Transport: science, education, production: proceedings of the international scientific and practical conference). – Rostov-on-Don, 2016, pp. 91 – 93.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кобулов Жамшид Ренатович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТРУ).

1-й пр. Темирийулчилар ул., д. 1, г. Ташкент, 100167, Республика Узбекистан.

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

Тел. + 998-93-534-16-26.

E-mail: jam.uzb@mail.ru

Баротов Жамшид Сайфуллаевич

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТРУ).

1-й пр. Темирийулчилар ул., д. 1, г. Ташкент, 100167, Республика Узбекистан.

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

Тел. + 998-91-778-10-11.

E-mail: jamshid-uzb92@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Кобулов, Ж. Р. Организация движения сборных поездов между техническими станциями при доставке грузов / Ж. Р. Кобулов, Ж. С. Баротов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 4 (44). – С. 104 – 111.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kobulov Jamshid Renatovich

Tashkent State Transport University (TSTU).

Temiryo'chilar 1-tor kycha, 1, Tashkent, 100167, Uzbekistan.

Ph. D. in Engineering, Associate professor of the department «Transport and cargo systems», TSTU.

Phone: + 998-93-534-16-26.

E-mail: jam.uzb@mail.ru

Barotov Jamshid Sayfullayevich

Tashkent State Transport University (TSTU).

Temiryo'chilar 1-tor kycha, 1, Tashkent, 100167, Uzbekistan.

Ph. D. in Engineering, Associate professor of the department «Transport and cargo systems», TSTU.

Phone: + 998-91-778-10-11.

E-mail: jamshid-uzb92@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kobulov J. R., Barotov J. S. Organization of traffic of assembled trains between technical stations for delivery of goods. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2020, no. 4 (44), pp. 104 – 111 (In Russian).

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОЧИСТКИ ЩЕБНЯ БАЛЛАСТНОЙ ПРИЗМЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПУТЕЙ ОТ НЕФТЕПРОДУКТОВ ЩЕБНЕОЧИСТИТЕЛЬНОЙ МАШИНОЙ

Аннотация. Рассмотрено влияние нефтяного загрязнения на балластную призму железнодорожного пути, а именно влияние нефти и нефтепродуктов на поддержание рельсоопорной решетки, восприятие нагрузок от подвижного состава, фильтрацию талого и дождевого стока. Нефтяное загрязнение балластной призмы приводит к увеличению его распространения в окружающей среде. Нефть и нефтепродукты оказывают сильное негативное воздействие на окружающую среду, которое приводит к деградации растительного покрова. Определены причины возникновения нефтяного загрязнения балластной призмы, которые приводят к нарушению ее функций. Уделено внимание повышению влажности балластной призмы в зимний период времени, что приводит к промерзанию балласта и увеличению жесткости пути. Рассмотрен способ очистки щебня щебнеочистительной машиной и выявлены его недостатки. Проведены исследования эффективности отмычки нефтезагрязненного щебня балластной призмы моющим средством О-БИСМ при отсутствии механического воздействия на образец, а также с применением барбатирувания и перемешивания образца. Установлен рекомендуемый технологический режим применения моющего раствора.

Для решения проблемы эффективной очистки щебнеочистительного слоя балластной призмы от нефтяного загрязнения предложен вариант усовершенствования очистки щебня от нефтепродуктов щебнеочистительной машиной, позволяющий решить проблему вторичного использования щебня и его утилизации.

Ключевые слова: балластная призма, нефтяное загрязнение, влажность балластной призмы, верхнее строение пути, геометрические неровности, нефтяная пленка, моющее средство О-БИСМ, щебнеочистительная машина.

Alexander M. Asonov, Ivan I. Kuznetsov

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

IMPROVEMENT OF CLEANING OF BALLAST BED RAILWAYS FROM OIL PRODUCTS BY THE GRADDER WASHER

Abstract: Examined the effect of oil pollution on the ballast bed of the railway track, namely, the effect of oil and oil products on the following functions performed by the ballast bed: maintenance of the rail-sleeper grid, perception of loads from rolling stock, filtration of melt and rainwater. Ballast oil pollution leads to an increase in its distribution in the environment. Oil and oil products have a strong negative impact on the environment, which leads to degradation of vegetation. The causes of oil contamination of the ballast bed, which lead to disruption of its functions, are determined. Attention to increasing the humidity of the ballast in the wintertime, which leads to freezing of the ballast and an increase in the stiffness of the path. Considered a method for cleaning gravel with a gravel-cleaning machine and revealed shortcomings. Studies of the effectiveness of washing oil-contaminated ballast gravel with O-BISM detergent in the absence of mechanical influence on the sample, as well as with the use of barbation and mixing of the sample. The optimal technological mode of application of the washing solution is established.

Proposed an option for improving the cleaning of ballast gravel from oil products with a gravel-cleaning machine to solve the problem of efficiently cleaning the ballast gravel from oil pollution, which will solve the problem of crushed stone reuse and utilization.

Keywords: ballast bed, oil pollution, moisture of the ballast bed, track structure, geometric and power irregularities, oil film, O-BISM detergent, gravel-cleaning machine.

Зачастую транспортировка нефтепродуктов по железной дороге приводит к загрязнению верхнего строения пути этими продуктами, особенно пагубное влияние нефтепродукты оказывают на несущую способность щебнеочистительного балласта. Эксплуатационная длина железнодорожных путей на территории Российской Федерации составляет 85,6 тыс. км, при этом протяженность электрифицированных линий составляет 43,8 тыс. км [1].

Образовавшаяся на поверхности зерен щебня нефтяная пленка приводит к снижению сцепления зерен между собой. Накопившиеся в ходе адгезии на поверхности нефтяной плен-

ки мелкие загрязнения приводят к разрушению балластной призмы и к снижению устойчивости восприятия нагрузок от верхнего строения пути, что сокращает срок его эксплуатации, особенно в трудных участках. Количество нефтепродуктов может достигать 20 г и более на 1 кг грунта [2].

Загрязнение балластного слоя может влиять на увеличение жесткости балласта и на сдвиг балластной призмы, но при этом сокращаются пустотные расстояния между зерен щебня, что влияет на снижение эластичности балластной призмы. В связи с этим осуществляется восстановление физико-механических характеристик балластной призмы методом очистки щебеночного слоя [3] или при несоответствии качества щебеночного балласта необходимо заменять его на новый, что требует большого количества щебня и эксплуатационных затрат.

Нефтяное загрязнение снижает эффективность отвода воды из слоев балластной призмы железнодорожного пути, это влияет на повышение влажности, из-за которой ухудшается несущая способность балластного слоя, при этом увеличение влажности более чем на 56 % приводит к увеличению деформации пути в пять – семь раз [4].

При воздействии непродессоренных масс и колебаний наддрессорного строения образовавшиеся неровности на железнодорожном полотне влияют на увеличение суммарных продольных, поперечных и вертикальных сил в результате взаимодействия колеса и рельса [5]. Движение с большими скоростями приводит к воздействию возникающих нагрузок на пару тонких рельсовых нитей, погруженных в насыпной балластный материал.

В зимние периоды времени повышенная влажность балласта влияет на его промерзание, в результате этого повышается жесткость пути. Значительное содержание замерзшей воды влияет на искажение профиля пути и увеличение ударнодинамических воздействий [6]. В весенний период времени образуются пучины при оттаивании замерзшей воды в слоях балластного материала.

Стоит отметить, что нарушение фильтрационной способности балластного материала приводит к смыву нефтепродуктов и других загрязнений вместе с талым и дождевым стоком в водные объекты, а также на прилегающие территории.

Щебеночный слой балластной призмы железнодорожных путей очищается щебнеочистительными машинами, которые в основном очищают только от крупных загрязнений, при этом нефтяная пленка, образовавшаяся на зерне щебня, не разрушается. Взвешенные вещества, накопившиеся при адгезии на поверхности нефтяной пленки, не отрываются.

Качество очистки щебня щебнеочистительной машиной характеризуется коэффициентом эффективности, зависимым от влажности щебеночной подушки, приводящей к слипанию мелких частиц засорителя и к налипанию их на зерна щебня, вследствие этого снижается эффективность очистки по причине забивания отверстий просеивающей поверхности [7].

В случае сильного загрязнения балластной призмы осуществляется замена щебеночной подушки на щебень [8], соответствующий ГОСТ 7392-2002 [9], что приводит к необходимости разрушения горных массивов.

Использованный нефтезагрязненный щебень изымается из балластной призмы и транспортируется на захоронение, это оказывает существенное влияние на дальнейшее распространение загрязнения в окружающей среде.

Для решения стоящих перед отраслью технической и экологической проблем следует признать необходимость использования щебеночной подушки железнодорожного полотна в рециклированном виде.

Нами рассмотрена возможность применения моющего средства О-БИСМ (отмыватель безотходный самоочищающийся модифицированный) с целью повышения эффективности очистки насыпного балластного материала щебня от нефтяного загрязнения.

Основным свойством данного моющего средства, кроме моющих, является свойство не растворять в себе нефтепродукты, что позволяет использовать моечный раствор продолжительное время без его замены на свежий.

Для проведения исследований была предусмотрена десорбция нефтепродуктов с использованием четыреххлористого углерода с целью определения количества нефтепродуктов, находящихся на поверхности щебня. Установлено, что на 1 г сухого вещества щебня приходится 0,0014 г нефтепродуктов.

Очистка образца осуществлялась при следующих параметрах: время проведения исследований в течение 10 – 60 мин, температура раствора 45 – 60 °С с шагом в 5 °С, концентрация О-БИСМ 2 – 3,5 % с шагом 0,5 % [3], эффективность качества очистки моющим средством контролировалась четыреххлористым углеродом [10].

Определение эффективности очистки зерна щебня от нефтепродуктов осуществлялось при использовании предварительно подготовленного нефтезагрязненного образца, взятого с железнодорожной призмы станции Решеты Первоуральского городского округа Свердловской области.

Для проведения исследований зерно щебня помещалось в колбу и заливалось моющим раствором О-БИСМ. Образец выдерживался в моющем растворе в течение установленного времени без применения механического воздействия, температура моющего раствора поддерживалась постоянно.

Раствор, полученный в результате очистки образца, профильтровывался и переливался в делительную колбу, в которую для экстракции отмытых нефтепродуктов заливался четыреххлористый углерод объемом 50 мл, после этого производилось перемешивание растворов в колбе в течение 5 мин.

После перемешивания образовавшийся раствор в ходе его отстаивания разделился на две части: нижняя часть – раствор четыреххлористого углерода и экстрагированные в нем нефтепродукты, верхняя часть – моющий раствор О-БИСМ.

Для полной экстракции нефтепродуктов из полученного раствора описанная выше операция с применением чистого четыреххлористого углерода проводилась до полного экстрагирования всех нефтепродуктов. Выделение нефтепродуктов из экстрагента осуществлялось способом выпаривания экстрагента через холодильник.

В таблице 1 представлены результаты проведенных исследований при концентрации О-БИСМ 3,5 % и температуре моющего раствора 60 °С.

Таблица 1 – Результаты проведения исследований при концентрации О-БИСМ 3,5 % и температуре моющего раствора 60 °С

№ п/п	Время очистки образца моющим средством, мин	Исходный вес нефтезагрязненного зерна щебня до очистки, г	Вес зерна щебня после очистки моющим средством, г	Количество отмытых нефтепродуктов моющим средством О-БИСМ, г	Количество нефтепродуктов, приходящееся на 1 г сухого вещества щебня	Эффективность очистки образца от нефтепродуктов моющим средством О-БИСМ
1	10	151,2318	150,9920	0,15503	0,001027	73,34
2	20	129,8523	129,5736	0,15650	0,001208	86,27
3	30	139,2556	138,9718	0,1869	0,001345	96,06
4	60	119,6756	119,3675	0,16524	0,001380	98,88

На графике, приведенном на рисунке 1, представлена зависимость интенсивности роста эффективности очистки зерна щебня при концентрации О-БИСМ 3,5 % и температуре моющего раствора 60 °С от времени проведения исследования.

