



Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
ОАО «Российские железные дороги»
Омский государственный университет
путей сообщения

Материалы четвертой всероссийской научно-технической конференции с международным участием



**Эксплуатационная надежность
локомотивного парка и повышение
эффективности тяги поездов**

Омск 2018

Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
ОАО «Российские железные дороги»
Омский государственный университет путей сообщения



ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ ЛОКОМОТИВНОГО ПАРКА И ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЯГИ ПОЕЗДОВ

Материалы IV всероссийской
научно-технической конференции
с международным участием

(8 ноября 2018 г.)

УДК 629.4.083; 629.4.014.2; 629.488
ББК 39.2

Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: Материалы IV всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2018. 227 с.

В сборник вошли статьи с результатами исследований, выполненных по комплексу научных направлений, посвященных тягово-энергетическому обеспечению перевозочного процесса и проблемам вождения поездов повышенной массы и длины; повышению эксплуатационной надежности и эффективности использования тягового подвижного состава; влиянию конструктивных особенностей тягового подвижного состава на эффективность перевозочного процесса; техническому обслуживанию и ремонту локомотивов; совершенствованию технологии и средств технического диагностирования тягового подвижного состава; проблемам обеспечения скоростного и высокоскоростного движения поездов, эффективности использования системы тягового электроснабжения и ее взаимодействия с электроподвижным составом.

Представленные в сборнике материалы могут быть использованы при модернизации существующих и создании новых типов и серий подвижного состава для железнодорожного транспорта, совершенствовании процессов его технического обслуживания и ремонта.

Сборник может быть полезен для научных сотрудников и специалистов, работающих в области железнодорожного подвижного состава.

Библиогр.: 175 назв. Табл. 24. Рис. 94.

Редакционная коллегия:

доктор техн. наук, профессор И. И. Галиев (отв. редактор);

доктор техн. наук, доцент С. М. Овчаренко;

доктор техн. наук, профессор В. Т. Черемисин;

доктор техн. наук, профессор В. А. Четвергов;

доктор техн. наук, доцент С. Г. Шантаренко (зам. отв. редактора).

Рецензенты: доктор техн. наук, профессор,

заслуженный деятель науки РФ В. А. Аксенов;

доктор техн. наук, профессор В. Н. Горюнов.

ISBN 978-5-949-41216-9

© Омский гос. университет
путей сообщения, 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ ЛОКОМОТИВНОГО ПАРКА

Анисимов А. С., Чернышков И. В., Метелев А. А. Экспериментальное исследование изменения эксплуатационных параметров работы дизеля ЯМЗ-7514 при работе по нагрузочной характеристике.....	5
Бакланов А. А., Есин Н. В., Шиляков А. П., Добролюбов И. О. Особенности обслуживания и ремонта безопасного локомотивного объединенного комплекса в условиях производственного участка.....	10
Бублик В. В., Гателюк О. В., Третьяков Е. А., Юрасов Д. В. Анализ перенапряжений и бросков тока в обмотках тяговых двигателей электровозов серии 2ЭС6 в переходных режимах.....	16
Кузнецов А. А., Муравьев Д. В., Усачева К. В. Комплексные методы контроля качества литья элементов подвижного состава.....	25
Харламов В. В., Попов Д. И., Стретенцев А. И. Повышение достоверности диагностирования состояния коммутации коллекторных электродвигателей подвижного состава железных дорог.....	33
Пономарев Е. В., Тараненко В. А. Конструктивные особенности и сервисное обслуживание электровозов серий 2ЭС6, 2ЭС10.....	41
Шкодун П. К., Огневский А. С., Супоня Д. В. Разработка алгоритма оценки технического состояния тяговых двигателей в динамических режимах.....	49
Даньшин В. Г., Комяков А. А. Анализ факторов, влияющих на эксплуатационные показатели компрессорного оборудования электроподвижного состава.....	56
Андриевский А. Г. Кожух зубчатой передачи локомотива с виброзащитным креплением к тяговому двигателю.....	61
Блинов А. П., Блинов П. Н., Бернс П. А. Алгоритм взаимодействия топливной и регулирующей аппаратуры дизеля при испытаниях на стендах.....	65
Буйносов А. П. Влияние на ресурс бандажей обработки колесных пар триботехническим составом.....	73
Буйносов А. П., Динисламов А. Р. Повышение эксплуатационной надежности поверхностно упрочненных деталей механической части электровозов	80
Иванов В. С., Баринев И. А. Цепи защиты транзисторного выпрямительно-инверторного преобразователя для электроподвижного подвижного состава переменного тока.....	86
Свечников А. А., Метальников И. В. Контроль и диагностика тепловозов 2ТЭ116У в эксплуатации.....	92
Федоров Е. В. Способ закрепления подвижного состава.....	98

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЯГИ ПОЕЗДОВ

А. Энх-Амгалан. Повышение эффективности тяги поездов на Улан-Баторской железной дороге.....	105
Доманов К. И., Истомин С. Г. Тяговые возможности электровоза двойного питания 2ЭВ120 на Западно-Сибирской железной дороге.....	111
Истомин С. Г., Юрасов О. Д., Штраухман А. А. Анализ параметров и режимов работы вспомогательного оборудования пригородных электропоездов постоянного тока серии ЭД4М .	119
Кузнецова М. А. Повышение эффективности методов диагностирования тяговых трансформаторов в условиях тяжеловесного движения	123
Никифоров М. М., Вильгельм А. С. Влияние массы составов и размеров движения поездов на эффективность использования энергии рекуперации на участках железных дорог переменного тока.....	129
Михеев В. А., Томилова О. С., Сергеев П. Б. Повышение производительности тягового подвижного состава в грузовом движении за счет использования инновационных полувагонов.....	139
Шилер В. В., Шилер А. В. Результаты натурных испытаний колесной пары с независимым вращением колес колесной пары.....	148
Сидоров О. А, Томилов В. В., Утепбергенова С. М. Исследование конструкции европолозов токоприемников электроподвижного состава для улучшения качества токосъема	153
Никонов А. В., Хусаинов Е. К. Оценка влияния регулируемых устройств компенсации реактивной мощности на работу фазочувствительных защит контактной сети переменного тока	160
Саркенов С. С. Влияние режимов питания межподстанционных зон на тяговое электропотребление в условиях интервальной организации движения поездов	165
Полевых Д. В. Снижение индуктивности реакторов в составе сглаживающих устройств тяговых подстанций	171
Абляимов О. С. Оценка тягового качества профиля пути участка Каттакурган – Навои при дизельной тяге.....	175
Баринов И. А., Иванов В. С. О перспективности применения систем бортового хранения рекуперированной энергии на рельсовом транспорте	181
Глущенко М. Д., Горюнов И. О. Методика совершенствования расчета магнитного поля на основе уравнения максвелла	189
Баранов В. А., Киселев А. А., Мазнев А. С. Оценка тяговых возможностей электровозов 2ЭС5Е и 3ЭС5К с длинносоставными поездами повышенной массы на участке Пергуба – Новый поселок	196
Абляимов О. С. К эффективности электровозов 3ВЛ80° на участке Каттакурган – Навои АО «Узбекистон темир йўллари».....	204
Плаксин А. В., Швецов С. В., Кульневич Е. С. О снижении расхода электрической энергии при эксплуатации пассажирских электровозов на равнинных участках железных дорог....	210
Анисимов А. С. Работа энергетических установок, вспомогательных систем и эффективность использования автономных локомотивов	217

УДК 629.4.016.015

А. С. Анисимов, И. В. Чернышков, А. А. Метелев

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ДИЗЕЛЯ ЯМЗ-7514 ПРИ РАБОТЕ ПО НАГРУЗОЧНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ

В статье представлены результаты испытаний дизель-генератора АД-200 на базе дизельного двигателя ЯМЗ-7514 при режимах его работы, дано описание экспериментальной установки и методики проведения измерений. Полученные результаты сравниваются с данными математического моделирования с целью оценки адекватности математической модели.

Ключевые слова: дизель, характеристика дизеля, расход топлива, продукты сгорания, математическая модель, результаты эксперимента, экспериментальная установка.

Alexandr S. Anisimov, Igor V. Chernyshkov, Alexandr A. Metelev

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

EXPERIMENTAL RESEARCH OF CHANGES IN OPERATIONAL YMZ-7514 DIESEL PARAMETERS DURING OPERATING THE LOAD CHARACTERISTIC

The article presents the results of tests of the AD-200 diesel generator based on the YaMZ-7514 diesel engine under the conditions of its operation, and a description of the experimental setup and measurement technique is given. The results obtained are compared with the data of mathematical modeling in order to assess the adequacy of the mathematical model.

Keywords: diesel, diesel characteristic, fuel consumption, exhaust data, mathematical model, experimental research results, experimental installation.

Двигатели внутреннего сгорания, являясь одной из важнейших частей, как транспортного комплекса, так и других отраслей промышленности, представляют собой сложные технические средства, что верно как в отношении их конструкции, так и в отношении физических процессов, протекающих в них.

При проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по совершенствованию двигателей внутреннего сгорания эксперименты занимают центральное положение, так как только с их помощью возможно с достаточной точностью судить о влиянии тех или иных факторов на работу двигателя.

Описываемые лабораторные испытания проводились с целью проверки достоверности описания математической моделью динамики изменения удельного расхода топлива дизелем ЯМЗ-7514 при работе по нагрузочной характеристике.

Определение удельного расхода топлива математической моделью происходит на основе предварительно рассчитанных значений давления и температуры в цилиндре дизеля (рис. 1) в процессах сжатия, сгорания и расширения [1].

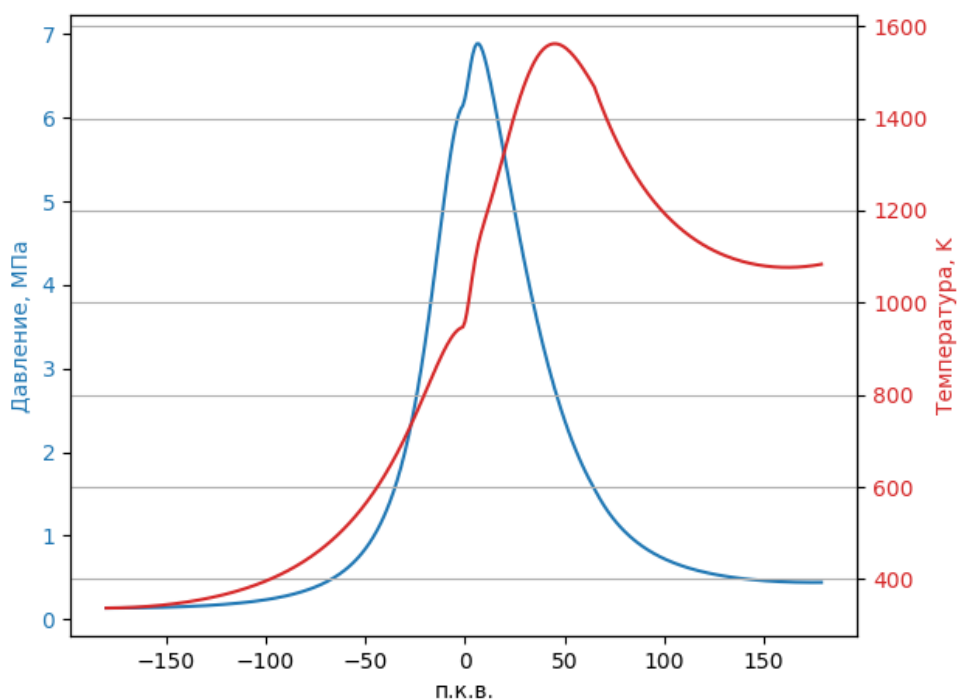


Рис. 1. Значения давления и температуры газов в цилиндре дизеля, полученные в результате моделирования

В ходе эксперимента исследовались характеристики дизеля на трех режимах работы при неизменной частоте вращения и различной нагрузке. Измерения производились после работы двигателя в течение 20 минут на одном режиме до установления постоянной температуры масла и охлаждающей жидкости. Показания измерения каждого прибора фиксировались не менее шести раз для учета погрешностей и исключения ошибок [2].

Измерения расхода топлива производились на основе массового метода путем забора топлива из мерной ёмкости, установленной на весах. При этом была смонтирована система трубопроводов на основе двух трехходовых кранов (рис. 2), позволяющая осуществлять наполнение и опорожнение мерной емкости, что позволило упростить процесс проведения эксперимента.

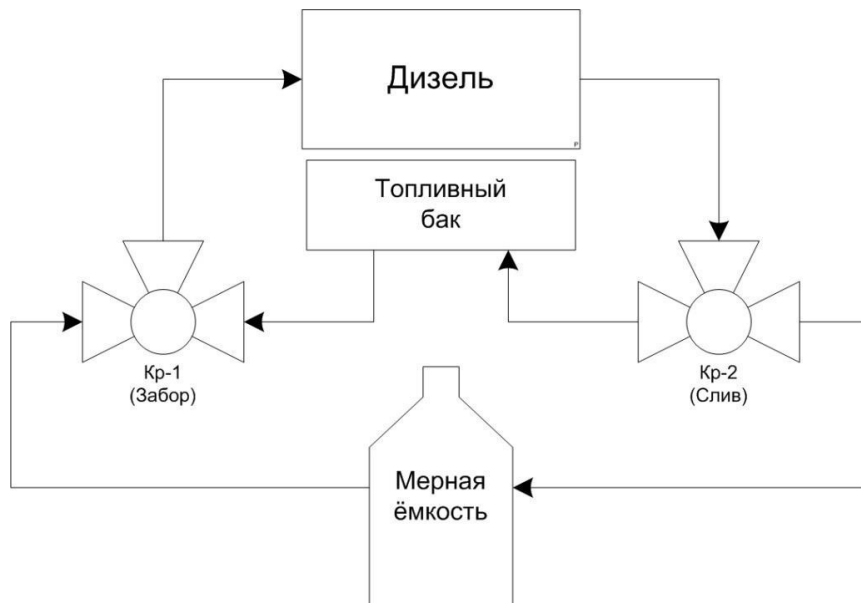


Рис. 2. Схема соединения трубопроводов для измерения расхода топлива

Величина максимального давления сгорания фиксировалась с помощью максиметра и пересчитывалась с учетом поправки на искажения, вносимые индикаторным каналом по зависимости [3]:

$$\Delta P_{\text{ик}} = \frac{n_d}{1,25 \cdot 10^5} \cdot \frac{l_{\text{ик}}}{d_{\text{ик}}} \cdot P_z, \quad (1)$$

где n_d — частота вращения коленчатого вала дизеля, мин^{-1} ;

$l_{\text{ик}}$ — длина индикаторного канала, м;

$d_{\text{ик}}$ — диаметр индикаторного канала, м;

P_z — максимальное давление сгорания, МПа.

Измерения температуры охлаждающей жидкости (T_B) и масла (T_M), частоты вращения коленчатого вала дизеля (n_d) и вырабатываемой мощности (N_e) производились с помощью установленных на дизель-генераторе штатных преобразователей.

Кроме этого, на каждом режиме контролировались параметры наддувочного воздуха, такие как давление и температура после компрессора (P_k и T_{k1}), температура воздуха после охладителя (T_k), температура отработавших газов перед

и после газовой турбины (T_{Γ} и $T_{\Gamma 0}$). В ходе всего исследования производился контроль параметров окружающей среды ($P_{\text{атм}}$ и $T_{\text{атм}}$).

Результаты измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения основных контролируемых в ходе эксперимента параметров работы
дизеля

Обозначение величины, единица измерения	Режим испытания дизеля		
	1	2	3
$B_{\text{ч}}$, кг/ч	19,2	32,9	44,1
P_z , кг/см ²	51,8	68,5	84,9
P_k , кг/см ²	0,2	0,5	0,85
n_d , мин ⁻¹	1450	1450	1450
N_e , кВт	79,2	154,1	207,7
T_B , °C	80	82	83
T_M , °C	80	80	80
$P_{\text{атм}}$, мм рт. ст.		761	
$T_{\text{атм}}$, °C		35	
T_k , °C	50	50	50
T_{k1} , °C	68	90	103
T_{Γ} , °C	318	455	489
$T_{\Gamma 0}$, °C	250	337	380

После обработки результатов измерений, полученные значения удельного расхода топлива дизелем ЯМЗ-7514 для всех исследуемых режимов работы были сравнены с аналогичными значениями моделирования аналогичных режимов работы двигателя.

Результаты сравнения опытных ($b_{\text{еэ}}$) и расчетных ($b_{\text{ер}}$) значений удельного расхода топлива представлены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение экспериментальных и расчетных значений удельного расхода
топлива дизелем ЯМЗ-7514

Режим испытаний	Значение удельного расхода топлива, кг/(кВт·ч)		Точность
	$b_{\text{еэ}}$	$b_{\text{ер}}$	Δ , %
1	0,242	0,239	1,24
2	0,213	0,216	1,40
3	0,212	0,215	1,41

Сравнительный анализ данных позволяет говорить о достаточно хорошей сходимости опытных и расчетных, получаемых при моделировании,

результатов. Разница между значениями расхода топлива не превышает 2 %, что позволяет считать математическую модель, представленную в [1], возможной для использования в дальнейших исследованиях.

Список литературы

1. Анисимов А. С. Моделирование процесса сгорания топлива в дизеле тепловоза с использованием уравнения двухфазного тепловыделения / А. С. Анисимов, И. В. Чернышков // Известия Транссиба. – 2016. – №1. – С. 2-10.
2. Семенов, Б. А. Инженерный эксперимент в промышленной теплотехнике, теплоэнергетике и теплотехнологиях: Учебное пособие / Б.А. Семенов. 2-е издание, доп. – СПб.: Изд-во «Лань», 2013. – 400 с.
3. Райков, И. Я. Испытания двигателей внутреннего сгорания: Учеб. для вузов / И.Я. Райков. – М.: Высшая школа, 1975. – 320 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Анисимов Александр Сергеевич
Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Кандидат технических наук, доцент
кафедры «Локомотивы» ОмГУПС.
Тел.: +7 (3812) 31-34-17.
E-mail: anisimovas1971@mail.ru

Чернышков Игорь Владимирович
Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Аспирант кафедры «Локомотивы»
ОмГУПС.
Тел.: +7 (3812) 31-34-17.
E-mail: chernyshkovigor@yandex.ru

Метелев Александр Александрович
Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Аспирант кафедры «Локомотивы»
ОмГУПС.
Тел.: +7 (3812) 31-34-17.
E-mail: nice.metelev@list.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anisimov Alexandr Sergeevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian
Federation.
Candidate of Engineering Sciences, Associate
Professor of department «Locomotives»
OSTU.
Phone: +7 (3812) 31-34-17.
E-mail: anisimovas1971@mail.ru

Chernyshkov Igor Vladimirovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian
Federation.
Postgraduate of the department
«Locomotives» OSTU.
Phone: +7 (3812) 31-34-17.
E-mail: chernyshkovigor@yandex.ru

Metelev Alexandr Alexandrovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian
Federation.
Postgraduate of the department
«Locomotives» OSTU.
Phone: +7 (3812) 31-34-17.
E-mail: nice.metelev@list.ru

А. А. Бакланов, Н. В. Есин, А. П. Шиляков, И. О. Добролюбов

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

ОСОБЕННОСТИ ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА БЕЗОПАСНОГО ЛОКОМОТИВНОГО ОБЪЕДИНЕННОГО КОМПЛЕКСА В УСЛОВИЯХ РЕМОНТНОГО ДЕПО

Статья посвящена проблемам, связанным с организацией технического обслуживания и ремонта современных локомотивных систем безопасности движения поездов. Приведена статистика отказов Безопасного локомотивного комплекса БЛОК, обслуживаемого ремонтным депо ТЧР-1 Западно-Сибирской железной дороги. Сделан акцент на основных проблемах в существующей системе обслуживания комплекса БЛОК.

Ключевые слова: безопасность движения поездов, локомотивные приборы безопасности, техническое обслуживание, ремонт, ремонтное депо, безопасный локомотивный объединённый комплекс.

Alexander A. Baklanov, Nikolai V. Esin, Andrei P. Shilyakov, Ilya O. Dobrolyubow

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

FEATURES OF REPAIR OF THE BLOCK SYSTEM UNDER CONDITIONS OF INDUSTRIAL SECTION

The article deals with the issues related to the organization of maintenance and repair of the BLOCK system in the production site. The analysis of repairs of the BLOCK complex at the production site of Moskovka is carried out. Identified the main problems in the existing maintenance system of the BLOCK.

Keywords: train traffic safety, locomotive safety devices, maintenance, repair, production site, safe locomotive integrated complex.

Одним из главных условий эксплуатации железных дорог России является безусловное обеспечение безопасности движения поездов. Для обеспечения безопасности движения, помимо прочих факторов, применяются локомотивные системы безопасности.

Самыми совершенными и эффективными на данный момент являются такие системы, как Телемеханическая система контроля бодрствования

машиниста (ТСКБМ), Система автоматического управления торможения поездов (САУТ) и Комплексное локомотивное устройство безопасности КЛУБ [1]. Эти устройства выполнены на современном техническом уровне.

Обслуживание и ремонт приборов безопасности выполняют предприятия Дирекции по ремонту локомотивов ОАО «РЖД» – ремонтные депо ТЧР (рис. 1).

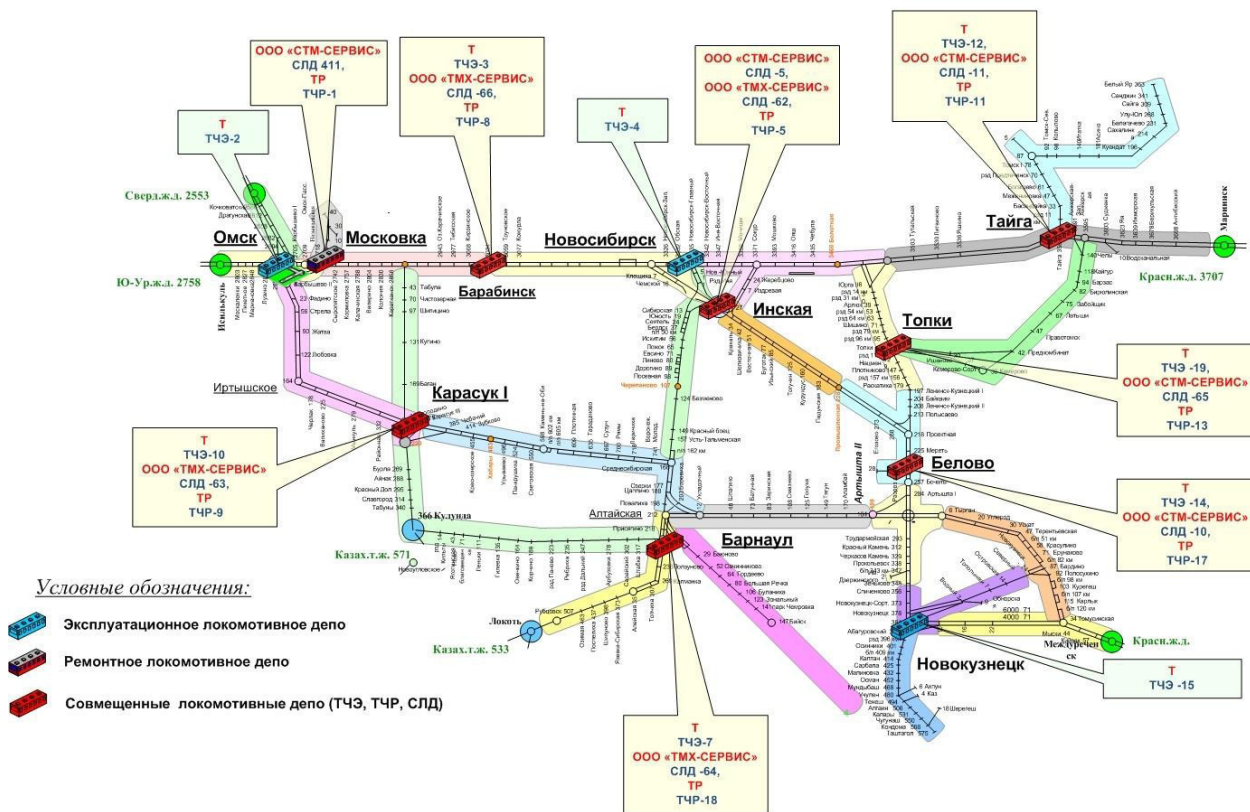


Рис. 1. Схема расположения ремонтных депо на Западно-Сибирской железной дороге

Наиболее передовым из ремонтных депо Западно-Сибирской железной дороги является ТЧР-1 Москвка (г. Омск). Это депо одним из первых приступило к освоению Безопасного локомотивного объединённого комплекса (БЛОК).

Безопасный локомотивный объединённый комплекс был разработан в НПО «САУТ» совместно с ОАО «НИИАС» и ЗАО «Нейроком» и предназначен для магистрального подвижного состава. Имеются также модификации для установки на специальном самоходном подвижном составе на комбинированном ходу (ССПС-КХ) и моторвагонном подвижном составе (МВПС).

В едином комплексе объединены функции таких систем, как КЛУБ-У, САУТ-ЦМ/485 и ТСКБМ.

Представление об общем составе БЛОК дает рис. 2.

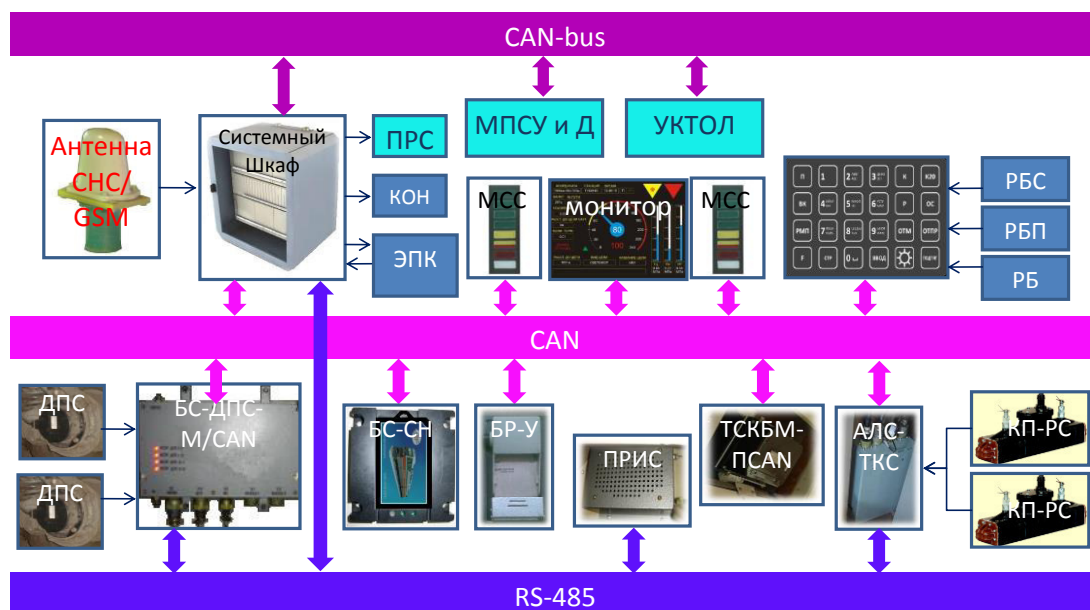


Рис. 2. Блок-схема безопасного локомотивного объединенного комплекса

Система состоит из ряда модулей, связанных между собой интерфейсами CAN, CAN-bas и RS-485. Основным модулем является системный шкаф (СШ), осуществляющий реализацию функций контроля безопасного следования поезда путем обработки информации от датчиков и других модулей БЛОК, расчета допустимых параметров движения поезда и сравнение их с фактическими, информирование машиниста и т.д.

Входными параметрами являются данные от датчиков пути и скорости (ДПС), информация с пути о сигналах светофоров и данные шлейфов САУТ, а также другая информация.

Также имеется функция контроля бдительности машиниста с помощью встроенной системы ТСКБМ. Антенна СНС/GSM получает сигналы от спутников GPS о позиционировании локомотива. БЛОК взаимодействует с унифицированный комплексом тормозного оборудования локомотивов УКТОЛ а также микропроцессорной системой управления и диагностирования локомотива МПСУ и Д.

Для информирования машиниста о поездной ситуации используется пульт речевых информационных сообщений ПРИС. Контроль за работой машиниста в поездке осуществляется путем записи поездки на съемный носитель (СН) либо в блок регистрации (БР-У).

Выполнен БЛОК с использованием самых современных достижений науки и

техники. Однако все же накопленный за ряд лет опыт эксплуатации выявил, что БЛОК подвержен отказам, требующим постановки системы в ремонт.

На рис. 3 представлена статистика ремонтов модулей комплекса БЛОК в период с 2013 года по 2018 годы. По данным рис. 3 видно, что причинами отказов являлись такие модули, как АЛС-ТКС, КП-РС, БС-ДПС, СШ и др.

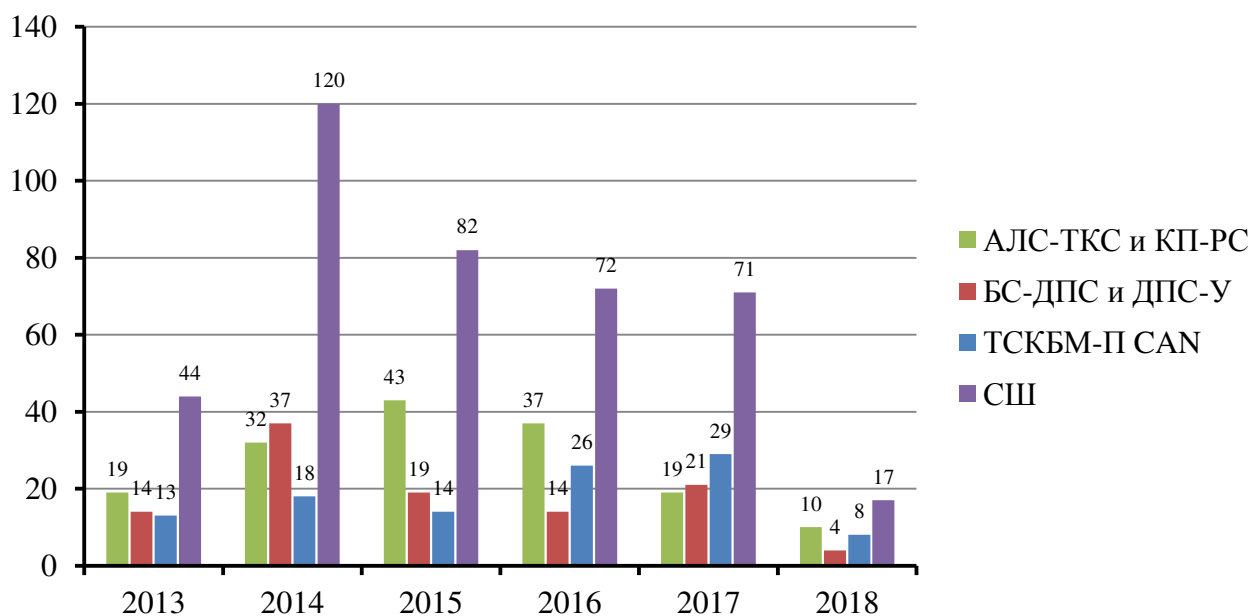


Рис. 3. Статистика ремонтов БЛОК

Основная доля отказов приходится на системный шкаф. Статистика ремонтов модулей системного шкафа, приведенная на рис. 4, дает представление о наиболее часто ремонтируемых элементах. Это такие модули, как центральный обработчик (ЦО), источник питания (ИП-ЛЭ), вычислитель ВС-САУТ и др.

Для обеспечения исправного технического состояния элементов системы БЛОК предусмотрен соответствующий технологический процесс (рис. 5). В ремонтном депо ячейки и модули системы БЛОК проверяют на специальных стендах КПА-БЛОК, где выявляют имеющиеся неисправности. В частности, стенд КПА-БЛОК под управлением компьютера тестирует ячейки системного шкафа и выдает протокол проверки. По результатам проверки, если выявлен отказ ячейки, делается попытка отремонтировать ее силами ремонтного депо. Однако не всегда удаётся отремонтировать ячейку в условиях депо. Чаще ячейку просто заменяют на исправную, а отказавшую отправляют на завод, что вызывает повышенные затраты времени и средств.