По графику зависимости интенсивности роста эффективности очистки (см. рисунок 1) установлено, что в течение первых 20 мин проведения исследования рост эффективности очистки интенсивен, а после этого интенсивность роста снижается. Соответственно в качестве рекомендованного времени очистки моющим средством О-БИСМ выбрано 20 мин.

Аналогичным способом были проведены исследования по очистке образца при изменении температуры с шагом в 5 °С, концентрации моющего раствора с шагом 0,5 % и времени проведения исследования при экспозиции 10 мин.

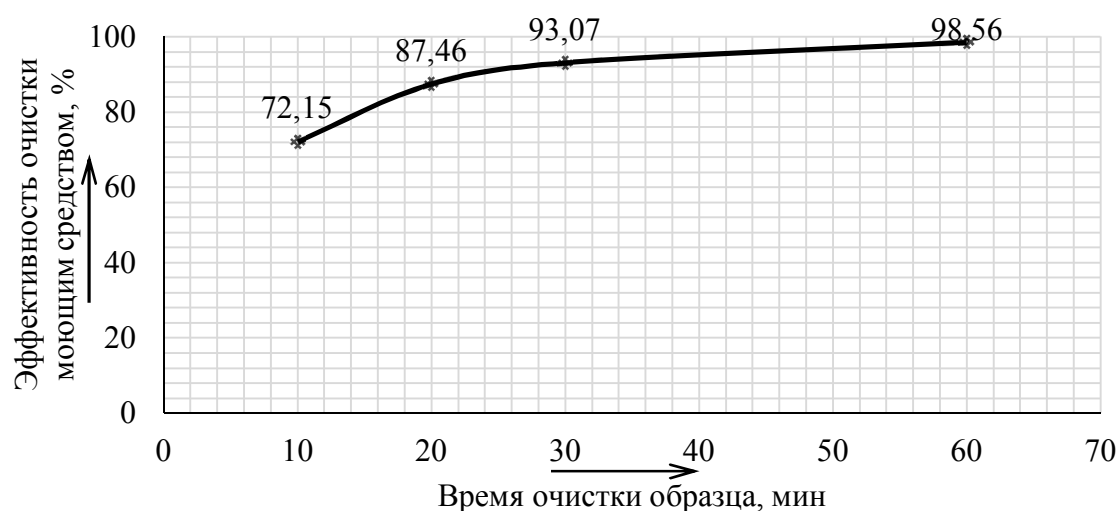


Рисунок 1 – Зависимость эффективности очистки образца от времени проведения исследования

На рисунке 2 представлен сводный график эффективности очистки нефтепродуктов раствором О-БИСМ при отсутствии физического воздействия.

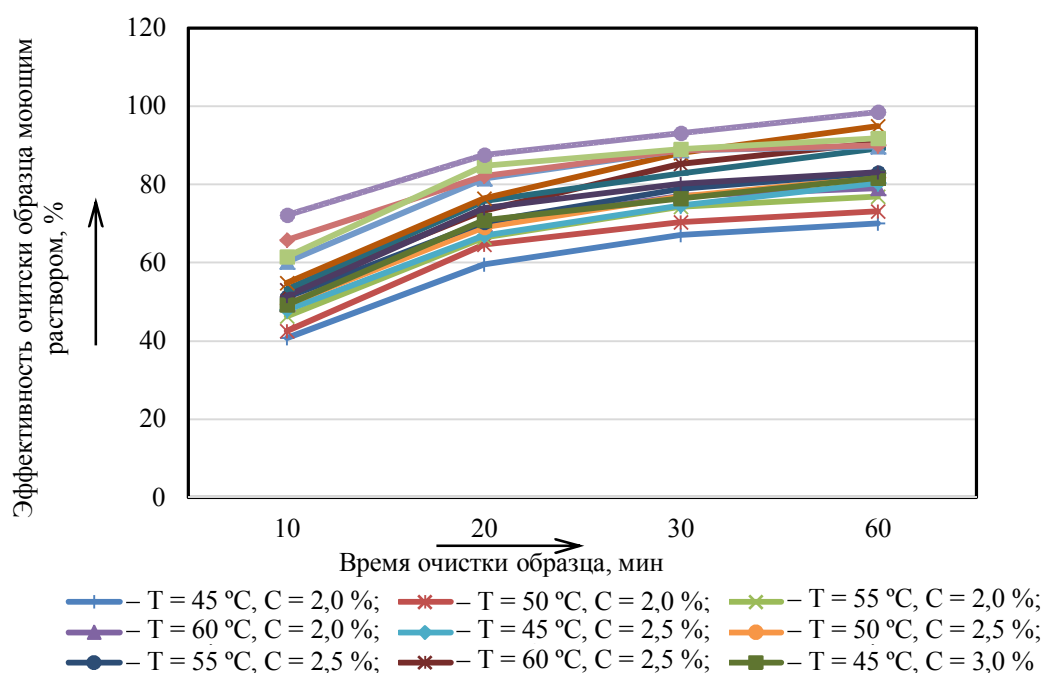


Рисунок 2 – Эффективность очистки нефтепродуктов с поверхности щебня раствором О-БИСМ

Рекомендуемая концентрация моющего раствора установлена по графику средних значений эффективности очистки (рисунок 3).

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

По рисунку 3 установлено, что график средней концентрации пересекает график при 3,0 %-ной концентрации моющего средства. Следовательно, за рекомендуемую концентрацию моющего средства принята концентрация в 3,0 %.

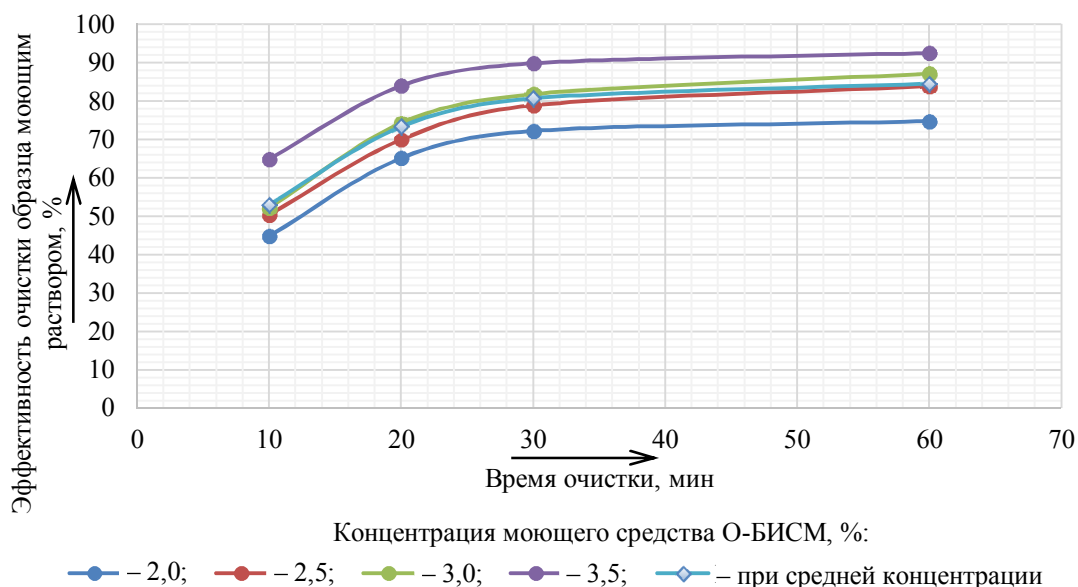


Рисунок 3 – Зависимость средней эффективности очистки по концентрациям моющего раствора и времени проведения исследования

Установлено, что при 50 °С температуры раствора О-БИСМ интенсивность роста эффективности очистки снижается, соответственно за рекомендуемую температуру моющего раствора выбрано 50 °С.

Проведение исследований в условиях барботирования и перемешивания образца в растворе осуществлялось при рекомендуемом режиме применения моющего средства.

Исследование воздействия барбатирования на эффективность очистки образца проходило при помощи использования системы подачи воздуха от компрессора, перемешивание образца в моющем растворе проходило при помощи механического стержня. Результаты исследований влияния барбатирования и перемешивания образца в растворе О-БИСМ на эффективность очистки приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Исследование очистки нефтезагрязненного зерна щебня моющим раствором О-БИСМ при применении физического воздействия

Время проведения исследования очистки, мин	Вес нефтезагрязненного образца, г	Сорбционная емкость образца по н/п, мг/г	Вес выделенных н/п, мг	Вес н/п на образце после очистки, мг	Эффективность, %
Применение системы перемешивания образца в растворе					
10	129,7805	0,0014	0,1156	0,0643	64,28
20	129,5219	0,0014	0,15963	0,0219	87,91
Применение системы барботажа					
10	135,0652	0,0014	0,1038	0,0853	54,91
20	134,7848	0,0014	0,1452	0,0437	76,85

Согласно данным, представленным в таблице 2, очистка нефтепродуктов эффективнее при применении системы перемешивания. Для наибольшей эффективности процесс очистки нефтезагрязненного щебня необходимо осуществлять при помощи перемешивания его в растворе О-БИСМ.

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Для применения данного способа очистки нефтезагрязненного щебня предполагается усовершенствование щебнеочистительной машины барабаном и системой очистки.

Просеянные зерна щебня от крупных загрязнений на грохотах щебнеочистительной машины поступают в барабан с моющим раствором, в котором при перемешивании и соприкосновения зерен щебня друг с другом осуществляется очистка. После барабана щебень выгружается и распределяется на конвейерную ленту для укладки в путь.

Загрязненный раствор, образовавшийся после очистки, направляется в установленный в щебнеочистительной машине горизонтальный отстойник, оборудованный тонкослойными модулями для выделения взвешенных частиц и нефтепродуктов. Очищенный раствор после горизонтального отстойника направляется обратно в барабан для повторной очистки, что позволит создать закрытую циклическую систему очистки щебня от нефтепродуктов.

Показатели экономической эффективности при внедрении предлагаемой технологии очистки нефтезагрязненного щебня представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Показатели экономической эффективности предлагаемой технологии

Экономический показатель	Единица измерения	Значение показателя
Полный экономический результат	тыс. руб.	1737,191
Капитальные затраты	тыс. руб.	1556
Эксплуатационные расходы	тыс. руб.	1311,524
Чистый экономический эффект	тыс. руб.	176,707
Экономическая эффективность капитальных вложений	–	0,27
Срок окупаемости	лет	3 г. 8 мес.

Использование О-БИСМ позволит решить проблему повторного использования щебня при восстановлении щебеночного слоя балластной призмы железнодорожного полотна, снизить затраты на закупку нового щебня и его транспортировку к месту укладки в путь. Помимо этого будет решена проблема утилизации нефтезагрязненного щебня, непригодного для использования в железнодорожном полотне в связи с утратой им необходимых геометрических характеристик.

Список литературы

1. ОАО «РЖД»: Официальный сайт. – Текст : электронный. – URL : <http://www.rzd.ru/static/public/> (дата обращения: 24.07.2020).
2. Парамонова, И. Е. Деструкция нефтяных углеводородов биопрепаратами в зависимости от типа почв и различного уровня загрязнения нефтью / И. Е. Парамонова, А. Б. Кравченко. – Текст : непосредственный // Биотехнология. Теория и практика. – 2010. – № 4. – С. 54 – 63.
3. Кузнецов, И. И. Рециклирование замазученного щебня балластной призмы железнодорожных путей / И. И. Кузнецов, А. М. Асонов. – Текст : непосредственный // Экологическая безопасность в техносферном пространстве : сборник материалов науч.-практ. конф. – Екатеринбург : Российский гос. профессионально-педагогический ун-т, 2019. – С. 179 – 184.
4. Краснов, О. Г. Повышение эффективности глубокой очистки балласта железнодорожного пути совершенствованием щебнеочистительных устройств : специальность 05.22.06 «Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Краснов Олег Геннадьевич ; Петербургский гос. ун-т путей сообщения Императора Александра I. – Санкт-Петербург, 2002. – 18 с. – Текст : непосредственный.
5. Аккерман, Г. Л. Цифровизация при проектировании криволинейных участков / Г. Л. Аккерман, С. Г. Аккерман, Д. В. Каргапольцев. – Текст : непосредственный // Путь и путевое хозяйство. – 2020. – № 3. – С. 37 – 40.