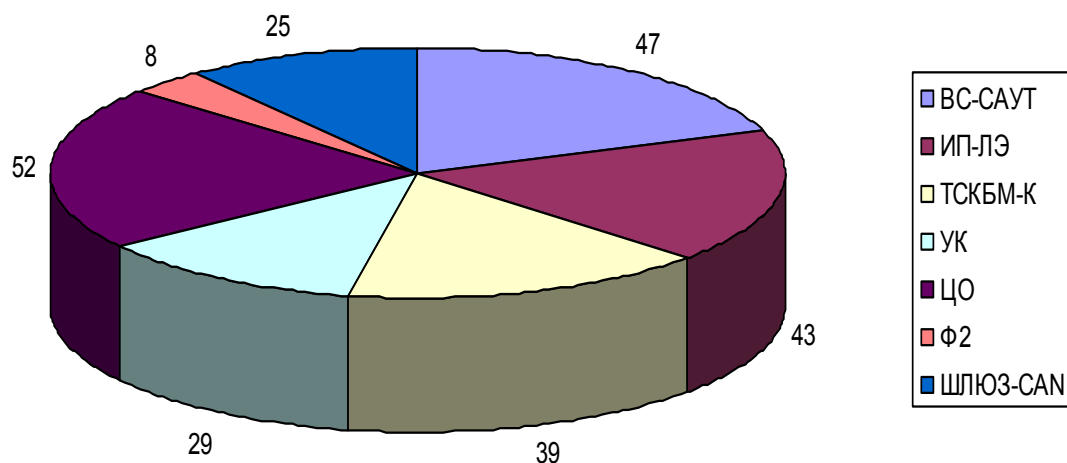


Рис. 4. Статистика отказов модулей СШ

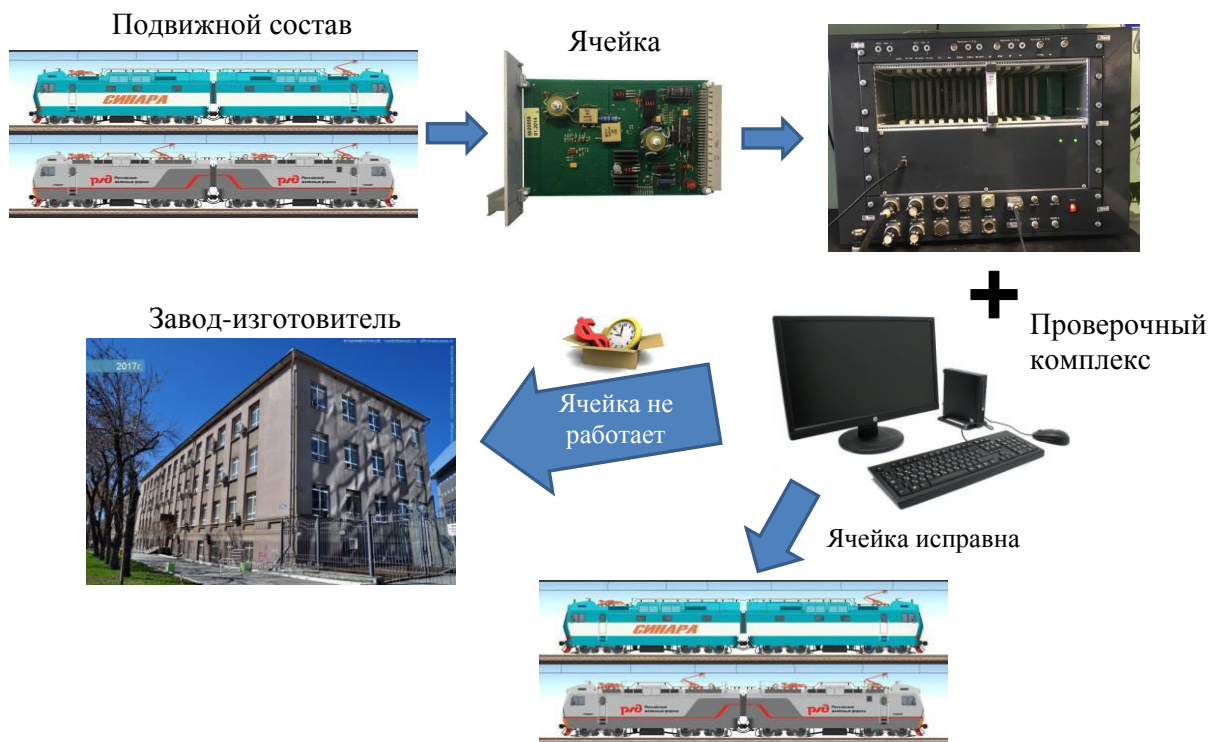


Рис. 5. Существующий процесс ремонта

Одна из основных причин сложившейся ситуации кроется в отсутствии методик ремонта модулей современных приборов безопасности. Крайне актуальной задачей является создание подобных методик для всех ремонтных депо ТЧР не только Западно-Сибирской железной дороги, но и для остальных железных дорог ОАО РЖД. Используя современные подходы к ремонту приборов безопасности в условиях ремонтных депо ТЧР, можно будет

сократить затраты на обслуживание и ремонт приборов безопасности и повысить эффективность ремонтного производства в целом.

Список литературы

1. Бервинов, В. И. Локомотивные устройства безопасности / В. И. Бервинов, Е. Ю. Доронин. – М.: Маршрут, 2005. – 156 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бакланов Александр Алексеевич

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

Есин Николай Васильевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-19.
E-mail: NikVE@mail.ru

Шиляков Андрей Петрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-19.

Добролюбов Илья Олегович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Студент электромеханического факультета ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-19.

INFORMATION ABOUT THE AUTORS

Baklanov Alexander Alekseevich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.
Candidate of Engineering Sciences, Associate professor of the department «Rolling stock of electric railways» OSTU.
Phone: (3812) 31-34-19.
E-mail: aleksbakl@yandex.ru

Esin Nikolai Vasilyevich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.
Candidate of Engineering Sciences, Associate professor of the department «Rolling stock of electric railways» OSTU.
Phone: (3812) 31-34-19.
E-mail: NikVE@mail.ru

Shilyakov Andrei Petrovich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.
Candidate of Engineering Sciences, Associate professor of the department «Rolling stock of electric railways» OSTU.
Phone: (3812) 31-34-19.

Dobrolyubow Ilya Olegovich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.
Student of the Electromechanical faculty of the OSTU.
Phone: (3812) 31-34-19.

В. В. Бублик¹, О. В. Гателюк¹, Е. А. Третьяков¹, Д. В. Юрасов²

¹Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация,

²Сервисное локомотивное депо Московка, г. Омск, Российская Федерация

АНАЛИЗ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ И БРОСКОВ ТОКА В ОБМОТКАХ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВЗОВ СЕРИИ 2ЭС6 В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ

В статье выполнен анализ переходных процессов изменения токов и напряжений в обмотках тяговых двигателей электровозов серии 2ЭС6 с целью определения необходимого комплекса мер по повышению их надежности в эксплуатационных условиях. Результаты моделирования позволили выявить особенности распределения токов в силовой цепи питания тяговых двигателей электровозов серии 2ЭС6 в переходных режимах, вызванных скачком напряжения, а также возникающие при этом перенапряжения. Получены временные зависимости токов и напряжений при различных характеристиках индуктивного шунта и токов возбуждения тяговых двигателей в рассматриваемых переходных режимах. Полученные результаты могут быть использованы при обосновании мероприятий по повышению надежности тяговых двигателей электровозов серии 2ЭС6 в эксплуатационных условиях.

Ключевые слова: электровоз серии 2ЭС6, переходные процессы, тяговый двигатель, перенапряжения.

Vladimir V. Bublik¹, Oleg V. Gatelyuk¹, Evgeny A. Tretyakov¹, Dmitry V. Yurasov²

¹Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation,

²Service locomotive depot of Moscovka, Omsk, the Russian Federation

ANALYSIS OF OVERLAPPED VOLTAGES AND CROSS-CURRENTS IN WINDINGS OF SNAKE ELECTRIC MOTORS OF SERIES 2ES6 IN TRANSITION REGIMES

The article analyzes the transient processes of current and voltage change in the windings of traction engines of electric locomotives of the 2ES6 series with the purpose of determining the necessary set of measures to increase their reliability under operational conditions. The results of the simulation made it possible to reveal the features of the distribution of currents in the power circuit for the traction motors of electric locomotives of the 2ES6 series in the transient regimes caused by the voltage jump and the restoration of the voltage after its disappearance, as well as the resulting overvoltages. Time dependences of currents and voltages are obtained for different characteristics of the inductive shunt and excitation currents of traction motors in the considered transient regimes. The obtained results can be used to justify measures to improve the reliability of traction engines of electric locomotives of the 2ES6 series under operating conditions.

Keywords: electric locomotive series 2ES6, transients, traction motor, overvoltage.

Введение. В последние годы наблюдается существенный рост отказов тяговых двигателей (ТД) электровозов серии 2ЭС6, связанных с пробоями изоляции и межвитковыми замыканиями обмоток якоря, возбуждения, с перебросами электрической дуги по коллектору и др.

Ряд авторов [1, 2] в качестве основных причин низкой надежности коллекторных тяговых двигателей электровозов серии 2ЭС6 по сравнению с электровозами серии ВЛ10 указывают следующие: рабочее независимое возбуждение тяговых двигателей, снижение количества пазов компенсационной обмотки, коллекторного деления, снижение изоляционных промежутков в элементах тяговых двигателей, увеличение максимальной окружной скорости по коллектору, снижение номинального расхода охлаждающего воздуха. Известные проблемы [2] возникают с тяговыми двигателями при питании двух последовательно включенных обмоток возбуждения от одного преобразователя собственных нужд. При этом значительная часть указанных отказов возникает именно в неустановившихся режимах работы тяговых двигателей. Поэтому исследование переходных процессов изменения токов и напряжений в обмотках тяговых двигателей электровозов серии 2ЭС6 является актуальной задачей.

Постановка задачи. Исследования переходных процессов в коллекторных тяговых двигателях постоянного тока электровозов различных серий нашли отражение в работах, связанных с анализом потенциальной устойчивости тяговых электродвигателей грузовых электровозов 2ЭС6 в переходных режимах [2], моделировании бросков тока, напряжений в тяговых двигателях с последовательным возбуждением и коммутационных процессов электровозов постоянного тока старых серий [3]. Для решения указанных проблем тяговых двигателей электровозов серии 2ЭС6 требуются дополнительные теоретические и экспериментальные исследования.

Основной проблемой данного исследования является анализ переходных процессов изменения токов и напряжений, вызванных скачком напряжения в обмотках тяговых двигателей электровозов серии 2ЭС6 в режиме тяги.

В задачи исследования входит составление и решение уравнений, описывающих состояние токов и напряжений в силовой цепи питания тяговых двигателей типа ЭДП 810; выявление особенностей распределения токов в обмотке возбуждения и шунтовой ветви тяговых двигателей в переходных

режимах; определение бросков токов и перенапряжений в обмотках тяговых двигателей и индуктивном шунте, получение временных зависимостей токов и напряжений при различных характеристиках индуктивного шунта и токов возбуждения тяговых двигателей в рассматриваемых переходных режимах.

Теория. На характер переходных процессов в тяговых двигателях существенное влияние оказывают параметры внешних цепей. Схема силовых цепей электровозов серии 2ЭС6 для параллельной ветви из двух последовательно включенных тяговых двигателей представлена на рис. 1.

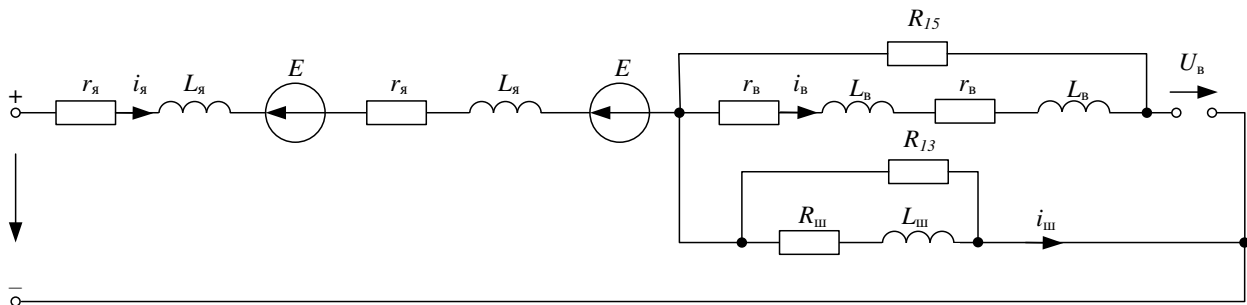


Рис. 1. Схема подключения тяговых двигателей электровоза 2ЭС6

Основным рабочим режимом возбуждения тяговых электродвигателей является независимое возбуждение, при необходимости имеется возможность перехода на последовательное возбуждение. Обмотки возбуждения каждой пары тяговых двигателей получают питание от статического преобразователя. В контур обмоток возбуждения двигателей введен сглаживающий реактор (шунт) $L_{ш}$, который также включен в цепь обмоток якоря [4].

Электромагнитные процессы в электрических цепях протекают быстрее по сравнению с изменением скорости электровоза, поэтому уравнения моментов на валу ТД можно не рассматривать [5]. Аналогично принята постоянная частота вращения ТД.

При анализе переходных режимов необходимо учитывать влияние на них вихревых токов в ТД [5]. Вихревые токи в магнитопроводе ТД затягивают изменение основного магнитного потока и способствуют возникновению затяжных бросков тока якоря.

Определение коэффициента вихревых токов магнитопровода аналитическим путем затруднено и недостаточно точно, поэтому его обычно находят опытным путем. Для этого осциллографируют искусственно создаваемые переходные процессы в ТД [5].

Представленная схема подключения тяговых двигателей может быть описана следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} U_{\text{я}} = 2L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + L_{\text{ш}} \frac{di_{\text{ш}}}{dt} + 2i_{\text{я}} r_{\text{я}} + i_{\text{ш}} \frac{r_{\text{ш}} \cdot R_{13}}{r_{\text{ш}} + R_{13}} + E; \\ U_{\text{в}} = i_{\text{в}} \frac{2r_{\text{в}} \cdot R_{15}}{2r_{\text{в}} + R_{15}} - i_{\text{ш}} \frac{r_{\text{ш}} \cdot R_{13}}{r_{\text{ш}} + R_{13}} - L_{\text{ш}} \frac{di_{\text{ш}}}{dt} + 2L_{\text{в}} \frac{di_{\text{в}}}{dt}; \\ i_{\text{я}} = i_{\text{в}} + i_{\text{ш}}; i_{\text{в}} = i_{\mu} + 2p\sigma w_{\text{в}} \frac{T_{\text{вТ}}}{L_{\text{в}}} \frac{d\Phi}{dt}; \\ \Phi = f(i_{\mu}), \end{cases} \quad (1)$$

где $L_{\text{я}}, L_{\text{в}}, L_{\text{ш}}$ – индуктивные сопротивления обмоток якоря (добавочных полюсов, компенсационной обмотки), возбуждения, шунта соответственно (см. рис. 1); $r_{\text{я}}, r_{\text{в}}$ – сопротивление обмоток якоря, возбуждения; $E = 2C_n \Phi n$ – якорная противо-ЭДС; C_n – конструктивный коэффициент; Φ – магнитный поток; n – частота вращения ТД; $i_{\text{я}}, i_{\text{в}}, i_{\text{ш}}$ – токи якоря, возбуждения и шунта; i_{μ} – ток намагничивания, соответствующий по нагрузочной характеристике ТД $\Phi = f(i_{\mu})$ текущему значению магнитного потока; p – число пар полюсов ТД; σ – коэффициент рассеяния; $w_{\text{в}}$ – число витков катушки обмотки возбуждения; $T_{\text{вТ}}$ – постоянная времени электрических переходных процессов в контуре вихревых токов.

При исследовании переходных процессов представляется возможным не считаться с влиянием на магнитный поток машины поперечной реакции якоря. При переходном процессе намагничивающая сила, действующая по оси главных полюсов, является алгебраической суммой магнитодвижущих сил обмотки возбуждения и вихревых токов, которые пропорциональны скорости изменения магнитного потока и противодействует его изменению. Таким образом, действие реакции якоря в переходном процессе в значительной степени уравновешивается действием вихревых токов [5].

Параметры схемы замещения подключения тяговых двигателей типа ЭДП 810 электровоза 2ЭС6 представлены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные

$L_{я}, \Gamma\text{H}$	$L_{в}, \Gamma\text{H}$	$L_{ш}, \Gamma\text{H}$	$r_{я}, \text{Ом}$	$r_{в}, \text{Ом}$	$r_{ш}, \text{Ом}$	$R_{л5}, \text{Ом}$	$R_{л3}, \text{Ом}$
0,0026	0,0093	0,012	0,0693	0,0171	0,00545	8	4

Решение системы нелинейных дифференциальных уравнений (1) выполнялось численными методами в программном продукте Маткад.

Результаты моделирования. Графики электрических переходных процессов на основе системы уравнений (1) представлены на рис. 2. Ток якоря тягового двигателя при скачке напряжения ΔU выражается через начальное значение тока якоря, протекающего до начала переходного процесса $I_{я}(0)$ [5]:

$$I_{я}^{\max} = I_{я}(0) + \frac{\Delta U}{r_{д}}, \quad (2)$$

где $r_{д}$ – сопротивление двигательной цепи.

Регулирование тока возбуждения тягового двигателя электровоза 2ЭС6 осуществляется по закону [4]:

$$I_{в} = I_{в0} + kI_{я}, \quad (3)$$

где $I_{в0}$ – задание минимального тока возбуждения, установленное системой управления; k – коэффициент компаундирования обратной связи по току якоря.

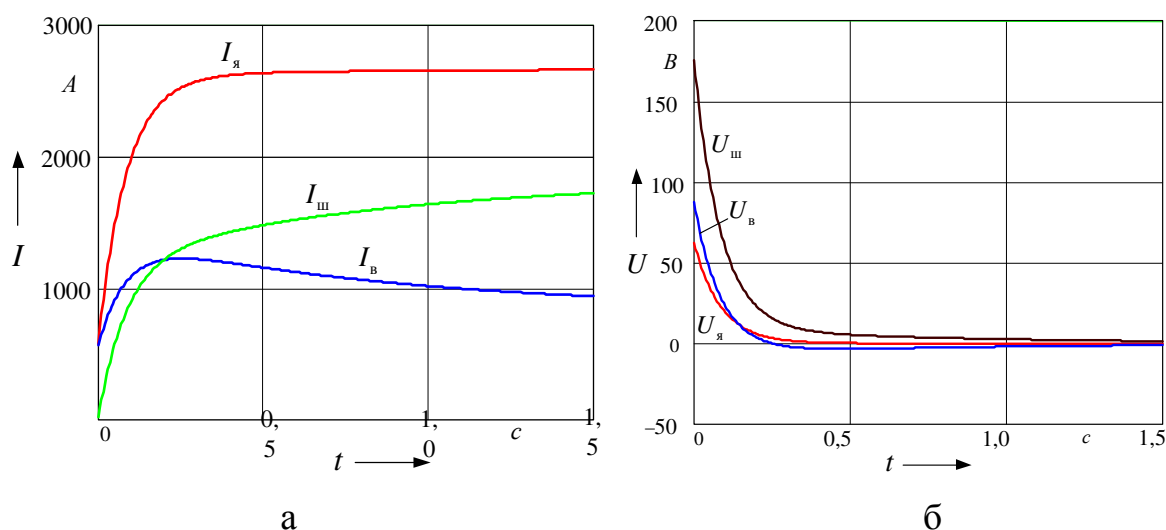


Рис. 2. График электрических переходных процессов токов (а) и напряжений (б) в тяговом двигателе электровоза 2ЭС6 при скачке напряжения

Коэффициент компаундирования определяется через отношение омического сопротивления реактора $L_{ш}$ к суммарному сопротивлению цепи реактора и возбуждения.

Распределение токов в обмотке возбуждения и шунтовой ветви тяговых двигателей играет определяющую роль в надежности тяговых двигателей в переходных режимах.

На рис. 3 представлен график зависимости тока возбуждения от тока якоря в тяговом двигателе электровоза 2ЭС6 при скачке напряжения на 20%. На начальном этапе переходного процесса наблюдается существенная разница в значениях токов возбуждения и якоря, что существенно ухудшает потенциальные условия на коллекторе тягового двигателя.

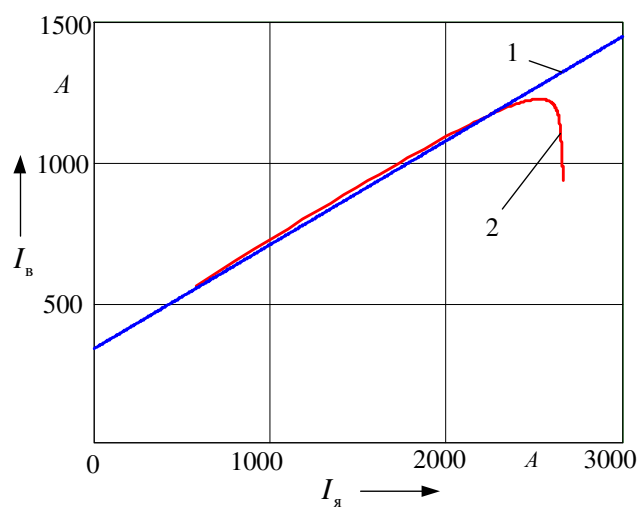


Рис. 3. График зависимости тока якоря от тока возбуждения в тяговом двигателе электровоза 2ЭС6 при скачке напряжения:

1 — график по закону регулирования (3); 2 — график, вытекающий из рис. 2, а и системы уравнений (1)

Величина тока возбуждения определяется величиной напряжения статического преобразователя и тока якоря. Соотношение токов в схеме подключения тяговых двигателей электровоза 2ЭС6 в установившихся режимах представлено на рис. 4. В зависимости от соотношения между токами якоря и возбуждения ток в шунтовой цепи принимает отрицательные, положительные значения и может равняться нулю.

Особенностью представленной на рис. 1 схемы включения тяговых двигателей является наличие гальванической связи контура возбуждения $M1$ —

$M2 - L_{ш}$ с цепью якоря, при этом шунтовая ветвь с $L_{ш}$ является общей для протекания тока якоря и возбуждения. В свою очередь на качество переходных процессов по условиям коммутации оказывает влияние соотношение между током якоря и возбуждения, особенно в режимах ослабления возбуждения. Поэтому индуктивные и активные сопротивления шунтовой ветви должны обеспечивать необходимое качество переходных процессов при скачке напряжения со стороны питания тяговых двигателей.

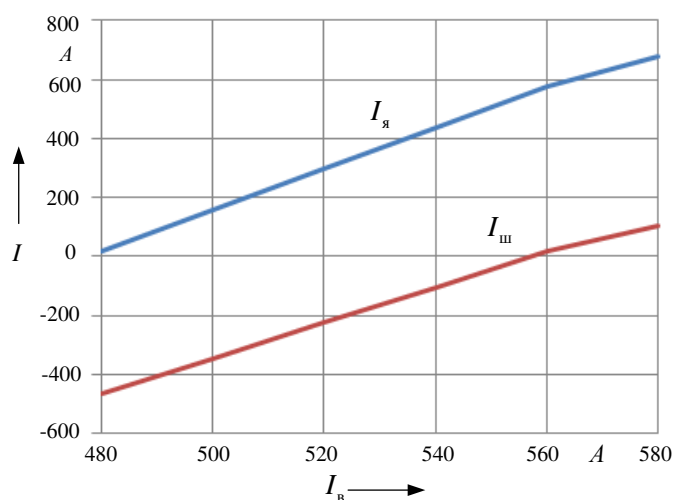


Рис. 4. График изменения токов якоря и шунта от тока возбуждения

Влияние увеличения индуктивности $L_{ш}$ вдвое на токи в рассматриваемой схеме питания тяговых двигателей при скачке напряжения на 20% представлены на рис. 5.

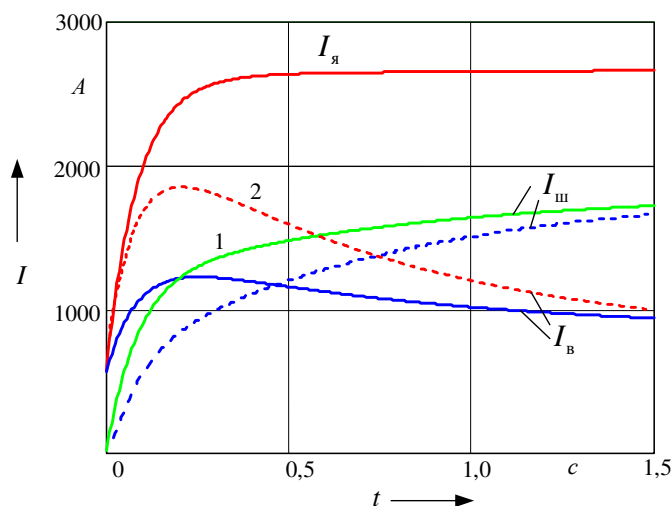


Рис. 5. График электрических переходных процессов токов в тяговом двигателе электровоза 2ЭС6 при скачке напряжения на 20%:

1 — $L_{ш} = 12$ мГн; 2 — $L_{ш} = 24$ мГн

Интерпретация полученных результатов. При скачке напряжения на 20% в цепи питания тяговых двигателей расчетный бросок тока якоря составляет около 4,5 от номинального, возбуждения – 1,4. Таким образом основной бросок тока якоря приходится на шунтовую ветвь, при этом существенно меняется соотношение между токами якоря и возбуждения относительно номинального режима. Перенапряжения на обмотках тягового двигателя не превышают 95 В.

Коэффициент компаундирования в рассматриваемом переходном режиме может принимать отрицательные значения из-за особенностей токораспределения в принятой схеме питания тяговых двигателей с «нечисто независимым возбуждением». Временная несбалансированность изменения токов якоря и возбуждения отрицательно сказывается на коммутации. В рассматриваемой схеме (рис. 1) токораспределение в переходных режимах работы тяговых двигателей не соответствует таковому в установившихся режимах работы.

Увеличение индуктивности реактора в шунтовой ветви не позволяет полностью сбалансировать временные процессы изменения токов якоря и возбуждения. Тем более указанный реактор, установленный в цепи тока возбуждения, сглаживает пульсации преобразователя собственных нужд и не может иметь значительную индуктивность в том числе из-за возрастания перенапряжений и ухудшения качества регулирования тока возбуждения системой управления.

Заключение. Практическая значимость представленного исследования заключается в получении представленных результатов амплитуд и временного распределения токов и напряжений в силовой цепи питания тяговых двигателей электровоза 2ЭС6 в переходном режиме.

Список литературы

1. Савелов, Н. С. Ускоренный анализ переходных процессов в тяговом двигателе постоянного тока [Текст] / Н. С. Савелов, П. Г. Колпахчян, Ч. Д. Мань // Известия высших учебных заведений. Электромеханика / Южно-Российский гос. техн. ун-т. – Новочеркасск. – 2010. – № 4. – С. 14 – 17.
2. Дурандин, М. Г. Анализ потенциальной устойчивости тяговых электродвигателей грузовых электровозов 2ЭС6 [Текст] / М. Г. Дурандин, И. Г. Иванов // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2015. – № 1 (44). – С. 84 – 92.
3. Харламов, В. В. Анализ переходных процессов тяговых электрических двигателей электровозов с учетом условий эксплуатации [Текст] /

В. В. Харламов, П. К. Шкодун, Д. И. Попов, А. В. Проненко // Известия ТПУ / Томский техн. ун-т. – Томск. – 2012. – Т. 321. № 4. – С. 72 – 74.

4. Электровоз грузовой постоянного тока 2ЭС6 с коллекторными тяговыми двигателями. Руководство по эксплуатации. Ч. 1 – ОАО «Уральский завод железнодорожного машиностроения». – М.: – 2008. – 166 с.

5. Щербаков, В. Г. Тяговые электрические машины [Текст] / Под ред. Щербакова В.Г., Петрушина А.Д. – М.: УМЦ ЖДТ. – 2016. – 641 с.

6. Демидович, Б. П. Дифференциальные уравнения [Текст] / Б.П. Демидович, В.П. Моденов. – СПб.: Лань, 2008. – 288 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бублик Владимир Васильевич

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.

Гателюк Олег Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.
Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Высшая математика» ОмГУПС.
Тел.: +7 (3812) 31-18-11.

Третьяков Евгений Александрович

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.

Юрасов Дмитрий Вениаминович

Сервисное локомотивное депо Московка, Деповская 1, г. Омск, 644058, Российская Федерация.
Мастер цеха.
Тел.: +7 (3812) 42-86-60

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Bublik Vladimir Vasilievich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.
Candidate of Engineering Sciences, Associate professor the department «Rolling stock of electric railways » OSTU.
Phone: +7 (3812) 31-34-19.

Gateluk Oleg Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.
Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor of the department « Higher Mathematics» OSTU.
Phone: +7 (3812) 31-18-11.

Tretyakov Evgeny Alexandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.
Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the department «Rolling stock of electric railways » OSTU.
Phone: +7 (3812) 31-34-19.

Yurasov Dmitry Veniaminovich

Service locomotive depot of Moscovka
1, Depotskaya st., Omsk, 644048, the Russian Federation.
The master of the electric machine shop
Phone: +7 (3812) 42-86-60

А. А. Кузнецов¹, Д. В. Муравьев¹, К. В. Усачева²

¹Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация,

²ОА «Омский НИИ приборостроения», г. Омск, Российская Федерация

КОМПЛЕКСНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЛИТЬЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Исследована статистика изломов литых деталей грузовых вагонов, в частности, боковой рамы тележки и проведен контроль образца литейной стали 20ГЛ посредством метода спектрального анализа, в результате которого получен протокол в форме таблицы, в котором представлены данные о концентрации содержащихся в образце веществ. Таким образом, можно судить о качестве контролируемого образца и применимости его в производстве.

Ключевые слова: изломы, контроль образца, боковая рама тележки, метод спектрального анализа, качественный и количественный состав.

Andrey A. Kuznetsov¹, Dmitriy V. Muraviev¹, Ksenia V. Usacheva²

¹Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

²JSC «Omskiy Nauchno Issledovatel'skiy Institut Priborostroeniya», Omsk, the Russian Federation

COMPREHENSIVE QUALITY CONTROL METHODS OF CASTING ITEMS OF ROLLING STOCK

The statistics of fractures of cast parts of freight cars, in particular, the side frame of the trolley and the control of the cast steel sample 20GL by spectral analysis method, which resulted in a Protocol in the form of a table, which presents data on the concentration of substances contained in the sample. Thus, it is possible to judge quality of the controlled sample and its applicability in production.

Keywords: fractures, sample control, trolley side frame, spectral analysis method, quality and quantity analysis.

Ежегодно на российских железных дорогах фиксируется большое количество изломов литых деталей грузовых вагонов. Это в абсолютном большинстве случаев ведет к сходу с рельсов подвижного состава и порче железнодорожного имущества. Динамика подобных происшествий за последние годы неутешительна.

Изломам подвержены, как правило, наиболее ответственные детали грузовых вагонов – боковые рамы тележек и надрессорные балки. В процессе эксплуатации они воспринимают статические и динамические вертикальные

нагрузки – от веса вагона и груза, от ударов при прохождении вагоном неровностей пути. При этом основная часть динамических вертикальных нагрузок носит циклический характер, и усталостная прочность боковых рам (способность длительно противостоять воздействию циклических нагружений) является основной характеристикой их эксплуатационной надежности, то есть напрямую влияет на безопасность движения.