6. Железнодорожный путь : учебник / Е. С. Ашпиз, А. И. Гасанов [и др.] ; под ред. Е. С. Ашпица. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2013. – 544 с. – Текст : непосредственный.
7. Машины для очистки щебеночного балласта нового поколения. Конструкция, расчет : учебное пособие / В. Ф. Ковальский, А. Н. Неклюдов [и др.] ; под ред. В. Ф. Ковальского. – Москва : Московский гос. ун-т путей сообщения, 2009. – 111 с. – Текст : непосредственный.
8. Луценко, А. Н. Пути снижения загрязнения железнодорожного полотна в Дальневосточном регионе / А. Н. Луценко, В. Д. Катин. – Текст : непосредственный // Вестник ВСГУТУ. – 2013. – № 3 (42). – С. 187 – 192.
9. ГОСТ 7392-2002. Щебень из плотных горных пород для балластного слоя железнодорожного пути. Технические условия. – Москва : Центр проектной продукции, 2003. – 15 с. – Текст : непосредственный.
10. Кузнецов, И. И. Перспектива использования моющего средства О-БИСМ в качестве реагента для регенерации нефтезамазученного щебня балластной призмы железнодорожных путей / И. И. Кузнецов, А. М. Асонов. – Текст : непосредственный // Перспектива : сборник науч. тр. студентов. – Екатеринбург : Уральский гос. ун-т путей сообщения, 2018. – Вып. 2 (233). – С. 84 – 91.

References

1. *Ofitsalnii sait OAO «RJD»* (The official website of Russian Railways), Available at: <http://www.rzd.ru/static/public/> (accessed 02 November 2020).
2. Paramonova I. E., Kravchenko A. B. Destruction of petroleum hydrocarbons by biological products depending on the type of soil and different levels of oil pollution [Destruktsiya neftyanikh uglevodorodov biopreparatami v zavisimosti ot tipa pochvy i razlichnogo urovnya zagryazneniya neftyu]. *Biotehnologiya. Teoriia i praktika – Biotechnology. Theory and practice*, 2010, no. 4, pp. 54 – 63.
3. Kuznetsov I. I., Asonov A. M. Recycling of oiled crushed stone ballast prism of railway tracks [Retsiklirovanie zamazuchennogo shebya ballastnoi prizmi zheleznodorozhnykh putei]. *Ekologicheskaya bezopasnost' v tekhnosfernom prostranstve: sbornik materialov nauchno-prakticheskoi konferentsii* (Environmental safety in the technosphere space: collection of materials of the scientific and practical conference of young scientists and students). – Yekaterinburg: RGPPU Publ., 2019, 335 p.
4. Krasnov O. G. *Povishenie effektivnosti glubokoi ochistki ballasta zheleznodorozhnogo puti sovershenstvovaniem shebneochistitelnykh ustroystv* (Increasing the efficiency of deep cleaning of ballast of a railway track by improving crushed stone cleaning devices). Ph. D. in Engineering thesis abstract, Saint-Petersburg, PGUPS, 2002, 18 p.
5. Akkerman G. L., Akkerman S. G., Kargapol'tsev D. V. Digitalization in the design of curvilinear sections [Tsifrovizatsiya pri proektirovanii krivoliniinykh uchastkov]. *Put' i putevye khoziaistvo – Railway Track and Facilities*, 2020, no. 3, pp. 37 – 40.
6. Ashpiz E. S., Hasanov A. I., Glusberg B. E. and others. *Zheleznodorozhnyy put': uchebnik* (Railway track: textbook). Moscow: Educational-methodical center for education in railway transport Publ., 2013, 544 p.
7. Kovalsky V. F., Neklyudov A. N., Kovalsky S. V., Chalova M. Yu. *Mashiny dlya ochistki shchebenochnogo ballasta novogo pokaleniya. Konstruktsiya, raschet: uchebnoye posobie* (Machines for cleaning new generation of crushed stone ballast. Design, calculation: training manual). Moscow: MIIT Publ., 2009, 111 p.
8. Lutsenko A. N., Katin V. D. Ways to reduce the pollution of railway tracks in the Far East region [Puti snizheniya zagryazneniya zheleznodorozhnogo polotna v Dal'nevostochnom regione]. *Vestnik VSGUTU – Bulletin of VSGUTU*, 2013, no. 3 (42), pp. 187 – 192.
9. *Shcheben' iz plotnykh gornykh porod dlya ballastnogo sloya zheleznodorozhnogo puti. Tekhnicheskaya usloviya, GOST 7392-2002* (Crushed stone from dense rocks for the ballast layer of

the railway track. Specifications, GOST 7392-2002.). Moscow: Project Production Center Publ., 2003, 15 p.

10. Kuznetsov I. I., Asonov A. M. The prospect of using the O-BISM detergent as a reagent for the regeneration of oil-and-oil crushed stone of the ballast prism of railway tracks [Perspektiva ispol'zovaniya moyushchego sredstva O-BISM v kachestve reagenta dlya regeneratsii neftezamazu-chennogo shchebnya ballastnoy prizmy zheleznodorozhnykh putey]. *Perspektiva : sbornik nauchnykh trudov studentov* (Perspective: collection of students scientific works). – Yekaterinburg: USURT Publ., 2018, issue 2 (233), pp. 84 – 91.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Асонов Александр Михайлович

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).

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

Доктор биологических наук, профессор кафедры «Техносферная безопасность», УрГУПС.

E-mail: asonov1942@mail.ru

Кузнецов Иван Ильич

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).

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

Аспирант кафедры «Техносферная безопасность», УрГУПС.

Тел.: 8-950-633-33-11.

E-mail: kuznetsov9403@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Асонов, А. М. Усовершенствование очистки щебня балластной призмы железнодорожных путей от нефтепродуктов щебнеочистительной машиной / А. М. Асонов, И. И. Кузнецов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 4 (44). – С. 112 – 119.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Asonov Alexander Mikhailovich

Ural University of Railway Transport (USURT).

Kolmogorova St., 66, Yekaterinburg, 620034, Russian Federation.

Doctor of Biological Sciences, Professor, Department of «Technosphere Safety», USURT.

E-mail: asonov1942@mail.ru

Kuznetsov Ivan Ilyich

Ural University of Railway Transport (USURT).

Kolmogorova St., 66, Yekaterinburg, 620034, Russian Federation.

Postgraduate student of the department «Technosphere Security», USURT.

Phone: 8-950-633-33-11.

E-mail: kuznetsov9403@gmail.com

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Asonov A. M., Kuznetsov I. I. Improvement of cleaning of ballast bed railways from oil products by the grader washer. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2020, no. 4 (44), pp. 112 – 119 (In Russian).

П. Ю. Худяков¹, А. Ю. Кисельников¹, И. М. Старцев²

¹Технический университет УГМК (ТУ УГМК), г. Верхняя Пышма, Российская Федерация;

²Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС), г. Екатеринбург, Российская Федерация

ПРОГРАММНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ ИНЕРЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПРОГРАММИРУЕМЫХ КОНТРОЛЛЕРАХ

Аннотация. В статье рассмотрена проблема наличия тепловой инерции у термоэлектрических преобразователей общепромышленного исполнения, применяемых для измерения температуры на большинстве технологических установок с температурой среды выше 200 °С. Целью исследования является разработка алгоритма прогнозирования температуры среды при известных тепловых характеристиках датчика температуры и реализация алгоритма непосредственно в общепромышленном программируемом логическом контроллере (ПЛК). В качестве основного метода в работе используется метод математического моделирования и описания объекта в передаточных функциях и в форме дифференциальных уравнений. В работе используется ранее разработанная инженерная методика определения времени тепловой инерции промышленных датчиков, основанная на единичном возмущении и оценке динамической характеристики объекта.

На основе проведенного исследования и математического моделирования разработаны и реализованы алгоритмы прогнозирования температуры среды по параметрам тепловой инерции температурного датчика и скорости изменения сигнала термопары. Предложена реализация алгоритмов в среде TIA Portal на базе ПЛК Siemens Simatic S7-300 с использованием библиотеки PID Control.

Ключевые слова: тепловая инерция, термопара, программная обработка, программируемый логический контроллер, алгоритм прогнозирования

Pavel Yu. Khudyakov¹, Andrey Yu. Kiselnikov¹, Ivan M. Startsev²

¹UMMC Technical University (TU UMMC), Verkhnyaya Pyshma, the Russian Federation;

²Ural State University of Railway Transport (USURT), Yekaterinburg, the Russian Federation

SOFTWARE INERTIA COMPENSATION FOR INDUSTRIAL TEMPERATURE SENSORS IN PROGRAMMABLE CONTROLLERS

Abstract. The paper deals with the problem of the presence of thermal inertia in thermoelectric converters of general industrial design, used to measure temperature in most technological installations with an ambient temperature above 200 °C. The aim of the study is to develop an algorithm for predicting the temperature of the environment with known thermal characteristics of the temperature sensor and to implement the algorithm directly in a general industrial programmable logic controller (PLC). As the main method, the work uses the method of mathematical modeling and description of the object in transfer functions and in the form of differential equations. The work uses a previously developed engineering technique for determining the thermal inertia time of industrial sensors, based on a single disturbance and an assessment of the dynamic characteristics of an object.

On the basis of the research and mathematical modeling, algorithms for predicting the temperature of the medium by the parameters of the thermal inertia of the temperature sensor and the rate of change of the thermocouple signal have been developed and implemented. The implementation of the algorithms in the TIA Portal environment based on the Siemens Simatic S7-300 PLC using the PID Control library is proposed.

Keywords: thermal inertia, thermocouple, software processing, programmable logic controller, prediction algorithm.

Современные промышленные датчики температуры, реализованные на базе первичных измерительных преобразователей, таких как термоэлектрические преобразователи (термопары) и термометры сопротивления, обладают значительной тепловой инерцией. Инерция изменения показаний датчика по отношению к изменению температуры измеряемой среды обусловлена конструкцией датчика и объясняется теплопередачей через многослойную стенку [1 – 7]. Следовательно, при изменении температуры среды датчик будет передавать действительное значение температуры спустя некоторое время, называемое временем инерции. Согласно документации производителей датчиков температуры время тепловой инерции для большинства промышленных сенсоров находится в пределах от 20 до 60 с.

Наличие тепловой инерции в ряде случаев может привести к увеличению времени срабатывания системы защиты по температуре технологического агрегата, а также к ухудшению качества регулирования технологических параметров.

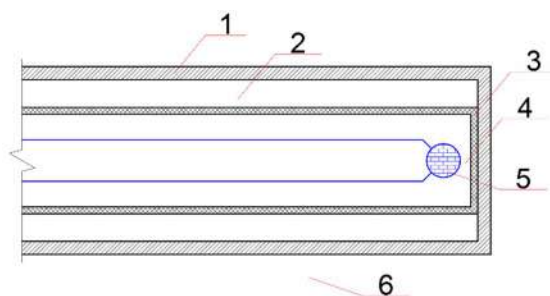


Рисунок 1 – Теплопередача через многослойную стенку к горячему спая термопары:

1 – защитная гильза; 2 – воздушное пространство между гильзой и корпусом датчика; 3 – корпус датчика; 4 – теплопроводящий наполнитель; 5 – горячий спай термопары; 6 – измеряемая среда

Использование защитных гильз и прочей вспомогательной арматуры для датчиков приводит к увеличению количества слоев при передаче тепла от среды к чувствительному элементу и, следовательно, увеличивает тепловую инерцию измерительного канала (рисунок 1).

В общем случае на чувствительный элемент воздействуют два механизма передачи тепла: конвекция и радиационный теплообмен.

Авторами работы ранее была разработана математическая модель и инженерная методика оценки времени тепловой инерции датчика температуры при различных вариантах изменения температуры среды, таких как линейно и

нелинейно изменяющаяся температура и циклически изменяющаяся температура среды [8].

В продолжение исследования разработанные методики адаптированы для применения на программируемых логических контроллерах.

В общем виде при динамически изменяемой температуре среды в случае наличия инерции датчика значение первой определяется по формуле

$$T_c = \lambda \frac{dT}{d\tau} + T + \left(\lambda \frac{d^2T}{d\tau^2} + \frac{dT}{d\tau} \right) \tau, \quad (1)$$

где T_c – температура окружающей среды;

λ – коэффициент тепловой инерции термопреобразователя;

T – температура чувствительного элемента;

τ – время.