Решением проблем оценки качества материалов литых деталей занимается металлография и спектральный анализ. Химический анализ сплава способен дать четкий ответ о соответствии его качества требованиям нормативных документов.

Исследования качества материала литых деталей тележки грузового вагона проводились с использованием оптико-эмиссионного спектрометра отечественного производства «АРГОН-5СФ», принцип работы которого состоит в том, что в продуваемом аргоном высокой чистоты (не менее 99,998%) промежутке между анализируемым металлическим образцом и вольфрамовым электродом создается низковольтный униполярный разряд.

Исследования проводились по специально предложенной методике контроля качества материалов для изготовления боковой рамы и надрессорной балки, структура которой представлена на рис. 1.

Источником излучения в спектрометре является искровой разряд, зажигаемый между анализируемым образцом и подставным вольфрамовым электродом, промежуток между которыми продувается аргоном. В процессе горения искрового разряда происходит сгорание пробы анализируемого материала, изучение которого фокусируется кварцевой линзой оптического блока.

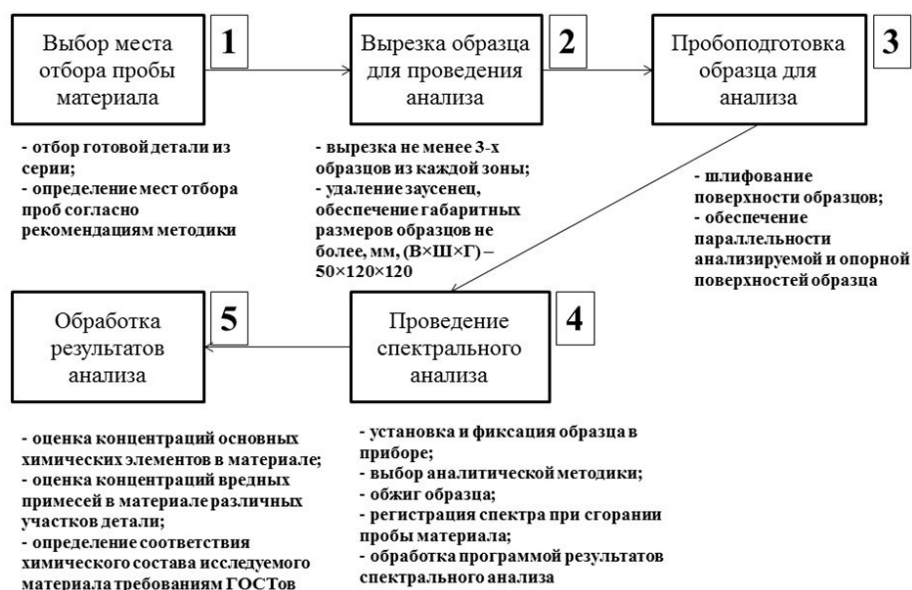


Рис. 1. Структура методики контроля качества материалов

Количественное содержание каждого элемента испытуемого образца представлены в табл. 1. Установлено, что химический состав проанализированного образца полностью соответствует требованиям п. 4.2.1 ГОСТ 32400-2013 в части соответствия рекомендуемым маркам стали для изготовления боковой рамы и надрессорной балки тележки грузового вагона.

Таблица 1

Протокол спектрального анализа образца литейной стали 20ГЛ

№ изм.	C	Al	Si	P	S
1	0.199	0.021	0.367	0.004	0.009
2	0.229	0.022	0.358	0.007	0.012
3	0.235	0.020	0.358	0.004	0.012
4	0.197	0.021	0.357	0.005	0.013
5	0.201	0.021	0.357	0.004	0.011
6	0.172	0.020	0.325	0.006	0.015
7	0.180	0.022	0.367	0.004	0.009
8	0.141	0.021	0.352	0.004	0.009
Сред.	0.194	0.021	0.355	0.005	0.011
20ГЛ	0.170 - 0.250	0.020-0.060	0.300 - 0.500	0.000 - 0.020	0.000 - 0.020
№ изм.	Cr	Mn	Ni	Cu	Ti
1	0.035	1.241	0.017	0.047	0.001
2	0.032	1.228	0.017	0.048	0.001
3	0.032	1.233	0.018	0.045	0.001
4	0.033	1.231	0.016	0.045	0.002
5	0.032	1.228	0.018	0.046	0.001
6	0.033	1.207	0.018	0.049	0.003
7	0.034	1.242	0.016	0.044	0.001
8	0.034	1.237	0.017	0.048	0.001
Сред.	0.033	1.231	0.017	0.047	0.001
20ГЛ	0.000 - 0.300	1.100 - 1.400	0.000 - 0.300	0.000 - 0.600	

В основе автоматизированных устройств для проведения спектрального анализа продолжают использоваться модели градуировочных характеристик (ГХ), построенных на основе регрессионной обработки данных стандартных образцов с известным химическим составом. Стабилизация таких характеристик остается

актуальной задачей. Возможными причинами смещения ГХ могут являться внешние факторы – изменяющиеся условия проведения эксперимента.

Ответственным узлом при эксплуатации локомотивов остается моторно-осевой подшипник, при ремонте которого используется баббитовая заливка. Нередко при производстве встречается проблема дефицита стандартных образцов при выполнении спектрального анализа.

Для повышения стабильности и уменьшения дрейфа градуировочных графиков предлагается способ, который заключается в измерении и математической обработке нескольких линий анализируемого элемента и нескольких линий сравнения, имеющих различные энергетические характеристики, для уменьшения влияния внешних и внутренних факторов при проведении эксперимента. Для градуирования и последующей работы предлагается использование функции устойчивого градуирования, реализующую виртуальные эталоны, сохраняющие свои значения длительное время.

Для учета различных энергетических показателей спектральных линий при построении градуировочных графиков, используется функция вида:

$$F_j = \frac{\sum_{i=1}^N a_i I_{анij}}{\sum_{i=1}^M b_i I_{срj}} = \frac{a_0 I_{ан0j} + a_1 I_{ан1j} + \dots + a_N I_{анNj}}{b_0 I_{ср0j} + b_1 I_{ср1j} + \dots + b_M I_{срMj}} \quad (1)$$

где $I_{ан}$ – интенсивности спектральных линий анализируемого элемента; $I_{ср}$ – интенсивности линий сравнения; a_i , b_i – коэффициенты устойчивого градуирования; N – количество линий анализируемого элемента; M – количество линий сравнения.

Для построения устойчивой градуировочной зависимости были использованы данные полученные при помощи атомно-эмиссионного спектрометра типа «АРГОН-5СФ». Эксперимент проводился с использованием стандартных образцов свинцовых баббитов (86XPSS1 – 86XPSS4 фирмы MBH). Параметры спектральных линий, используемых для градуировки приведены в табл. 2.

При построении градуировочных зависимостей классическим способом, по данным, полученным в различных режимах проведения эксперимента, отмечалось существенное расхождение между ними (рис. 2). Что определялось временным дрейфом, конструктивными и электрическими параметрами спектрального анализатора.

Полученные коэффициенты и значения функции устойчивого градуирования на примере олова по стандартным образцам (86XPSS1 – 86XPSS4), показаны в табл. 3 и табл. 4.

После расчета коэффициентов и значений функции устойчивого градуирования, перестроены градуировочные графики из системы координат «Относительная интенсивность ($I_{отн}$) – концентрация (C)» в систему «Функция устойчивого градуирования (F) – концентрация (C)» (рис. 3).

Эксперимент, проведенный на группе стандартных образцов свинцовые баббиты, показал, что корреляция графиков, полученных в различных режимах, увеличилась для всех трех характерных элементов примесей, на которых проводились опыты: медь, олово и сурьма. Это позволило построить градуировочную зависимость, устойчивую к влиянию внешних факторов, учтенных в режимах, использованных для градуирования, снизив тем самым систематическую погрешность от изменения положения графиков.

Таблица 2

Параметры спектральных линий используемых для градуирования

Элемент	Длина волны, нм	Номер приемника	Потенциал возбуждения, эВ	Яркость
Линии анализируемых элементов				
Cu	218,172	2	5,68	130
Cu	327,396	4	3,78	2500
Cu	296,117	3	5,78	50
Sn	249,570	2	6,03	110
Sn	365,587	5	5,52	40
Sn	211,393	1	6,07	530
Линии сравнения				
Pb	367,150	5	6,03	34
Pb	282,319	3	5,7	410
Pb	322,054	4	6,5	3
Pb	247,638	2	5,98	130
Pb	205,327	1	6,04	690
Pb	216,999	2	5,71	480

Таблица 3

Коэффициенты устойчивого градуирования на примере олова

a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
0,0403	0,5902	0,0386	0,0023	0,0063	-0,0071	-0,0305	0,0025	0,0202

Таблица 4

Результаты корреляции градуировочных графиков, полученных при изменении внешних факторов классическим и предлагаемым способами

Метод градуирования	Значение R^2		
	Cu	Sb	Sn
Классический	0,824	0,719	0,887
Предлагаемый	0,998	0,980	0,998

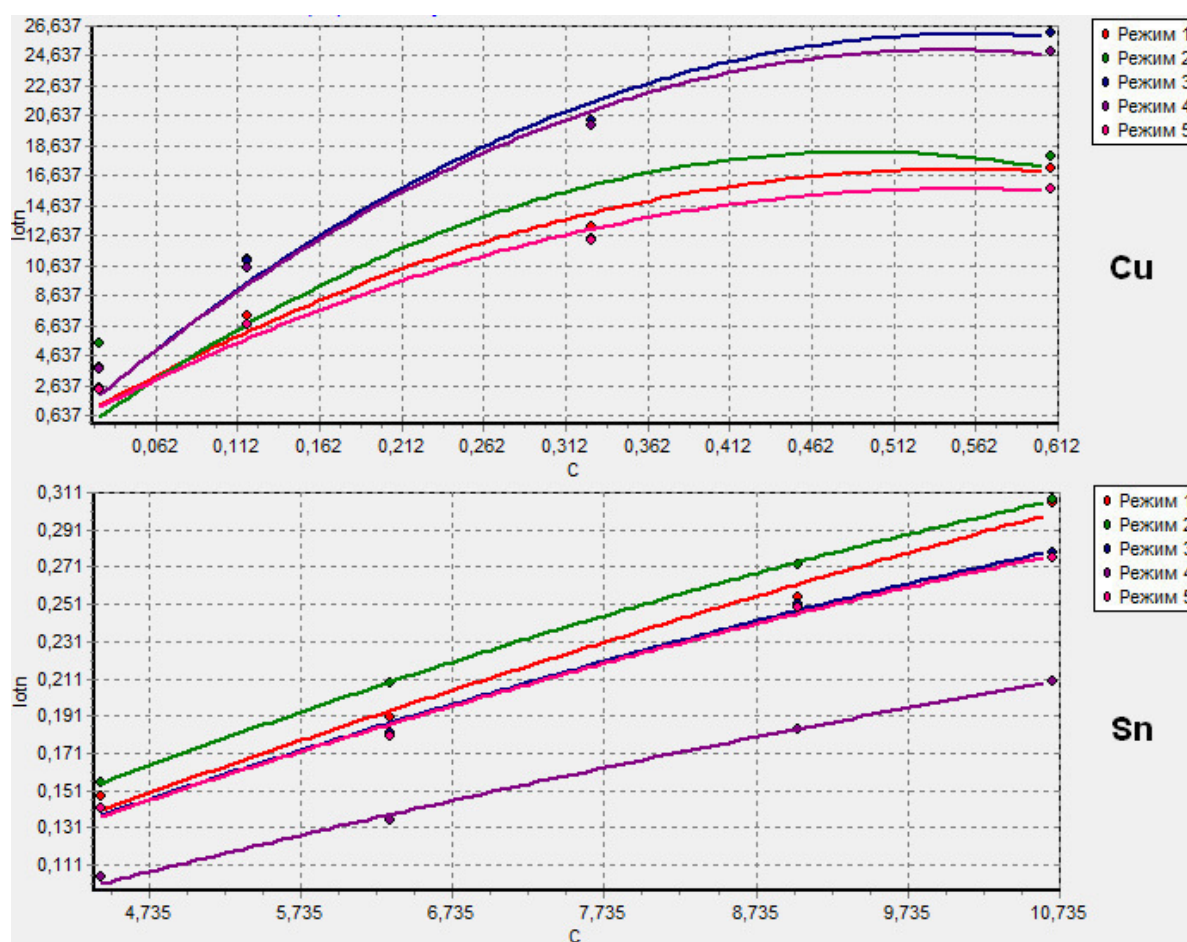


Рис. 2. Градуировочные зависимости, полученные в различных режимах проведения эксперимента классическим способом

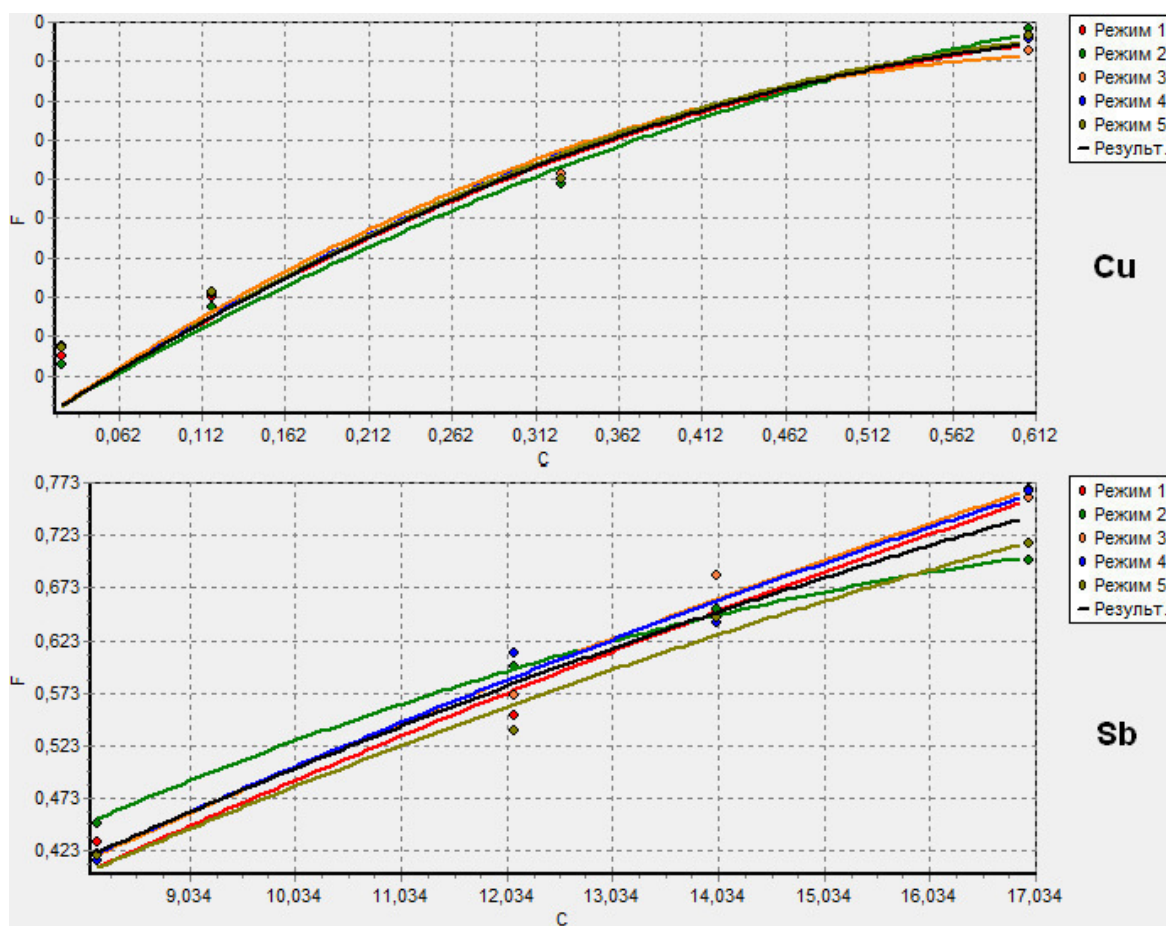


Рис. 3. Градуировочные зависимости, полученные с использованием функции устойчивого градуирования

Список литературы

1. Будюкин, А. М. Анализ причин отказа боковых рам вагонных тележек при их эксплуатации на электрифицированных участках / А. М. Будюкин, В. Г. Кондратенко. – Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. – Санкт-Петербург, 2013. – 7 с.
2. ГОСТ 9246-2013 «Тележки двухосные трехэлементные грузовых вагонов железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия».
3. ГОСТ 32400-2013 «Рама боковая и балка надрессорная литые тележек железнодорожных грузовых вагонов. Технические условия».
4. Лукин, В. В. Расчет боковой рамы и надрессорной балки тележки грузового вагона методом конечных элементов [Текст] / В. В. Лукин, А. О. Бельский // Известия Транссиба/ Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2013. – 1(13). – С. 7 – 12.