При вычислении конечного значения температуры выбирается период времени, многократно превышающий постоянные времени технологического процесса.

Снимаемая переходная характеристика термопары при реакции на единичное воздействие приведена на рисунке 2.

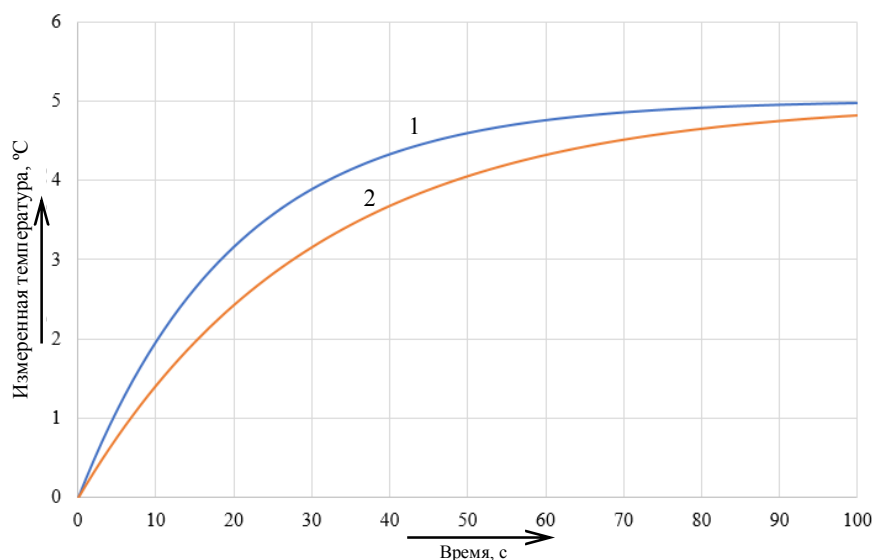


Рисунок 2 – Изменение измеренных значений исследуемых термопар:

1 – время инерции 20 с; 2 – время инерции 30 с

В первом приближении подобная динамика объекта может быть описана апериодическим звеном первого порядка, реже апериодическим звеном первого порядка с запаздыванием или апериодическим звеном второго порядка.

Как известно, передаточная функция апериодического звена имеет вид:

$$W(p) = \frac{1}{\lambda p + 1}. \quad (2)$$

Дифференциальное уравнение звена имеет вид:

$$T_c = \lambda \frac{dT}{d\tau} + T. \quad (3)$$

Следовательно, температура среды может быть в первом приближении вычислена как первая производная от показаний датчика, усиленная на величину инерции с последующим смещением на текущее значение температуры.

Для проверки гипотезы было выполнено математическое моделирование в среде Matlab Simulink (рисунок 3). Рассматривались два основных варианта изменения температуры среды:

линейное нарастание с постоянной скоростью, например, в случае выброса газов с высокой температурой в технологической системе;

гармоническое изменение температуры среды, например, при периодическом изменении нагрузки.

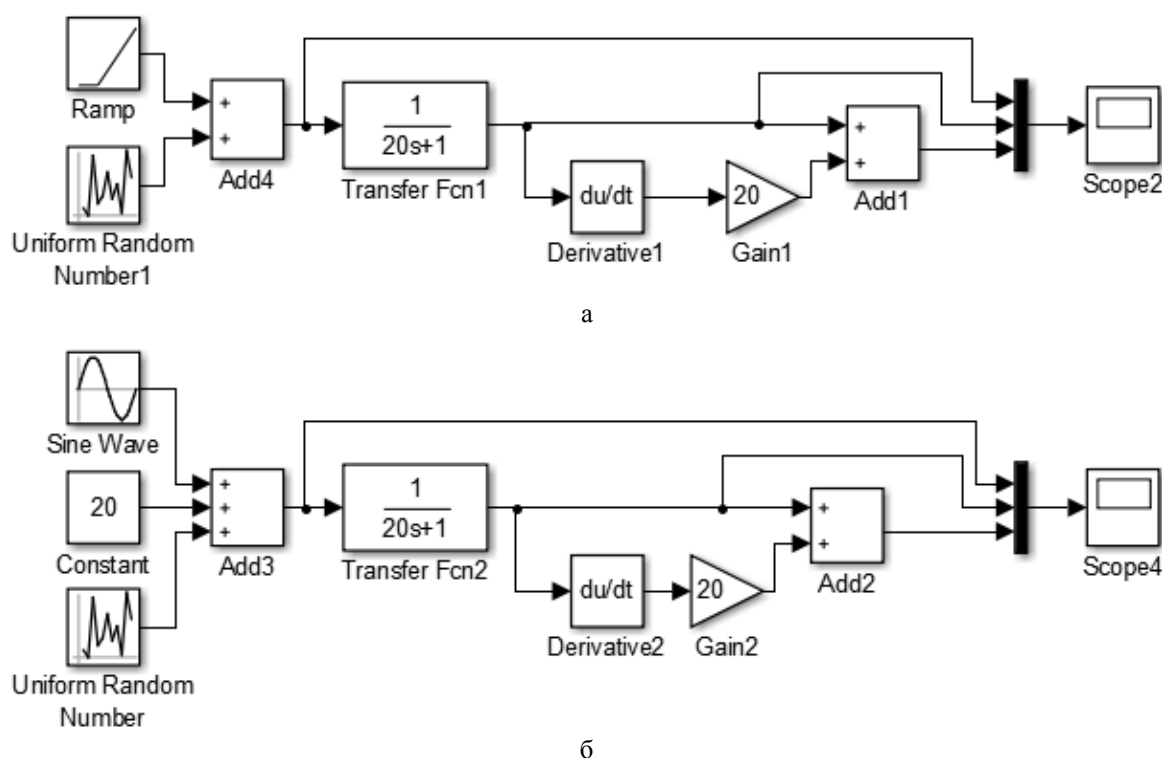


Рисунок 3 – Моделирование вычисления температуры среды по сигналу датчика:
а – линейно нарастающий сигнал; б – периодический сигнал

Результаты моделирования в графическом виде представлены на рисунке 4. Оценка точности алгоритма прогнозирования выполнялась по общеизвестным методикам [8 – 11], сравнивались входное имитируемое значение температуры среды и прогнозируемое значение в данный момент времени. Величина отклонения прогнозируемого значения не превышала в абсолютном значении 0,5 °С. Особенно отчетливо повторяемость видна на увеличенных изображениях графиков (рисунок 4, б и г).

Также отчетливо видна некорректность работы датчика в случае работы с быстро изменяющейся температурой среды, особенно в контурах защит технологического оборудования, где подобное отставание может быть критичным для безопасности персонала и оборудования.

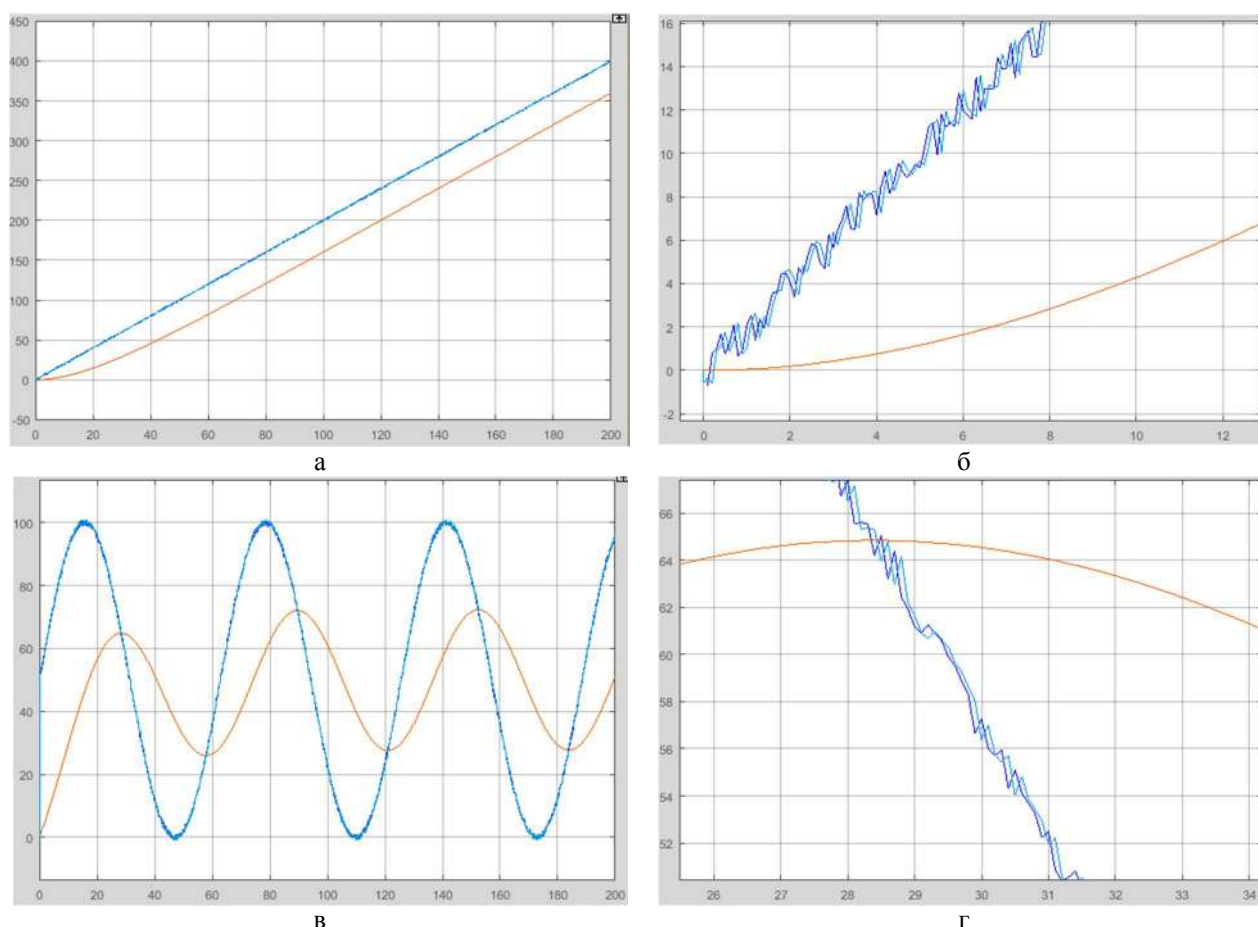


Рисунок 4 – Графики изменения температуры среды (синий), показаний датчика (оранжевый) и выхода прогнозирующего алгоритма (голубой): а – линейно нарастающий сигнал; б – увеличенное изображение графика линейно нарастающего сигнала; в – периодический сигнал; г – увеличенное изображение графика периодического сигнала

Корректность работы алгоритма, подтвержденная математическим моделированием, позволила перейти к разработке прикладных алгоритмов для реализации в ПЛК.

В качестве примера рассматриваются широко распространенный общепромышленный контроллер Siemens Simatic S7-300 и среда программирования TIA Portal v. 13. Для реализации расширенных функций управления и реализации собственных регуляторов в данной среде разработки имеется дополнительная библиотека «PID Control», в состав которой входят блоки дифференцирования и интегрирования. Как правило, подавляющее большинство ПЛК поддерживает только блок реального дифференциатора, а идеальный дифференциатор может быть реализован только при помощи численного дифференцирования за интервал времени, который составляет чаще всего 100 мс. В то же время при малом значении постоянной фильтра реального дифференциатора его выходной сигнал приближается к реакции идеального дифференцирующего звена.

В соответствии с документацией TIA Portal v. 13 блок реального дифференциатора имеет следующие настройки, а именно: постоянная времени дифференцирования (TD), постоянная времени фильтра (TM_LAG), сброс выходного значения блока (COM_RST) и время цикла (CYCLE). Следует отметить, что сигнал датчика, подключенного к аналоговому входу конт-

роллера, имеет частоту дискретизации не более 50 Гц и при необходимости пропускается через дополнительные фильтры для защиты от высокочастотных помех.

Разрабатываемый функциональный блок работает в блоке циклических прерываний OB35 с циклом 100 мс. Структура блока на языке LAD представлена на рисунке 5.

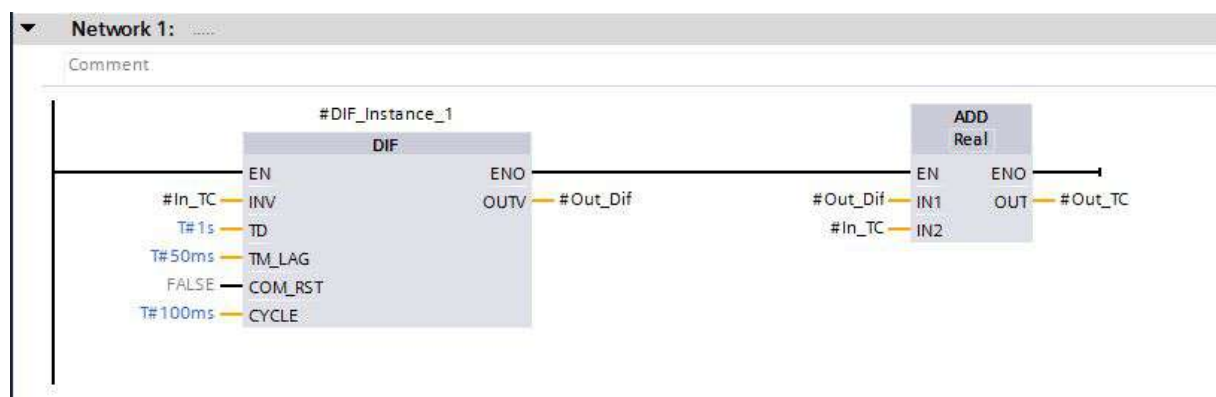


Рисунок 5 – Алгоритм прогнозирующего алгоритма на языке LAD

Аналогичным образом в случае динамически изменяющегося сигнала датчика может быть вычислено прогнозируемое значение времени достижения аварийной границы по температуре (рисунок 6).

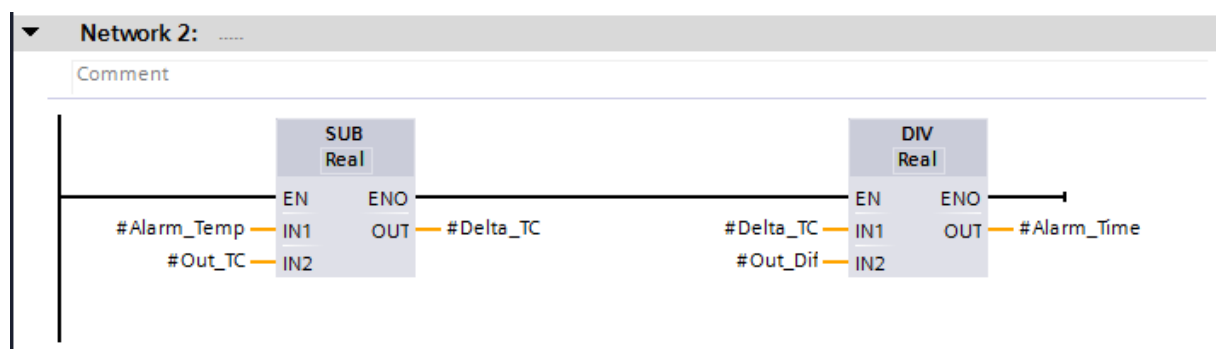


Рисунок 6 – Алгоритм прогнозирования времени достижения аварийной границы на языке LAD

При реализации системы в алгоритм контроллера записывается значение параметра тепловой инерции для каждого канала измерения температуры, а далее в зависимости от задачи рассчитывается либо конечное значение измеренной температуры (прогнозное значение), либо время достижения аварийной границы (прогноз времени).

В результате реализации данного алгоритма обеспечивается более точное измерение температуры, время определения истинных показаний сокращается на 25 – 55 с в зависимости от исполнения датчика, что было подтверждено испытаниями на экспериментальном стенде для возмущений в диапазоне от 10 до 100 °С. Для указанных выше значений инерции датчиков до 60 с и постоянных времени типовых тепломеханических объектов от 100 до 1000 с подобный прирост скорости вычисления измеряемой температуры позволяет повысить качество процесса регулирования и быстродействие контуров защит [12], что положительно влияет на эффективность и надежность работы оборудования, а также позволяет реализовать алгоритмы оценки качества сигнала и достоверности измеренных значений.

Список литературы

1. Глухов, Д. А. Технические измерения и приборы : учебное пособие / Д. А. Глухов. – Воронеж : Воронежская государственная лесотехническая академия, 2009. – 251 с. – Текст : непосредственный.
2. Технические средства автоматизации и управления : учебное пособие / В. В. Тугов, А. И. Сергеев [и др.]. – Оренбург : Оренбургский гос. ун-т, 2016. – Ч. 1. Контрольно-измерительные средства систем автоматизации и управления. – 110 с. – Текст : непосредственный.
3. Дресвянников, А. Ф. Физические основы измерений : учебное пособие / А. Ф. Дресвянников, Е. А. Ермолаева, Е. В. Петрова. – Казань : Казанский гос. технол. ун-т, 2008. – 305 с. – Текст : непосредственный.
4. Григорьев, Б. В. Метрология и физико-технические измерения: учебно-методическое пособие / Б. В. Григорьев, Е. В. Зайцев. – Тюмень : Тюменский гос. ун-т, 2017. – 52 с. – Текст : непосредственный.
5. Старостин, А. А. Технические средства автоматизации и управления : учебное пособие / А. А. Старостин, А. В. Лаптева. – Екатеринбург : Уральский фед. ун-т имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, 2015. – 168 с. – Текст : непосредственный.
6. Старостин, А. А. Специальные температурные измерения : учебное пособие / А. А. Старостин, Е. М. Шлеймович, В. Г. Лисиенко. – Екатеринбург : Уральский фед. ун-т имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, 2016. – 168 с. – Текст : непосредственный.
7. Новикова, Е. Н. Компьютерная обработка результатов измерений : учебное пособие / Е. Н. Новикова, О. Л. Серветник. – Ставрополь : Северо-Кавказский фед. ун-т, 2017. – 182 с. – Текст : непосредственный.
8. Программная обработка значений сигналов термодпар с учетом параметров тепловой инерции датчиков в ПЛК / П. Ю. Худяков, А. С. Мустафин, А. А. Новоселов, С. Н. Шевченко. – Текст: непосредственный // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2019. – № 1 (10). – С. 88 – 91.
9. Ткалич, В. Л. Обработка результатов технических измерений: учебное пособие / В. Л. Ткалич, Р. Я. Лабковская. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский гос. ун-т информационных технологий, механики и оптики, 2011. – 72 с. – Текст : непосредственный.
10. Бахраков, В. М. Метрология : учебное пособие / В. М. Бахраков. – Йошкар-Ола : Поволжский гос. технол. ун-т, 2016. – 288 с. – Текст : непосредственный.
11. Перемитина, Т. О. Метрология, стандартизация и сертификация : учебное пособие / Т. О. Перемитина. – Томск : Томский гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2016. – 150 с. – Текст : непосредственный.
12. Cook A, Janicke H, Smith R, Maglaras L 2017, The industrial control system cyber defence triage process. *Computers & Security*, vol. 70, September 2017, pp. 467 – 481, DOI: 10.1016/j.cose.2017.07.009.

References

1. Gluhov D. A. *Tekhnicheskie izmereniya i pribory: uchebnoe posobie* (Technical measurements and devices: training manual). Voronezh: Voronezh State Forestry Academy Publ., 2009, 251 p.
2. Tugov V. V., Sergeev A. I., Proskurin D. A., Konnov A. L. *Tekhnicheskie sredstva avtomatizacii i upravleniya: uchebnoe posobi. Ch. 1. Kontrol'no-izmeritel'nye sredstva sistem avtomatizacii i upravleniya* (Technical means of automation and control : training manual. Part 1. Control and measuring means of automation and control systems). Orenburg : Orenburg State University Publ., 2016, 110 p.
3. Dresvyannikov A. F., Ermolaeva E. A., Petrova E. V. *Fizicheskie osnovy izmerenij: uchebnoe posobie* (Physical fundamentals of measurement: textbook). Kazan' : KGTU Publ., 2008, 305 p.
4. Grigor'ev B. V., Zajcev E. V. *Metrologiya i fiziko-tekhicheskie izmereniya: uchebno-metodicheskoe posobie* (Metrology and physical and technical measurements: an educational and methodological guide). Tyumen': Tyumen' State University Publ., 2017, 52 p.

5. Starostin A. A., Lapteva A. V. *Tekhnicheskie sredstva avtomatizatsii i upravleniya: uchebnoe posobie* (Technical means of automation and control: training manual). Ekaterinburg: Ural Fed. university named after the first President of Russia B. N. Yeltsin Publ., 2015., 168 p.
6. Starostin A. A., Shleymovich E. M., Lisienko V. G. *Special'nye temperaturnye izmereniya: uchebnoe posobie* (Special temperature measurements: tutorial). Ekaterinburg : Ural Fed. university named after the first President of Russia B. N. Yeltsin Publ., 2016. 168 p.
7. Novikova E. N., Servetnik O. L. *Komp'yuternaya obrabotka rezul'tatov izmerenij : uchebnoe posobie* (Computer processing of measurement results : textbook). Stavropol': North Caucasus Federal University Publ., 2017, 182 p.
8. Hudyakov P. Yu., Mustafin A. S., Novoselov A. A., Shevchenko S. N. Software processing of the values of the thermocouple signals taking into account the parameters of the thermal inertia of the sensors in the PLC [Programmnaya obrabotka znachenij signalov termopar s uchedom parametrov teplovoj inercii datchikov v PLK]. *Aktual'nye problemy sovremennoj nauki, tekhniki i obrazovaniya – Actual problems of modern science, technology and education*, 2019, no. 1 (10), pp. 88 – 91.
9. Tkach V. L., Labkovskaya R. Ya. *Obrabotka rezul'tatov tekhnicheskikh izmerenij: uchebnoe posobie* (Processing of technical measurement results: training manual). Saint-Petersburg: Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics Publ., 2011, 72 p.
10. Bastrakov V. M. *Metrologiya: uchebnoe posobie* (Metrology: textbook). Joshkar-Ola: Volga Region State Technological University Publ., 2016, 288 p.
11. Peremitina T. O. *Metrologiya, standartizatsiya i sertifikatsiya: uchebnoe posobie* (Metrology, standardization and certification: textbook). Tomsk: Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics Publ., 2016, 150 p.
12. Cook A, Janicke H, Smith R, Maglaras L 2017, The industrial control system cyber defence triage process. *Computers & Security*, vol. 70, September 2017, pp. 467 – 481, DOI: 10.1016/j.cose.2017.07.009.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Худяков Павел Юрьевич

Технический университет УГМК (ТУ УГМК).

Успенский пр., д. 3, г. Верхняя Пышма, 624091, Российская Федерация.

Кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой «Механика и автоматизация технологических процессов и производств», ТУ УГМК.

Тел.: +7 (34368) 78-362.

E-mail: lumen_xp@mail.ru

Кисельников Андрей Юрьевич

Технический университет УГМК (ТУ УГМК).

Успенский пр., д. 3, г. Верхняя Пышма, 624091, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика и автоматизация технологических процессов и производств», ТУ УГМК.

Тел.: +7 (34368) 78-362.

E-mail: oacy_kis@mail.ru

Старцев Иван Михайлович

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).

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

Старший преподаватель кафедры «Электроснабжение транспорта», УрГУПС.

Тел.: +7 (912) 27-26-844.

E-mail: startsevivan@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Khudyakov Pavel Yur'evich

UMMC Technical University (TU UMMC).

3, Uspenskiy st., Verhnyaya Pyshma, 624091, the Russian Federation.

Ph. D., Head of department «Mechanics and automation of technological processes and production», TU UMMC.

Phone: +7 (34368) 78-362.

E-mail: lumen_xp@mail.ru

Kiselnikov Andrey Yur'evich

UMMC Technical University (TU UMMC).

3, Uspenskiy st., Verhnyaya Pyshma, 624091, the Russian Federation.