5. Кузнецов, А. А. Реализация мобильных градуировочных характеристик приборов спектрального анализа материалов с использованием виртуальных эталонов / А. А. Кузнецов, В. А. Слептерев, А. В. Пелезнев // Омский научный вестник. – 2013. – №3(125). – С. 241 – 246.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Андрей Альбертович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС)
пр. Маркса, 35, 644046, г. Омск, Российская Федерация.
Доктор технических наук, профессор,
Заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника» ОмГУПС.
E-mail: kuznetsovaa.omgups@gmail.com

Муравьев Дмитрий Валерьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС)
пр. Маркса, 35, 644046, г. Омск, Российская Федерация.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонт подвижного состава» ОмГУПС.
E-mail: MuravjevDV@omgups.ru

Усачева Ксения Викторовна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС)
пр. Маркса, 35, 644046, г. Омск, Российская Федерация.
Аспирантка кафедры «Теоретическая электротехника» ОмГУПС.
E-mail: ksu1791@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuznetsov Andrey Albertovich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.
Doctor in Technical Sciences, Professor, the head of the department «Theoretical electrical engineering» OSTU.
E-mail: kuznetsovaa.omgups@gmail.com

Muraviev Dmitriy Valeryevich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.
Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the department «Technology of transport engineering and repair of rolling stock» OSTU.
E-mail: MuravjevDV@omgups.ru

Usacheva Ksenia Viktorovna

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.
Postgraduate of the department «Theoretical electrical engineering» OSTU.
E-mail: ksu1791@mail.ru

В. В. Харламов, Д. И. Попов, А. И. Стретенцев

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

ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ КОММУТАЦИИ КОЛЛЕКТОРНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

В статье рассмотрен вопрос диагностирования состояния коммутации двигателей постоянного тока подвижного состава железных дорог. Представлены результаты экспериментальных исследований на двигателе ПЗ1 приводов компрессорных установок электропоездов и электропоездов. В эксперименте применен цифровой прибор контроля коммутации, позволяющий оцифровать полезный диагностический сигнал напряжения с разнополярных щеток и передать его на ЭВМ. Анализ результатов проведенного эксперимента выявил эффект, который вносит дезинформацию в процесс диагностирования состояния коммутации с применением параметров законов распределения интенсивности искрения. В результате предложен новый способ диагностирования состояния коммутации.

Ключевые слова: диагностирование, коллекторный двигатель, коллекторно-щеточный узел, коммутационный процесс, закон распределения интенсивности искрения.

Viktor V. Kharlamov, Denis I. Popov, Andrey I. Stretentsev

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

INCREASE THE ACCURACY OF DIAGNOSING THE STATE OF THE COMMUTATION OF COMMUTATOR MOTORS FOR RAILWAY ROLLING STOCK

The article deals with the problem of diagnosing the state of commutation of DC motors of railway rolling stock. The results of experimental studies on the engine ПЗ1 drives compressor units of electric locomotives and electric trains. In the experiment applied to a digital device of diagnosing of commutation, allowing to digitize a useful diagnostic signal voltages with different polarities of the brushes and transfer it to a computer. Analysis of the results of the experiment revealed the effect that makes misinformation in the process of diagnosing the switching state using the parameters of the laws of distribution of the intensity of the spark. As a result, a new method of diagnosing the switching state is proposed.

Keywords: diagnosis, commutator motor, collector-brush unit, commutation process, distribution law of intensity of the sparking.

Коллекторные двигатели постоянного тока (ДПТ) широко эксплуатируются в промышленности, на транспорте и других областях. С учетом сложных условий эксплуатации ряд узлов ДПТ подвержен значительному износу и требует постоянного диагностирования и технического обслуживания. Наиболее тяжелые условия эксплуатации двигатели данного типа испытывают на железнодорожном транспорте. Как известно наименее надежным узлом ДПТ является коллекторно-щеточный узел (КЩУ).

Для выполнения объективной оценки степени искрения ДПТ ранее разработан цифровой прибор контроля коммутации (МПКК) [1]. Данный прибор позволяет осуществлять оценку степени искрения по площади импульсов дуговых разрядов, характеризующей количество электричества прошедшего через дугу.

Как было показано в известных исследованиях [2], параметры закона распределения интенсивности искрения секций обмотки якоря могут быть применены в процессе диагностирования технического состояния КЩУ [3]. В исследованиях [4] было предложено производить статистический анализ интенсивности искрения отдельных секций обмотки якоря, с применением таких параметров закона распределения как среднее значение, среднеквадратическое отклонение, асимметрия и эксцесс [5].

С целью проверки влияния на параметры закона распределения интенсивности искрения, обусловленной неидентичностью условий коммутации различных секций в пазу якоря проведен эксперимент на двигателе постоянного тока ПЗ1, применяемом для работы в электроприводах компрессоров электровозов и электропоездов. Эксперимент проводился при отсутствии видимого искрения и при наличии искрения от недокоммутации с различной степенью [6]. В ходе эксперимента для получения необходимой степени искрения производилось изменение тока $I_{п/о}$, после чего фиксировались массивы значений сигнала с разнополярных щеток с помощью МПКК. Для исключения низкочастотных пульсаций не связанных с импульсами искрения, проведена амплитудная селекция сигнала.

В результате выполненного расчета для каждого измерения получен массив значений площади импульсов дуговых разрядов и построены гистограммы распределения площади импульсов напряжения дуговых разрядов, представленные на рис. 1 – 3.

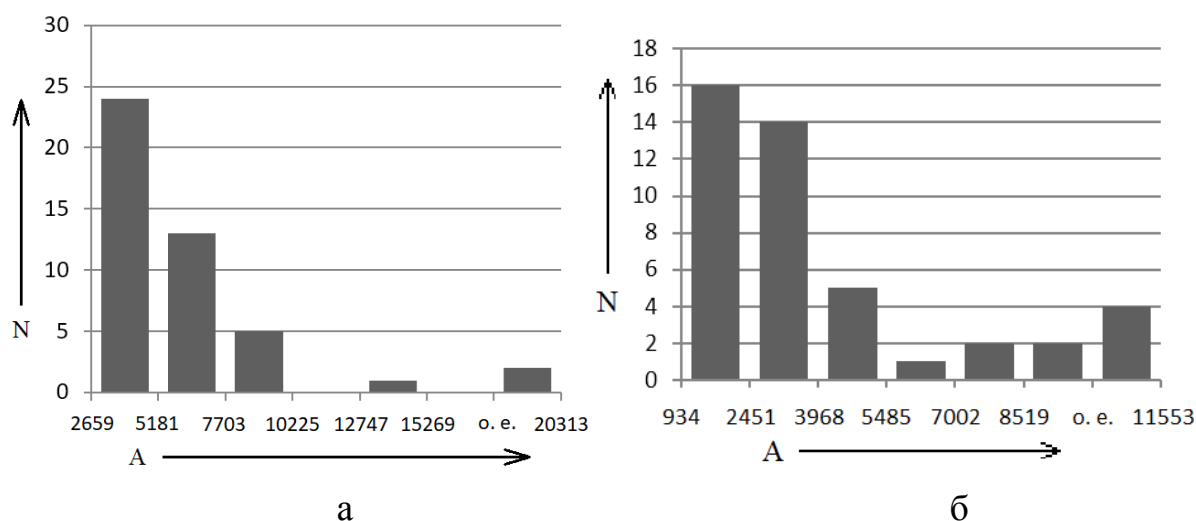


Рис. 1. Гистограмма распределения площадей импульсов дуговых разрядов при степени искрения 1 балл: а – распределение импульсов недокоммутации; б – распределение импульсов перекоммутации

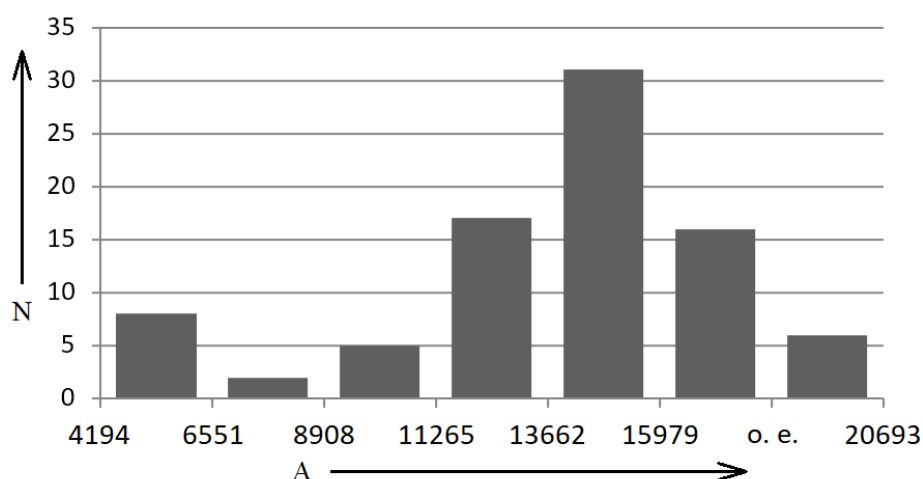


Рис. 2. Гистограмма распределения площадей импульсов дуговых разрядов от недокоммутации при степени искрения 1 ½ балла

Анализ приведенных гистограмм показывает, что среднее значение площади импульсов увеличивается при увеличении интенсивности искрения. Однако при сильном искрении на коллекторе (2 балла) закон распределения становится двухмодальным, и как следствие, резко возрастает среднеквадратическое отклонение значений площадей импульсов (см. рис. 3).

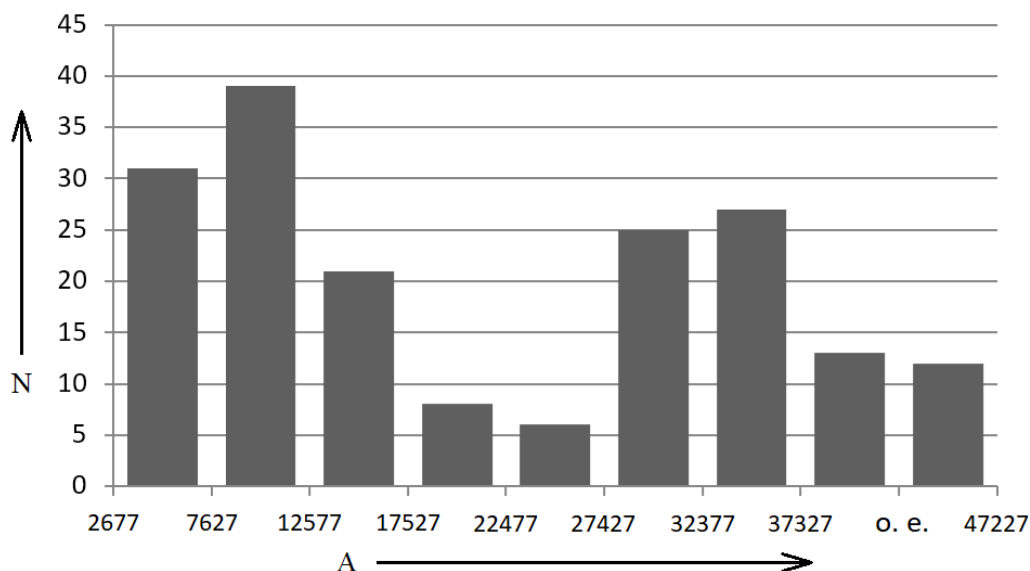


Рис. 3. Гистограмма распределения площадей импульсов дуговых разрядов от недокоммутации при степени искрения 2 балла

Данное явление можно объяснить тем, что при малых интенсивностях искрения закон распределения дуговых разрядов обусловлен искрением только секций, коммутирующих последними в пазу. При увеличении тока подпитки/отпитки ($I_{п/о}$) начинают искрить остальные секции обмотки якоря, что обуславливает искрение с другой меньшей средней интенсивностью.

Для проверки данной гипотезы выполнена следующая математическая обработка экспериментальных данных. Массивы значений площади импульсов дуговых разрядов были разделены на группы, число которых равно числу секций обмотки якоря, лежащих в пазу. Если обозначить номера пазов $i = 1 \dots N$, то к первой группе должны быть отнесены все i -ые значения площади, ко второй группе – все значения площади ($i + 1$) и т.д.

Данная процедура была произведена для массивов значений площади импульсов при степени искрения 2 балла, после чего были получены гистограммы распределения отдельно по каждой из четырех групп. Гистограмма для первой группы приведена на рис. 4, для второй – на рис. 5, гистограммы для третьей и четвертой групп по виду близки к гистограмме, представленной на рис. 5.

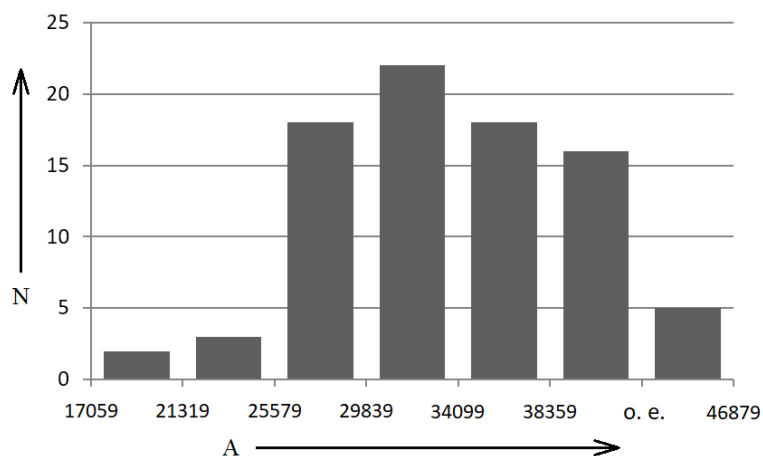


Рис. 4. Гистограмма распределения площадей импульсов дуговых разрядов для первой группы секций при степени искрения 2 балла

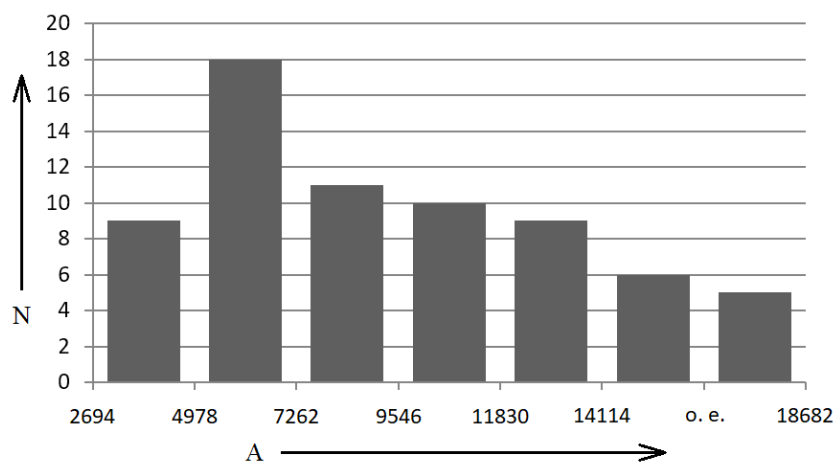


Рис. 5. Гистограмма распределения площадей импульсов дуговых разрядов для второй группы секций при степени искрения 2 балла

Как известно, за счет влияния взаимоиндуктивной связи условия коммутации секций в пазу различны [7]. По сравнению с остальными секциями, секция, коммутирующая последней в пазу, имеет более слабую связь со следующей за ней секцией, т. к. они находятся в разных пазах [8]. Этот факт подтверждается гистограммами, анализ которых показывает, что первая группа секций выделяется бóльшей интенсивностью искрения, чем остальные, следовательно, в данную группу включены секции, коммутирующие последними в пазу.