Ph. D., Associate Professor of the department «Mechanics and automation of technological processes and production», TU UMMC.

Phone: +7 (34368) 78-362.

E-mail: oacy_kis@mail.ru

Startsev Ivan Mikhailovich

Ural State University of Railway Transport (USURT).

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

Senior Lecturer of the department «Transport power supply», USURT.

Phone: +7 (912) 27-26-844.

E-mail: startsevivan@mail.ru

Худяков, П. Ю. Программная компенсация инерции промышленных датчиков температуры в программируемых контроллерах / П. Ю. Худяков, А. Ю. Кисельников, И. М. Старцев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 4 (44). – С. 120 – 127.

Khudyakov P. Yu., Kiselnikov A. Yu., Startsev I. M. Software inertia compensation for industrial temperature sensors in programmable controllers. Journal of Transsib Railway Studies, 2020, no. 4 (44), pp. 120 – 127 (In Russian).

УДК 004.771

М. Н. Чепцов, В. Е. Сорокин

Донецкий институт железнодорожного транспорта (ДонИЖТ), г. Донецк, Донецкая Народная Республика

РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОГО ВРЕМЕНИ ОТСУТСТВИЯ РАДИОСВЯЗИ В СИСТЕМАХ ИНТЕРВАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ НА БАЗЕ ЦИФРОВОГО РАДИОКАНАЛА

Аннотация. В статье рассмотрена работа систем интервального регулирования движения поездов на базе цифрового радиоканала при условии отсутствия радиосвязи. Целью исследования является определение максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи между центром радиоблокировки и движущимся поездом в системе интервального регулирования. Предложены критерии, позволяющие оценить обеспечение безопасности движения, а также снижения пропускной способности движения поездов в системах интервального регулирования движения поездов. Получены результаты расчета максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи в системах интервального регулирования движения поездов для грузовых поездов. Учет максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи позволит полностью исключить вероятность опасного сближения поездов и обеспечить соблюдение допустимого скоростного режима движения при минимальном интервале следования грузовых поездов.

Ключевые слова: интервальное регулирование, цифровой радиоканал, максимально допустимое время отсутствия радиосвязи.

Mikhail N. Cheptsov, Vladislav E. Sorokin

Donetsk Institute of Railway Transport (DRTI), Donetsk, Donetsk People's Republic

CALCULATION OF THE MAXIMUM ADMISSIBLE TIME OF RADIO COMMUNICATION ABSENCE IN THE SYSTEMS OF INTERVAL REGULATION OF TRAIN TRAFFIC ON THE BASIS OF A DIGITAL RADIO CHANNEL

Abstract. The article discusses the operation of systems for interval regulation of train traffic based on a digital radio channel in the absence of radio communication. The aim of the study is to determine the maximum allowable time for the absence of radio communication between the radio blocking center and a moving train in the interval control system. Criteria are proposed that allow assessing traffic safety, as well as reducing the throughput of train traffic in interval control of train traffic systems. The results of calculating the maximum permissible time of radio communication absence in interval control of train traffic systems for freight trains are obtained. Taking into account the maximum allowable time for the absence of radio communication will completely eliminate the likelihood of a dangerous convergence of trains and ensure compliance with the allowable speed mode with a minimum interval of freight trains.

Keywords: interval regulation, digital radio channel, maximum permissible time of radio absence.

Системы интервального регулирования движения поездов (ИРДП) на базе цифрового радиоканала работают на основе принципов радиоблокировки [1]. В настоящее время для работы систем ИРДП на базе цифрового радиоканала на железнодорожном транспорте используют стандарты цифровой радиосвязи TETRA, GSM-R и DMR [2 – 4]. Данные стандарты используют радиоволны ультракороткого диапазона (УКВ).

Ультракороткие волны от ионосферы не отражаются, они свободно проходят сквозь нее, т. е. эти волны не имеют пространственной ионосферной волны. Поверхностная ультракороткая волна имеет два существенных недостатка:

- она не огибает земную поверхность и большие препятствия;
- сильно поглощается в почве.

Ультракороткие волны широко применяются там, где требуется небольшой радиус действия радиостанции, связь ограничивается обычно пределами прямой видимости (50 – 60 км) или немного превышает это расстояние (80 – 100 км). В этом случае связь ведется пространственной тропосферной волной [5]. Распространение радиоволн УКВ-диапазона представлено на рисунке 1.

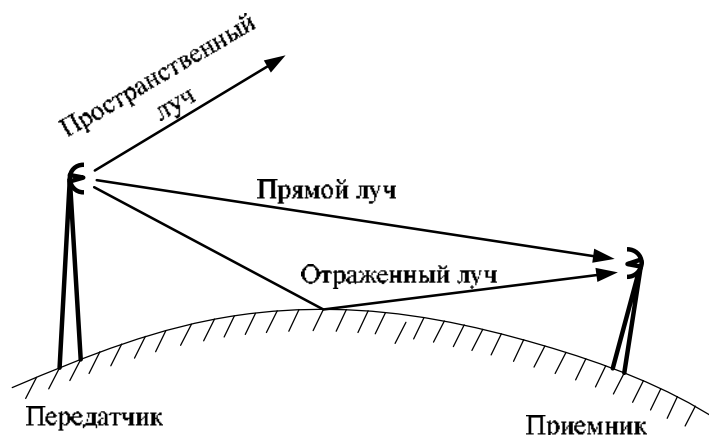


Рисунок 1 – Распространение радиоволн УКВ-диапазона

Для решения проблем распространения радиоволн УКВ-диапазона применяют частотно-территориальное планирование (ЧТП). Частотно-территориальное планирование сетей связи с подвижными объектами предусматривает выбор структуры (конфигурации) сети, места установки базовых станций (БС), выбор типа, высоты и ориентации антенн, распределение частот между базовыми станциями [6]. Для уменьшения капитальных затрат должна осуществляться оптимизация частотно-территориального плана, т. е. необходимо разрабатывать план, обеспечивающий заданную зону обслуживания, емкость сети, требуемое качество обслуживания при минимальном числе базовых станций и используемых частот.

Построение сети с двойным покрытием невыгодно с экономической точки зрения, а также распределения частотного ресурса и электромагнитной совместимости между соседними БС. Поэтому согласно ЧТП базовые станции устанавливают вдоль железнодорожного пути с учетом отсутствия «мертвых зон» между соседними БС, при наихудших погодных условиях. В пределах зоны покрытия определенной БС все поезда, находящиеся на перегоне или станции, обслуживаются только этой базовой станцией.

С учетом специфики сильно изменяющегося рельефа местности, который может иметь большое количество оврагов и балок, в работе системы ИРДП на базе цифрового радиоканала возможны ситуации возникновения отсутствия радиосвязи (зона молчания) между Центром радиоблокировки (ЦРБ) и движущимся поездом, для которого рассчитывается безопасная кривая торможения в точку прицеливания. Зона отсутствия радиосвязи показана на рисунке 2.

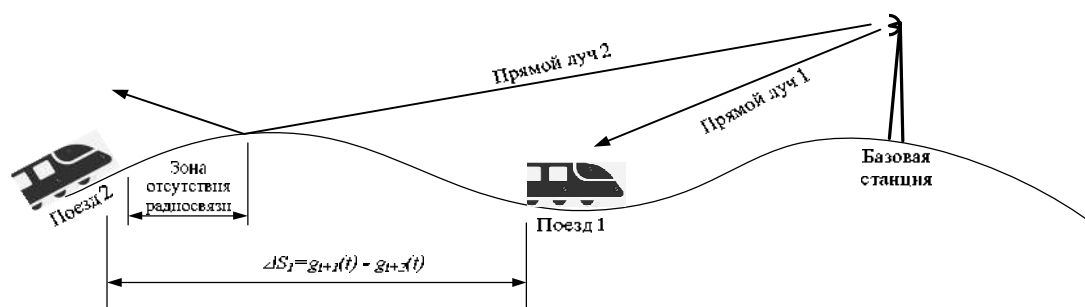


Рисунок 2 – Зона отсутствия радиосвязи

На рисунке 2 обозначено: ΔS – безопасная кривая торможения поезда 2 в точку прицеливания; $g_{i+1}(t)$ и $g_{i+2}(t)$ – текущие координаты поездов 1 и 2 соответственно (определяются бортовыми устройствами одометрии).

В связи с этим необходимо определить максимально допустимое время отсутствия радиосвязи между ЦРБ и движущимся поездом в работе системы ИРДП на базе цифрового радиоканала, которое не повлияет на критерий обеспечения безопасности движения поездов и критерий снижения пропускной способности движения поездов [7].

Для начала сформулируем критерии обеспечения безопасности и снижения пропускной способности движения поездов системы ИРДП на базе цифрового радиоканала.

Критерий обеспечения безопасности движения – это отсутствие возможности столкновения поездов при наихудших условиях и минимальном допустимом интервале следования поездов $L_{\text{и min}}$ в случае временного отсутствия радиосвязи в работе системы ИРДП на базе цифрового радиоканала.

Критерий снижения пропускной способности – это неоправданное снижение скорости поезда, идущего сзади (поезд 2), если поезд, идущий впереди (поезд 1), начал снижать скорость, но продолжает движение, в случае временного отсутствия радиосвязи в работе системы ИРДП на базе цифрового радиоканала.

Критерий обеспечения безопасности движения поездов является приоритетным, поэтому максимально допустимое время отсутствия радиосвязи необходимо рассматривать для наихудших условий.

В качестве наихудших условий с точки зрения системы ИРДП на базе цифрового радиоканала будем рассматривать случай экстренного торможения поезда 1 вплоть до полной остановки $V_{1\phi} = 0$ км/ч с точки зрения поезда 2, для которого рассчитывается безопасная кривая торможения в точку прицеливания x_i , при этом поезд 2 движется с максимально допустимой скоростью для данного участка $V_{2\text{ max}}$.

Важным условием работы системы ИРДП является непрерывная передача следующему поезду координаты прицельного торможения x_i . В случае отсутствия радиосвязи в системе ИРДП машинист идущего вслед поезда 2 ведет его по показаниям сигналов автоблокировки и автоматической локомотивной сигнализации.

Поскольку путь служебного торможения идущего позади поезда 2 больше пути экстренного торможения идущего впереди поезда 1, то машинист поезда 2 должен приступить к резкому снижению скорости или даже к экстренному торможению.

В системе ИРДП межпоездной интервал ΔS рассчитывается с учетом защитного участка. Поэтому при кратковременном отсутствии радиосвязи будет неоправданным снижение скорости или торможение идущего сзади поезда 2 с точки зрения минимального интервала следования поездов $L_{\text{и min}}$.

Исходя из этого актуальной является задача определения максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи в системе ИРДП на базе цифрового радиоканала, при котором не будут нарушены критерий обеспечения безопасности движения поездов и критерий снижения пропускной способности движения поездов.

Согласно правилам тяговых расчетов для поездной работы [8] при экстренном торможении наихудшими условиями для грузового поезда повышенных массы и длины являются соединенный грузовой поезд массой до 16 тыс. т с объединенной тормозной магистралью; локомотивами в голове и последней трети поезда; при пневматическом торможении колодочные и дисковые тормоза (чугунные, композиционные, металлокерамические колодки или накладки); при максимально допустимой скорости движения 80 км/ч тормозной путь при экстренном торможении составляет 1400 м.

В рамках данной статьи были рассмотрены условия только для грузовых поездов, условия для пассажирских поездов будут рассмотрены в отдельных статьях.

На основе правил тяговых расчетов для поездной работы [8] при помощи метода интервалов скорости был рассчитан максимальный тормозной путь S_1 поезда 1. Расчеты проводи-

лись для участков со спусками крутизной круче 10 ‰ до 15 ‰ включительно. Результаты расчетов максимального тормозного пути S_1 в зависимости от фактической скорости движения поезда $V_{1ф}$, представлены в таблице.

В работе [9] были произведены расчеты минимального допустимого интервала следования поездов $L_{и min}$ согласно выражению, м,

$$L_{и min} > S_1 + S_{запас}, \quad (1)$$

где S_1 – максимальный тормозной путь поезда 1; $S_{запас}$ – запас межпоездного интервала, больший или равный длине блок-участка.

Согласно эксплуатационно-техническим требованиям к системам интервального регулирования движения поездов на перегонах [10] запас безопасного интервала следующих друг за другом поездов, достаточного для остановки машинистом локомотива с применением служебного торможения, должен быть не менее 300 м, т. е. $S_{запас} = 300$ м. В таблице приведены значения минимально допустимого интервала следования поездов $L_{и min}$ в зависимости от фактической скорости движения поезда 1.

Значения максимального тормозного пути грузового поезда и минимально допустимого интервала следования поездов

$V_{1ф}$, км/ч	30	40	50	60	70	80
S_1 , м	200	350	550	790	1075	1400
$L_{и min}$, м	500	650	850	1090	1375	1700

В общем виде максимально допустимое время отсутствия радиосвязи в работе системы ИРДП на базе цифрового радиоканала $t_{\max доп}$ будет определяться по формуле, с,

$$t_{\max доп} = t_1 - t_2, \quad (2)$$

где t_1 – время движения поезда 2 с максимально допустимой скоростью движения $V_{2\max}$ на данном участке (вплоть до возможного столкновения с поездом 1, который применил экстренное торможение); t_2 – время, которое будет затрачено поездом 1 (вплоть до полной остановки) при экстренном торможении, с:

$$t_2 = \frac{V_{1\max} - V_{1ф}}{a_{1\max}}, \quad (3)$$

где $V_{1\max}$ – максимально допустимая скорость движения поезда 1 на данном участке; $V_{1ф}$ – фактическая скорость движения поезда 1 на момент пропадания радиосвязи (при условии полной остановки поезда $V_{1ф} = 0$ м/с); $a_{1\max}$ – максимальное ускорение торможения поезда 1, м/с²:

$$a_{1\max} = \frac{V_{1\max}^2}{2S_1}, \quad (4)$$

где S_1 – максимальный тормозной путь поезда 1.

Расстояние $S_{1т}$, которое пройдет поезд 1 (вплоть до полной остановки) при экстренном торможении, определяется по формуле, м,

$$S_{1т} = V_{1ф} \cdot t_2 + \frac{a_{1\max} \cdot t_2^2}{2}. \quad (5)$$

Расчетное расстояние опасного сближения поездов (вплоть до возможного столкновения) определяется по формуле, м,

$$L_p = L_{и min} + S_{1т}. \quad (6)$$

Время t_1 вычисляется по формуле, с,

$$t_1 = \frac{L_p}{v_{2\max}}. \quad (7)$$

Подставив формулы (3) – (7) в выражение (2), получим уравнения расчета максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи $t_{\max \text{ доп.}}$

Следующее уравнение соответствует определению максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи для критерия снижения пропускной способности поездов, с:

$$t_{\text{с. п. с}} = \frac{L_{\text{и min}} + [V_{1\phi} \cdot \left(\frac{(V_{1\max} - V_{1\phi}) \cdot 2S_1}{v_{1\max}^2} \right) + \frac{v_{1\max}^2}{2S_1} \left(\frac{(V_{1\max} - V_{1\phi}) \cdot 2S_1}{v_{1\max}^2} \right)^2]}{v_{2\max}} - \frac{(V_{1\max} - V_{1\phi}) \cdot 2S_1}{v_{1\max}^2}. \quad (8)$$

При условии, что поезд 1 во время экстренного торможения полностью остановится (т. е. $V_{1\phi} = 0$ м/с), получим уравнение, которое соответствует определению максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи для критерия обеспечения безопасности движения поездов, с:

$$t_{\text{б. д}} = \frac{L_{\text{и min}} + [V_{1\phi} \cdot \left(\frac{(V_{1\max} - V_{1\phi}) \cdot 2S_1}{v_{1\max}^2} \right) + \frac{v_{1\max}^2}{2S_1} \left(\frac{(V_{1\max} - V_{1\phi}) \cdot 2S_1}{v_{1\max}^2} \right)^2]}{v_{2\max}} - \frac{(V_{1\max} - V_{1\phi}) \cdot 2S_1}{v_{1\max}^2} = \frac{L_{\text{и min}} + S_1}{v_{2\max}} - \frac{2S_1}{v_{1\max}}. \quad (9)$$

На основе уравнения (8) в программной среде Mathcad выполнен расчет максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи для критерия снижения пропускной способности движения поездов $t_{\text{с. п. с}}$ при разных фактических скоростях движения поезда 1 на момент пропадания радиосвязи [11] $V_{1\phi} = 30; 40; 50; 60; 70; 80$ км/ч с учетом минимального допустимого интервала между поездами $L_{\text{и min}}$. Результаты показаны на рисунке 3.

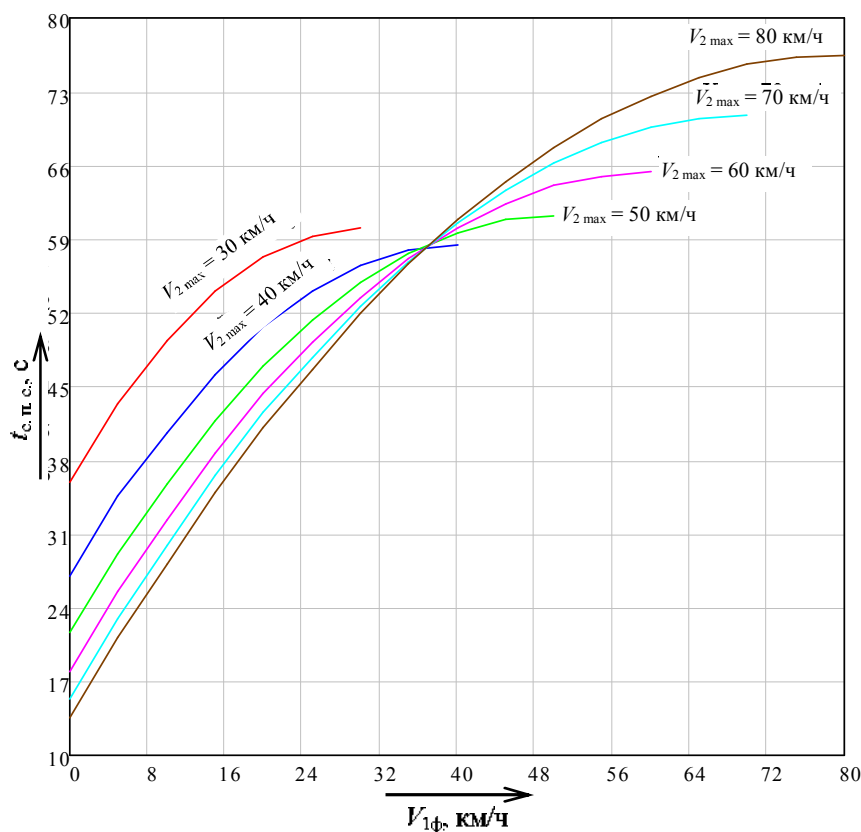


Рисунок 3 — Определение максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи по критерию снижения пропускной способности поездов

На основе уравнения (9) в программной среде Mathcad выполнен расчет максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи для критерия обеспечения безопасности движения поездов $t_{б.д}$ при условии полной остановки поезда 1 ($V_{1ф} = 0$ км/ч) для разных максимально допустимых скоростей движения поезда 2 [11] $V_{2max} = 30; 40; 50; 60; 70; 80$ км/ч с учетом минимального допустимого интервала между поездами $L_{и min}$. Результаты показаны на рисунке 4.

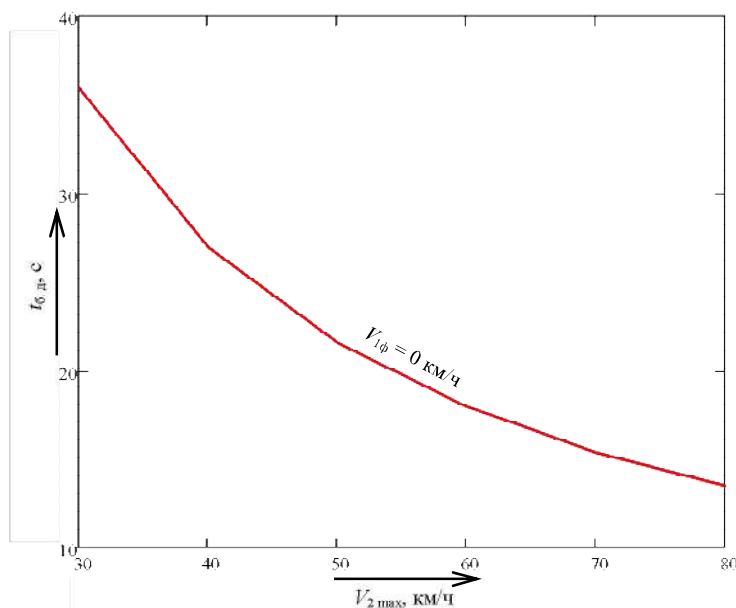


Рисунок 4 – Определение максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи по критерию обеспечения безопасности движения поездов

Полученные выражения для расчета максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи как по критерию обеспечения безопасности движения поездов, так и по критерию снижения пропускной способности движения поездов справедливы для случая отсутствия радиосвязи с поездом 2, так как в случае отсутствия радиосвязи с поездом 2 полагаем, что данный поезд движется с максимальной допустимой скоростью V_{2max} .

Проведенный анализ рисунка 3 показал, что для реализации критерия снижения пропускной способности движения поездов максимально допустимое время отсутствия радиосвязи $t_{с.п.с}$ должно составлять время, за которое разность пройденных расстояний поездами 1 и 2 с различными скоростями составляла от 0 до 300 м.

Анализ рисунка 4 показал, что для реализации критерия обеспечения безопасности движения поездов максимально допустимое время отсутствия радиосвязи $t_{б.д}$ составляет время, за которое поезд 2 пройдет расстояние 300 м ($S_{запас}$) на максимально допустимой скорости для данного участка V_{2max} .

Величина максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи должна быть записана в микропроцессорной системе интервального регулирования поездов ИРДП на базе цифрового радиоканала.

В условиях интенсивного движения при минимальном межпоездном интервале следования поездов $L_{и min}$ в случае кратковременного отсутствия радиосвязи в системе ИРДП на базе цифрового радиоканала учет значения максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи позволит полностью исключить вероятность опасного сближения поездов (реализовать критерий обеспечения безопасности движения поездов) и соблюдать допустимый скоростной режим движения поездов (реализовать критерий снижения пропускной способности движения поездов).

Список литературы

1. Попов, П. А. Интервальное регулирование на основе цифрового радиоканала / П. А. Попов, А. В. Озеров. – Текст : непосредственный // Автоматика, связь, информатика. – 2016. – № 10. – С. 19 – 22.
2. Телекоммуникационные системы и сети: учебное пособие : в 3 т. / Г. П. Катунин, Г. В. Мамчев, В. Н. Попантонопуло, В. П. Шувалов; под ред. проф. В. П. Шувалова. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2004. – Т. 2. Радиосвязь, радиовещание, телевидение. – 672 с. – Текст : непосредственный.

3. Телекоммуникационные технологии. Введение в технологии GSM / С. Б. Макаров, Н. В. Певцов, Е. А. Попов, М. А. Сиверс – Москва : Академия, 2008. – 256 с. – Текст : непосредственный.
4. Основы построения систем беспроводной передачи данных : учебное пособие / А. П. Корольков, С. А. Погребов, В. А. Онов, М. Н. Байбаков. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2017. – 108 с. – Текст : непосредственный.
5. Радиосвязь / О. В. Головин, Н. И. Чистяков, В. Шварц, А. И. Хордон. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2001. – 288 с. – Текст : непосредственный.
6. Бабков, В. Ю. Сети мобильной связи. Частотно-территориальное планирование : учебное пособие / В. Ю. Бабков, М. А. Вознюк, П. А. Михайлов. – 2-е изд., испр. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2007. – 224 с. – Текст : непосредственный.
7. Сорокин, В. Е. Повышение эффективности систем интервального регулирования движения поездов на базе цифрового радиоканала / В. Е. Сорокин. – Текст : непосредственный // Научно-технические аспекты комплексного развития железнодорожного транспорта : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Донецк : Донецкий ин-т ж.-д. трансп., 2020. – Ч. 1. – С. 88 – 92.
8. Правила тяговых расчетов для поездной работы: Утверждены ОАО «РЖД» 12.05.2016 № 867 р. – Москва : ОАО «РЖД», 2016. – 287 с. – Текст : непосредственный.
9. Елгин, А. А. Расчет минимально допустимого интервала между поездами попутного следования / А. А. Елгин. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2013. – № 4. – С. 202 – 205.
10. Р 817. Эксплуатационно-технические требования к системам интервального регулирования движением поездов на перегонах (Автоматическая и полуавтоматическая блокировка, радиоблокировка, локомотивная сигнализация) / Организация сотрудничества железных дорог (ОСЖД) // Комитет ОСЖД. – Варшава, 2016. – 20 с. – Текст : непосредственный.
11. Хусаинов, Ф. И. Показатели скорости как аналитические инструменты для оценки работы железных дорог / Ф. И. Хусаинов. – Текст : непосредственный // Транспорт Российской Федерации. – 2017. – № 4 (71). – С. 19 – 22.