Следовательно, в целях получения диагностической информации при анализе сигнала с разнополярных щеток целесообразно рассматривать закон распределения по отдельным группам секций, как показано на рис. 4-5.

Таким образом, предлагаемый способ [9] диагностирования состояния коммутации коллекторных электрических двигателей реализуется в соответствии со следующей последовательностью действий. Сигнал импульсов напряжения, обусловленных искрением между электрическими щетками и коллектором, записывается и обрабатывается, устройством МПКК. Диагностическая информация, получаемая в процессе измерений, представляет собой значения напряжений импульсов искрения и соответствующие им значения времени. Временной диапазон измерений диагностического сигнала разбивается на участки, равные периоду следования коллекторных пластин. Длина каждого такого участка равна периоду коммутации секции обмотки якоря, и на каждом из данных участков может присутствовать или отсутствовать только один импульс напряжения искрения. Далее полученным участкам поочередно присваиваются номера от 1 до N , где N - число секций обмотки якоря, приходящихся на один паз. После каждого N -го участка нумерация начинается с первого номера. Таким путем полученные в процессе обработки сигнала параметры импульсов искрения разделяются на группы. Каждая группа параметров импульсов соответствует группе секций обмотки якоря, проводники которой расположены в пазах якоря идентично. Анализ значений параметров импульсов искрения ведется по каждой группе отдельно: определяются средняя интенсивность искрения и среднее квадратическое отклонение интенсивности искрения.

Описанный способ диагностирования, применяющий цифровую обработку полученного диагностического сигнала, позволяет учитывать влияние неидентичности коммутации различных секций обмотки якоря, обусловленной механическими и электромагнитными факторами отдельно по группам секций, каждая из которых имеет определенное местоположение в пазу. В секциях, объединенных в группы по описанному принципу, отсутствует электромагнитная неидентичность условий коммутации, обусловленная различными по величине коэффициентами взаимной индуктивности с другими секциями, вызванная различным местоположением в пазу. Это позволяет исключить влияние неидентичности данного рода на результаты анализа диагностической информации, что позволяет повысить достоверность диагностирования технического состояния КЩУ.

Список литературы

1. Харламов, В. В. Разработка цифрового прибора контроля коммутации тяговых электродвигателей подвижного состава / В. В. Харламов, Д. И. Попов, А. И. Стретенцев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – №2 (30). – С. 52 – 64.
2. Афонин, А. П. Микропроцессорное устройство для контроля технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей в условиях неидентичности коммутационных циклов / А. П. Афонин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2012. – №2. – С. 286 – 290.
3. Харламов, В. В. Экспериментальные исследования процесса коммутации в коллекторных тяговых двигателях подвижного состава / В. В. Харламов, Д. И. Попов, А. П. Афонин // Известия Транссиба. – 2017. – №4 (32). – С. 45 – 53.
4. Харламов, В. В. Диагностирование состояния коллекторно-щеточного узла машин постоянного тока в условиях приемосдаточных испытаний с учетом параметров неидентичности коммутационных циклов / В. В. Харламов, Д. И. Попов, А. П. Афонин // Омский научный вестник. 2017. №5 (155). С. 66 – 71.
5. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. – М.: Юрайт, 2018. – 479 с.
6. ГОСТ 183-74. Машины электрические вращающиеся. Общие технические условия. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2001. 26 с.
7. Авилов, В. Д. Оптимизация коммутационного процесса в коллекторных электрических машинах постоянного тока: монография / В. Д. Авилов; Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск: Омский научный вестник. – 2013. – 356 с.
8. Вольдек, А. И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб.: Питер, 2008. – 320 с.
9. Пат. 2668996 Российская Федерация, МПК Н 01 R 39/58, Н 02 К 11/20, G 01 R 31/34. Способ диагностирования состояния коммутации коллекторных электрических машин [Текст] / В. В. Харламов, Д. И. Попов, А. И. Стретенцев; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – № 2017143285, заявл. 11.12.2017; опубл. 05.10.2018. Бюл. № 28.

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.
Почтовый адрес: 644046, Россия, г. Омск, ул.
Маяковского, 16, кв. 84
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.
Почтовый адрес: 644112, Россия, г. Омск, ул.
Взлетная, 3а, кв. 113
E-mail: popovomsk@yandex.ru

Стретенцев Андрей Игоревич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Аспирант кафедры «Электрические машины
и общая электротехника» ОмГУПС.
Почтовый адрес: 644073, Россия, г. Омск, ул.
Рокоссовского, 20, кв. 112
E-mail: utes.gorniy@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kharlamov Victor Vasilyevich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian
Federation.
Doctor of Technical Sciences, Professor, Head
of department «Electrical machines and general
electrical engineering» OSTU.
Postal address: 16 Mayakovsky, 84. RUSSIA
644046.
E-mail: emoe@omgups.ru.

Popov Denis Igorevich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian
Federation.
Candidate of Engineering Sciences, Associate
Professor, Associate Professor of department
«Electrical machines and general electrical
engineering» OSTU.
Postal address: 3a Vzletnaya, 113. RUSSIA
644112.
E-mail: popovomsk@yandex.ru

Stretentsev Andrey Igorevich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian
Federation.
Postgraduate of the department «Electrical
machines and general electrical engineering»
OSTU.
Postal address: 20 Rokossovskogo, 112.
RUSSIA 644073.
E-mail: utes.gorniy@yandex.ru

Е. В. Пономарев, В. А. Тараненко

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

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И СЕРВИСНОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ЭЛЕКТРОВОЗОВ СЕРИЙ 2ЭС6, 2ЭС10

Рассмотрено влияние конструктивных недостатков деталей и узлов новых электровозов, заложенных при проектировании, на организацию ремонта в сервисных локомотивных депо. Предложены мероприятия, направленные на повышение эффективности и качества ремонта локомотивов в условиях полигонной технологии перевозочного процесса.

Ключевые слова: конструктивные особенности электровозов новых серий, эксплуатационная надежность, износ, колесная пара, бандаж колеса, колесно-моторный блок.

Eugeny V. Ponomarev, Victor A. Taranenko

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

CONSTRUCTION FEATURES AND SERVICE OF ELECTRIC CARRIERS OF SERIES 2ES6, 2ES10

The influence of the design flaws of parts and components of new electric locomotives, incorporated during the design, on the organization of repair in service locomotive depots is considered. Proposed measures aimed at improving the efficiency and quality of repair of locomotives in the conditions of the landfill technology of the transportation process.

Keywords: design features of electric locomotives of the new series, operational reliability, wear, wheel pair, wheel bandage, wheel-motor unit.

Западно-Сибирская дирекция тяги начиная с 2009 года планомерно перешла на эксплуатацию новых грузовых локомотивов постоянного тока. В 2017 году эксплуатировалось 336 единиц электровозов серии 2ЭС6 и 49 единиц электровозов серии 2ЭС10.

Конструктивные недостатки узлов и оборудования новых электровозов, заложенные при проектировании, негативно сказываются на организации их ремонта в сервисных депо, вызывая дополнительные простои и материальные затраты на выполнение неплановых работ по смене колесно-моторных блоков и обточке бандажей колесных пар [1-3].

За 10 месяцев 2017 года электровозами серии 2ЭС6 допущен 231 случай отказа технических средств, что на девять процентов больше чем за аналогичный период 2016 г., при этом удельное количество отказов снизилось на 0,1 ед/млн.км и составило 2,2 ед/млн.км. Наиболее частым отказам подвержены тяговые электродвигатели (81 случай), оборудование силовой цепи (56 случаев), автотормозное оборудование (31 случай), механическая часть (18 случаев).

По электровозам серии 2ЭС10 количество отказов возросло на 20 случаев или 41,6% и составило 48, удельное количество отказов – 3,56 ед./млн.км (2016 году – 1,99 ед./млн.км). Самыми слабыми узлами оказались оборудование силовой цепи (13 случаев), автотормозное (9 случаев) и электронное (9 случаев) оборудование.

При увеличении общего пробега электровозов серии 2ЭС6 на 14 % количество неплановых ремонтов увеличилось на 13% и составило 3277 случаев или 31,7 сл. на 1 млн. км пробега против 31,5 сл. на 1 млн. км пробега в 2016 году. Количество неплановых ремонтов электровозов серии 2ЭС10 увеличилось на 90% и составило 742 случая против 265 в 2016 году (55,02 сл. против 18,9 сл. на 1 млн. км пробега), при том, что общий пробег уменьшился на 0,3% и составил 13,4 млн. км.

Суммарное время простоя на неплановых ремонтах электровозов серии 2ЭС10 приписки ТЧЭ-14 составило 33314 часов против 5947 часов в 2016 г., средний простой одного электровоза увеличился до 44,8 часов (в два раза).

Рассмотрим наиболее проблемные детали и узлы по каждой серии электровозов.

Износ бандажей колесных пар электровозов серии 2ЭС10

После появления в процессе эксплуатации в зимний период 2016-2017 гг. постороннего шума, возникновения повышенных вибраций кузова локомотива и сопутствующего увеличения неплановых обточек бандажей колесных пар по прокату до 254 случаев против 9 сл. за аналогичный период 2015-2016 гг. в депо Белово была организована опытная эксплуатация электровозов с разными версиями программного обеспечения системы управления и профилями бандажей колесных пар. По итогам эксперимента установлено, что версия программного обеспечения 2.1.6 дает меньше ошибок и сбоев. Применение указанной версии программы МСУЭ и изменение принципа работы форсунок песочниц в части уменьшения объема подачи песка позволило снизить интенсивность износа бандажей колесных пар. В результате за 10 месяцев 2017 года достигнуто снижение на 51% количество случаев постановки локомотивов на обточку колесных пар по износу гребня (595 против 1207 сл. за 2016 г.). С апреля 2017 года наметилась тенденция увеличения

ресурса бандажа до 638,8 тыс. км, что почти на 40 тыс. км больше, чем за аналогичный период 2016 года.

Износ колесных пар электровозов серии 2ЭС10 с профилем «ХЕКСА»

В августе 2017 года с целью мониторинга износа бандажей колесных пар, на электровозах под №№ 075 и 079 выполнена обточка колесных пар по экспериментальному профилю «ХЕКСА Р65 Л1». В процессе эксплуатации установлено, что наибольший износ гребня колесных пар наблюдается на локомотивах, эксплуатирующихся с профилем «ХЕКСА», наименьший – с профилем по «ГОСТ».

Износ бандажа колесных пар электровозов серии 2ЭС10 после снятия горизонтальных гидродемпферов

С целью определения влияния горизонтальных гидродемпферов на износ поверхности катания колесных пар проведена опытная эксплуатация электровозов под №№ 073 и 093 с демонтированными гидродемпферами. По результатам испытаний установлено, что на электровозах с гидродемпферами изменение проката (мм) и износ гребня (мм) на 10 тыс. км пробега больше на 8,5%, и на 10,7% соответственно, чем на электровозах без гидродемпферов.

Замена колесно-моторных блоков на электровозах серии 2ЭС6

За 10 месяцев 2017 года на электровозах 2ЭС6 произведена замена 1166 колесно-моторных блоков (КМБ) (23,16 на 1 млн.км пробега), что на 27% больше, чем за аналогичный период 2016 года. 546 КМБ выкачены по причине повреждений тяговых двигателей, в том числе по пробою и выгоранию изоляции якорей – 277. Проблема устойчивой работы тяговых двигателей в режиме независимого возбуждения обмоток главных полюсов на сегодняшний день не решена.

Произведена обточка 4897 колесных пар. Снижение ресурса по причине износа бандажей привело к преждевременной смене 174 КМБ. По причине односторонних износов гребней, разницы диаметров бандажей колесных пар заменены 163 КМБ. Также сменены 174 КМБ по дефектам (трещинам) корпуса моторно-осевых подшипников (МОП).

За весь период обслуживания электровозов серии 2ЭС6 в сервисных локомотив депо проведены следующие мероприятия:

- проведена модернизация крепления поперечной оси щеткодержателей тяговых электродвигателей ЭДП810, ЭК810, что позволило исключить возникновение задиров петушков коллекторов в эксплуатации;
- изменено крепление сердечников дополнительных полюсов тяговых электродвигателей СТК810, что исключило случаи обрыва полюсов;

- предприняты попытки заварки трещин подшипниковых щитов тяговых электродвигателей ЭК-810Ч, что не привело к должному эффекту, так как качественно выполнить сварные работы под локомотивом трудоемко и нетехнологично, требуется выкатка и разборка КМБ;

- проведены эксперименты по установке в зимний период защитных кожухов на подшипниковые щиты тяговых электродвигателей типа ЭК810 во избежание попадания влаги и снега;

- для повышения электрической прочности изоляции обмоток тяговых электродвигателей пропитаны компаундом 339 якорей и 137 остовов;

- совместно с ООО «Уральские локомотивы» изменен алгоритм работы электровоза, сведен к нулю выход из строя вентиляторов обдува пускотормозных резисторов;

- проведена модернизация заливочных горловин, сапунов и уплотнений кожухов зубчатых передач;

- определены четыре электромагнитных контактора силовых цепей, дающие максимальное количество отказов в эксплуатации, изменена технология их обслуживания при проведении текущих ремонтов.

Не решенными проблемами на сегодняшний день остаются:

- электрические пробой и снижение сопротивления изоляции обмоток тяговых электродвигателей всех типов, изменение геометрии катушек главных и дополнительных полюсов. Претензии по устранению дефектов тяговых электродвигателей постоянно отклоняются со ссылкой на применение несоответствующего типа щеток, что необъективно, так как заявленное в технических условиях сырье сертифицированного поставщика фирмы «Мерсен» не поставляется с 2015 года. Мероприятие ООО «Уральские локомотивы», направленные на защиту тяговых двигателей ЭДП-810 от попадания снега путем установки мешковины на вентиляционные отверстия при проведении текущего ремонта ТР-30 технологически выполнить не возможно, так как требуется выкатка КМБ;

- образование трещин в корпусах моторно-осевых подшипников. В 2016-2017 гг. выявлены 1693 случая возникновения трещин в корпусах МОП. При движении электровоза по рельсам в корпусе опорных подшипников качения возникают статические и динамические нагрузки [3], в связи с чем трещины возникают во всех четырех углах сварного соединения и развиваются не только по сварным швам, но и переходят в основной металл фланцев, лап и полутрубы. В 174 случаях это привело к выкатке КМБ. Решение по заварке трещин не привело к

положительному результату. По причине образования повторных трещин сменены 70 колесно-моторных блоков;

- повышенный односторонний износ гребней бандажей колёсных пар. За 2017 год более чем на 40 электровозах выявлены предпосылки замены колесных пар по причине неравномерного износа бандажей еще до постановки на ремонт. Одна из основных причин износа связана с особенностью передачи тяговых усилий от тележки к кузову наклонными тягами, закрепленными на концевых брусках, что лишает тележку свободного поперечного перемещения относительно собственного центра тяжести при вписывании в кривые;

- ослабление болтов крепления кожухов тяговой зубчатой передачи, что приводит к излому болтов и необходимости выкатки колесно-моторного блока.

Все вышеперечисленные проблемы приводят к ухудшению показателей, характеризующих надежность локомотивного парка, и требуют от производителя комплексных мер для незамедлительного их решения.

Электровозы серий 2ЭС6 и 2ЭС10 находятся на обслуживании полного жизненного цикла в ООО «СТМ-Сервис», которому принадлежит линейное оборудование. В сервисных локомотивных депо отсутствует переходной запас колесных пар, тяговых двигателей и др. Отсутствие линейного оборудования приводит к длительным простоям электровозов при смене колесно-моторных блоков.