References

1. Popov P. A., Ozerov A. V. Interval regulation based on digital radio channel [Interval'noe regulirovanie na osnove tsifrovogo radiokanala]. *Avtomatika, sviaz', informatika – Automation, communication, informatics*, 2016, no. 10, pp. 19 – 22.
2. Katunin G. P., Mamchev G. V., Popantonopulo V. N., Shuvalov V. P. *Telekommunikatsionnye sistemy i seti: uchebnoe posobie : v 3 t. T. 2. Radiosvaz', radioveshchanie, televidenie* (Telecommunication systems and networks: textbook. In 3 volumes. Volume 2. Radio communication, broadcasting, television). Moscow: Hot line-Telecom Publ., 2004, 672 p.
3. Makarov S. B., Pevtsov N. V., Popov E. A., Sivers M. A. *Telekommunikatsionnye tekhnologii. Vvedenie v tekhnologii GSM* (Telecommunication technologies. Introduction to GSM technology). Moscow: Academia Publ., 2018, 256 p.
4. Korolkov A. P., Pogrebov S. A., Onov V. A., Baibakov M. N. *Osnovy postroeniia sistem besprovodnoi peredachi dannykh: uchebnoe posobie* (Fundamentals of building wireless data transmission systems: tutorial). Saint-Petersburg: Saint-Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of Emergencies of Russia Publ., 2017, 108 p.
5. Golovin O. V., Chistyakov N. I., Schwartz V., Khordon A. I. *Radiosvaz'* (Radio communication). Moscow: Hot line-Telecom Publ., 2001, 288 p.
6. Babkov V. Yu., Voznyuk M. A., Mikhailov P. A. *Seti mobil'noi sviazi. Chastotno-territorial'noe planirovanie: uchebnoe posobie* (Mobile networks. Frequency-territorial planning: textbook). Moscow: Hot line-Telecom Publ., 2007, 224 p.
7. Sorokin V. E. Improving the efficiency of systems for interval control of train traffic based on a digital radio channel [Povyshenie effektivnosti sistem interval'nogo regulirovaniia dvizheniia poezdov na baze tsifrovogo radiokanala]. *Nauchno-tekhnicheskie aspekty kompleksnogo razvitiia*

zheleznodorozhnogo transporta: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Scientific and technical aspects of the integrated development of railway transport: materials of the International Scientific and Practical Conference, Part 1). – Donetsk, 2020, pp. 88 – 92.

8. *Pravila tiagovykh raschetov dlia poezdnoi raboty: Utverzhdeny OAO «RZhD» 12.05.2016 № 867 r* (Rules for traction calculations for train operation: approved. JSC «Russian Railways» 05/12/2016 no. 867 r). Moscow: JSC «Russian Railways», 2016, 287 p.

9. Elgin A. A. Calculation of the minimum permissible interval between trains passing along the route [Raschet minimal'no dopustimogo intervala mezhdu poezdami poputnogo sledovaniia]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2013, no. 4, pp. 202 – 205.

10. R 817. *Ekspluatatsionno-tekhnicheskie trebovaniia k sistemam interval'nogo regulirovaniia dvizheniem poezdov na peregonakh (Avtomaticheskaia i poluavtomaticheskaia blokirovka, radioblokirovka, lokomotivnaia signalizatsiia). Organizatsiia sotrudnichestva zheleznykh dorog (OSZhD). Komitet OSZhD* (R 817. Operational and technical requirements for the systems of interval regulation of train traffic on the tracks (Automatic and semi-automatic blocking, radio blocking, locomotive signaling). Organization of cooperation between railways (OSJD)), Warsaw, 2016, 20 p.

11. Khusainov F. I. Speed indicators as analytical tools for assessing the performance of railways [Pokazateli skorosti kak analiticheskie instrumenty dlia otsenki raboty zheleznykh dorog]. *Transport Rossiiskoi Federatsii – Transport of the Russian Federation*, 2017, no. 4 (71), pp. 19 – 22.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чепцов Михаил Николаевич

Донецкий институт железнодорожного транспорта (ДонИЖТ).

Горная ул., 6, г. Донецк, 283018, Донецкая Народная Республика.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика, телемеханика, связь и вычислительная техника», ДонИЖТ.

Тел.: +38(062) 319-08-31.

E-mail: institut-transporta@mail.ru

Сорокин Владислав Евгеньевич

Донецкий институт железнодорожного транспорта (ДонИЖТ).

Горная ул., 6, г. Донецк, 283018, Донецкая Народная Республика.

Старший преподаватель кафедры «Автоматика, телемеханика, связь и вычислительная техника», ДонИЖТ.

Тел.: +38(071) 347-63-80.

E-mail: v_sorokin@list.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Чепцов, М. Н. Расчет максимального времени отсутствия радиосвязи в системах интервального регулирования движения поездов на базе цифрового радиоканала / М. Н. Чепцов, В. Е. Сорокин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 4 (44). – С. 127 – 134.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Cheptsov Mikhail Nikolaevich

Donetsk Institute of Railway Transport (DRTI).

Gornaya st., 6, Donetsk, 283018, Donetsk People's Republic.

Doctor of Sciences in Engineering, Professor of the department of Automation, Telemechanics, Communications and Computer Engineering, DRTI.

Phone: +38 (062) 319-08-31.

E-mail: institut-transporta@mail.ru

Sorokin Vladislav Evgenievich

Donetsk Institute of Railway Transport (DRTI).

Gornaya st., 6, Donetsk, 283018, Donetsk People's Republic.

Senior Lecturer of the department of Automation, Telemechanics, Communications and Computer Engineering, DRTI.

Phone: +38(071) 347-63-80.

E-mail: v_sorokin@list.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Cheptsov M. N., Sorokin V. E. Calculation of the maximum admissible time of radio communication absence in the systems of interval regulation of train traffic on the basis of a digital radio channel. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2020, no. 4 (44), pp. 127 – 134 (In Russian).

Уважаемые коллеги!

Редакция научно-технического журнала «Известия Транссиба» приглашает Вас публиковать результаты научных исследований по тематическим направлениям журнала:

- подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация;
- железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог;
- транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте;
- совершенствование промышленных теплосистем, теплотехнического и теплового оборудования;
- электрические станции и электроэнергетические системы;
- энергетические системы и комплексы;
- автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Материалы просим высылать ответственному секретарю редакционной коллегии журнала Иванченко Владимиру Ивановичу по электронной почте: izvestia_transsiba@mail.ru.

Правила представления рукописей научных статей в научно-технический журнал «Известия Транссиба»

В редакцию журнала представляется:

рукопись статьи на белой бумаге формата А4 в двух экземплярах, а также в электронном виде (на любом носителе или по e-mail), имя файла определяется по фамилии первого автора: фамилия.doc;

экспертное заключение о возможности опубликования статьи в открытой печати.

Рукопись статьи включает в себя УДК, ФИО авторов, аффилиацию (место работы или учебы) авторов, название статьи, аннотацию, ключевые слова (5 – 10 слов) на русском и английском языках, текст статьи, список литературы (более 10 наименований), транслитерацию списка литературы в романском алфавите, сведения об авторах и библиографическое описание статьи на русском и английском языках.

Рукопись статьи оформляется в соответствии с образцом.

Сведения об авторах включают в себя фамилию, имя, отчество, ученую степень и звание, место работы с указанием почтового адреса, должность, контактные телефоны, e-mail для обратной связи.

Один экземпляр текста статьи должен быть подписан всеми авторами на оборотной стороне каждой страницы.

Требования к аннотации статьи:

аннотация должна быть кратким точным изложением содержания статьи, включающим в себя основные фактические сведения и выводы описываемой работы;

текст аннотации должен быть лаконичным и четким, свободным от второстепенной информации, должен отличаться убедительностью формулировок;

сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте аннотации;

объем аннотации на русском и английском языках должен содержать от 200 до 250 слов;

аннотация на русском и английском языках должна включать в себя следующие аспекты содержания статьи: предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы;

дополнительно англоязычная аннотация должна быть оригинальной (не быть калькой русскоязычной аннотации); содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований (следовать логике описания результатов в статье); англоязычной (написанной качественным английским языком); необходимо использовать активный, а не пассивный залог.

Требования к рукописи статьи:

рукопись статьи должна содержать УДК (в левом верхнем углу, обычный, 12 пт), инициалы и фамилию на русском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на русском языке (по центру, 10 пт), название статьи на русском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), инициалы и фамилию на английском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на английском языке (по центру, 10 пт), название статьи на английском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт);

текст статьи должен быть набран в редакторе Word, размер страницы: формат А4 (210 × 297 мм);

размер полей: 20 мм (все четыре поля), размер и тип шрифта основного текста: Times New Roman, 12 пт;

размеры символов в формулах (Equation): обычный – 12 пт, крупный индекс – 7, мелкий – 5, крупный символ – 15, мелкий – 12 пт;

буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавитов, математические символы такие, например, как cos, sin, max, min, – прямым шрифтом;

текст в таблицах, подписочные 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 менее 10 наименований), библиографическое описание источников на русском языке оформляется по требованиям ГОСТ 7.0.100-2018;

в романском алфавите (латинице) список литературы имеет заголовок *References* и оформляется по следующему образцу: Author1 A.A., Author2 A.A., Author3 A.A., Author4 A.A., Author5 A.A. Title of article [Nazvanie stat'i v romanskom alfavite]. Nazvanie zhurnala v romanskom alfavite – *Title of Journal*, 2014, no. 1, pp. 54 – 57.

Рукописи статей, опубликованных ранее или переданных в другие издания, не принимаются.

Число соавторов не должно превышать трех человек. Рекомендуемый объем статьи – не менее пяти и не более 10 страниц. В ином случае вопрос по объему статьи необходимо согласовать с редакцией журнала. Иллюстрации, схемы, таблицы, включаемые в текст статьи, учитываются в общем объеме текста.

Авторы должны избегать повторения одних и тех же данных в таблицах, на графиках и в тексте статьи.

В случае представления двух или более статей одновременно необходимо указывать желательную очередность их публикации.

В случае возвращения статьи автору для устранения замечаний или для ее сокращения датой представления статьи считается день получения редакцией журнала окончательного текста.

Принятые к публикации рукописи статей не возвращаются авторам.

Материалы, оформленные не в соответствии с указанными выше требованиями, не принимаются к публикации и не возвращаются.

Редакционный совет оставляет за собой право литературного редактирования статьи без согласования с авторами.

Научное издание

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

№ 4 (44) 2020

Научно-технический журнал «Известия Транссиба» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 03 июня 2009 г., свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-75780 от 23 мая 2019 г.

Номер ISSN – 2220-4245.

Подписной индекс в общероссийском каталоге НТИ агентства «Роспечать» – 66087.

Издание обрабатывается в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦа).

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Издание выходит с периодичностью 4 номера в год.

Цена свободная.

Редактор – Майорова Н. А.

Компьютерная верстка – Иванченко В. И.

Адрес редакции (издательства) и типографии: 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35;
тел.: (3812) 31-05-54; e-mail: izvestia_transsiba@mail.ru

Подписано в печать 30.12.2020.

Тираж 500 экз.

Дата выпуска: 30.12.2020.