Из-за дефицита оборотного фонда и отремонтированного линейного оборудования систематически не выполняется установленная программа ремонта. Несмотря на соответствующую пропускную способность, ежемесячно ремонтируются только 5-7 локомотивов. Обеспечение уровней технической надежности электровозов серий 2ЭС6 и 2ЭС10, заявленных в технических условиях, напрямую зависит от завода-изготовителя и поставщиков локомотивного оборудования. С целью обеспечения эффективности и качества ремонта локомотивов в условиях полигонной технологии перевозочного процесса необходимо выполнить ряд мероприятий:

1. Разработать необходимую технологическую документацию (технологические инструкции, типовые технологические процессы) для всех видов текущих ремонтов. Работа при отсутствии полного комплекта технологической документации с одним лишь руководством по ремонту локомотивов сильно затруднена [4].

При разработке технологической документации необходимо обеспечивать ее соответствие, прежде всего, с выполняемым технологическим процессом и требованиями ГОСТ. В технологических процессах особо

обратить внимание на последовательность операций, строгое соблюдение маршрутной технологии, исключения вариативности выполнения технологических операций, пооперационный контроль.

2. Пересмотреть регламенты технологического оснащения сервисных локомотивных депо в сторону увеличения ремонтных позиций и применения современного диагностического оборудования [5].

Обеспечить производственные участки и цеха сервисных локомотивных депо современными источниками освещения, слесарным инструментом, в том числе средствами малой механизации (гайковерты, динамометрические ключи, автоматические домкраты, приспособления для снятия и постановки кожухов зубчатой передачи и т.п.), дозаторами для заправки смазочными материалами, нестандартным технологическим оборудованием, средствами диагностики.

Организовать на основе аутсорсинга сервисное (послегарантийное) обслуживание нестандартного технологического оборудования, установленного в цехах сервисных локомотивных депо.

3. Разработать методику расчета необходимого переходного оборудования, запасных частей и материалов для выполнения работ по новой системе технического обслуживания и ремонта локомотивов на основе научно-обоснованных нормативов расхода материалов на технологические процессы ремонта [6].

Заявка на запасные части и материалы должна составляться инженером-технологом при участии мастера цеха на основе разработанных методик с учетом внедрения в депо системы менеджмента качества и неснижаемого технологического запаса.

Для реализации системы входного контроля качества и комплектности поступления от поставщиков запасных частей, смазки и материалов необходимо организовать в сервисных локомотивных депо соответствующую службу с привлечением мастеров цехов.

Отделам главного технолога необходимо разработать технологические карты входного контроля, а также на основе ГОСТ методику выборочного и полного контроля поступающих в депо запасных частей и материалов.

4. Для осуществления технологической подготовки в ремонтном производстве на современном уровне необходимы квалифицированные инженеры-технологи со специальным базовым образованием.

Система повышения квалификации мастеров и слесарей ремонтных цехов требует пересмотра, в том числе с использованием возможностей заводов –

изготовителей локомотивов новых серий, для обеспечения квалифицированным персоналом всех видов работ на техническом обслуживании и ремонте.

5. Для организации работ в сервисных локомотивных депо необходимо использовать современные системы управления ремонтом с обратной связью, основанные на сетевом планировании.

6. Для определения основных нормативных показателей (нормы пробегов, перечни выполняемых работ по видам ремонта и т.д.) при выполнении ремонта локомотивов необходимо установить и исследовать следующие параметры:

- ресурс деталей и узлов локомотива, влияющих на безопасность движения и возникновение отказов на линии, заложенный производителем;
- законы распределения длительности работы оборудования локомотивов до отказа;
- закономерность накопления износа (старения) элементов конструкции (деталей, узлов) локомотива во времени.

При наличии этих параметров, определяющих закономерности износа, распределения отказов и ресурс деталей и узлов локомотива, устанавливаются интервалы между осмотрами и другими работами по техническому обслуживанию и ремонту, а также все виды и объемы работ, выполняемые на каждом ТО и ТР.

Список литературы

1. Электровоз грузовой постоянного тока 2ЭС10 с асинхронными тяговыми электродвигателями. Руководство по эксплуатации. Описание и работа. Механическое оборудование. Часть 4. – 2ЭС10.00.000.000 РЭЗ / Изд. конструкторско-исследовательского центра ОАО «СТМ», 2009. – 90 с.

2. Электровоз грузовой постоянного тока 2ЭС6 с коллекторными тяговыми электродвигателями. Руководство по эксплуатации. Часть 6. Механическая часть. – 2ЭС6.00.000.00 РЭ5 / ООО «Уральские локомотивы». – Екатеринбург, 2011. – 97 с.

3. Конструктивные особенности и эксплуатационная надежность электровозов новых серий / С. Г. Шантаренко, А. А. Бакланов и др. // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава: Материалы IV всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2017. – С. 189 – 198.

4. Шантаренко, С. Г. Разработка технологических процессов технического обслуживания и ремонта локомотивов новых серий / С. Г. Шантаренко, М. Ф. Капустьян, О. П. Супчинский // Вестник РГУПС / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. – Ростов-на-Дону. – 2017. – № 4. – С. 58 – 64.

5. Шантаренко, С. Г. Определение норм запасных частей и материалов при ремонте локомотивов новых серий с учетом случайно возникающих отказов в эксплуатации / С. Г. Шантаренко, М. Ф. Капустьян, О. П. Супчинский // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2017. – № 3 (31). – С. 79 – 88.

6. Организация ремонта локомотивов новых серий в сервисных локомотивных депо / С. Г. Шантаренко, М. Ф. Капустьян и др. // Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов: Материалы второй междунар. науч-практ. конф. / ООО «Локомотивные технологии». – Москва, 2015. – С.35 – 44.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пономарев Евгений Владимирович

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Кандидат технических наук, начальник
научно-исследовательской части ОмГУПС.
Тел.: +7 (3812) 31-68-94.
E-mail: nich.omgups@mail.ru

Тараненко Виктор Александрович

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Аспирант кафедры «Технология
транспортного машиностроения и ремонта
подвижного состава» ОмГУПС.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ponomarev Eugeny Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian
Federation.
Candidate of Engineering Sciences, the chief of
a research departament OSTU.
Phone: +7 (3812) 31-68-94.
E-mail: : nich.omgups@mail.ru

Taranenko Victor Aleksandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian
Federation.
Postgraduate of the department «Technology of
transport engineering and repair of rolling
stock» OSTU.

П. К. Шкодун, А. С. Огневский, Д. В. Супоня

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

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ

В статье описаны основные причины выхода из строя тяговых электродвигателей подвижного состава. Выявлены недостатки существующей программы приемо-сдаточных испытаний тяговых электродвигателей в условиях депо. Предложена структурная схема диагностирования электродвигателей с учетом условий эксплуатации. На основе предложенной структурной схемы разработан и описан алгоритм работы системы диагностирования тяговых электродвигателей подвижного состава в условиях эксплуатации.

Ключевые слова: тяговый электродвигатель, отказ, переходный режим, условия эксплуатации, диагностирование, структурная схема, алгоритм, коммутационная устойчивость.

Pavel K. Shkodun, Andrey S. Ognevskiy, Dmitriy V. Suponya

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

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR ESTIMATING THE TECHNICAL CONDITION OF TRACTOR ENGINES IN DYNAMIC MODES

The article describes the main causes of failure of the traction motors of rolling stock. The drawbacks of the existing acceptance tests of traction motors in the depot conditions are revealed. A block diagram of diagnosing electric motors with regard to operating conditions is proposed. On the basis of the proposed structural scheme, an algorithm has been developed and described for the operation of the system for diagnosing traction electric motors of rolling stock under operating conditions.

Keywords: traction motor, failure, transient mode, operating conditions, diagnostics, block diagram, algorithm, switching stability.

Надежность подвижного состава является одним из важнейших факторов бесперебойной работы железнодорожного транспорта. Статистика отказов оборудования электроподвижного состава (ЭПС) показывает, что значительная доля отказов приходится на тяговые электродвигатели (ТЭД). Среди наиболее

уязвимых узлов ТЭД можно выделить коллекторно-щеточный узел (КЩУ), главные и добавочные полюсы, якорь. Анализ статистических данных показывает, что из-за возникновения круговых огней по коллектору вследствие неисправности КЩУ выходит из строя порядка 10 % ТЭД [1].

Одной из причин выхода из строя ТЭД в эксплуатации является несовершенство методов и программы проведения приемо-сдаточных испытаний ТЭД в условиях депо. В реальных условиях эксплуатации ТЭД может подвергаться воздействию повышенных нагрузок, которые сопровождаются протеканием значительного тока по обмоткам полюсов и якоря, а также динамических режимов работы, сопровождающихся искрением щеток ТЭД. В условиях локомотивных депо испытания проводятся только в статических режимах, а динамические режимы не реализуются [2, 3].

Для решения задачи контроля технического состояния ТЭД в динамических режимах разработан критерий коммутационной устойчивости, позволяющий оценить влияние переходных режимов работы ТЭД на уровень искрения в реальных условиях эксплуатации [4]:

$$K = \frac{I_{српосле} - I_{срдо}}{I_{срдо}}, \quad (1)$$

где $I_{срдо}$ – средний уровень искрения до начала переходного процесса;

$I_{српосле}$ – средний уровень искрения после начала переходного процесса.

С целью автоматизации процесса расчета указанного критерия и возможности диагностирования ТЭД в реальном времени непосредственно на ЭПС разработан алгоритм, позволяющий решить поставленную задачу.

На первом этапе разработки алгоритма сформирована структурная схема процесса диагностирования ТЭД, представленная на рис. 1, включающая в себя ввод данных, контроль характера работы ТЭД с дальнейшим определением параметров, характеризующих условия работы ТЭД в стационарном или переходном режиме.

В процессе работы ТЭД фиксируются и обрабатываются основные параметры, характеризующие его работу с целью определения режима его работы – переходного или стационарного. В зависимости от режима ТЭД, дальнейшая оценка проводится по одному из следующих путей: 1) в случае стационарного режима работы осуществляется контроль величины нагрузки ТЭД посредством измерения тока якоря и сравнения его с номинальным значением; 2) в случае переходного режима работы определяется

продолжительности переходного процесса и времени работы в стационарном режиме, предшествующем переходному процессу, поскольку эти параметры необходимы для расчета коэффициента коммутационной устойчивости. После расчета коэффициента данные, полученные на предыдущих этапах, обрабатываются, и формируется вывод о техническом состоянии ТЭД.

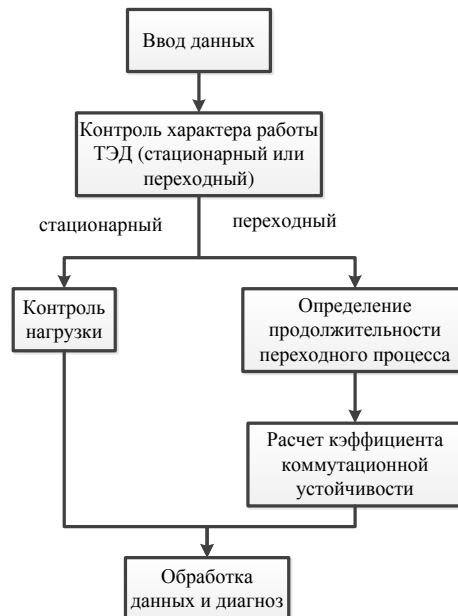


Рис. 1. Структурная схема процесса диагностирования технического состояния ТЭД

На основе представленной структурной схемы авторами сформирован алгоритм работы данной системы, представленный на рис. 2.

Где j – переменная, используемая для фиксации начала текущего переходного процесса, ограничения расчета до окончания предыдущего переходного процесса и расчета среднего уровня искрения в случае, если продолжительность текущего переходного процесса оказалась меньше продолжительности предшествующего ему стационарного режима;

k – переменная, используемая для расчета среднего уровня искрения в случае, если продолжительность текущего переходного процесса больше предшествующего ему стационарного режима;

A – величина уставки, исходя из которой делается вывод о режиме работы ТЭД;

$K_{\min}$, $K_{\max}$ – нижний и верхний пределы допустимых значений коэффициента коммутационной устойчивости.

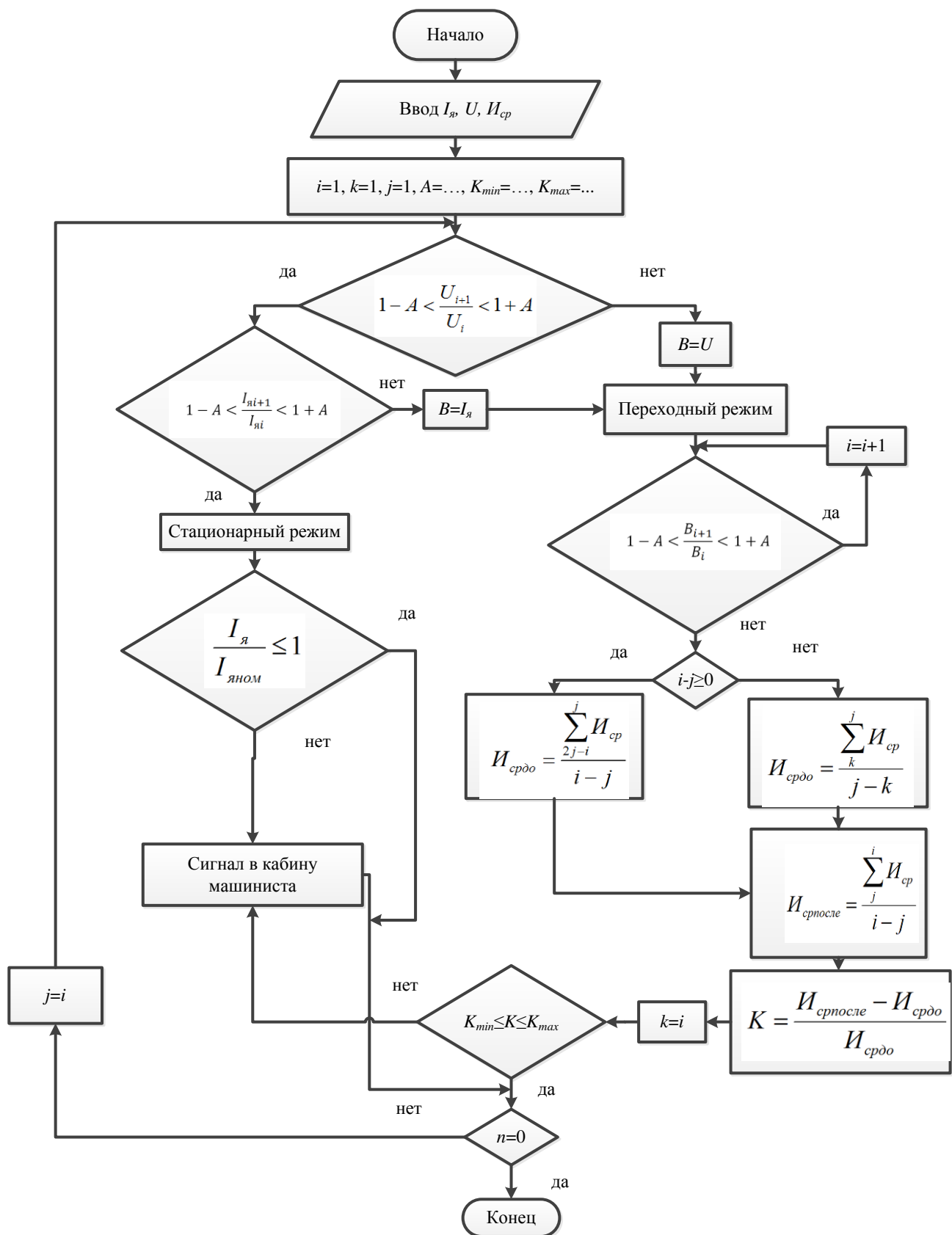


Рис. 2. Алгоритм оценки технического состояния ТЭД

Алгоритм предполагает проведение контроля режима работы ТЭД, сначала по переходному процессу второго вида (по напряжению):

$$1 - A < \frac{U_{i+1}}{U_i} < 1 + A, \quad (2)$$

затем по переходному процессу первого вида (по току якоря):

$$1 - A < \frac{I_{яi+1}}{I_{яi}} < 1 + A. \quad (3)$$

После контроля режима работы ТЭД алгоритм разветвляется на два пути: по стационарному и по переходному режиму работы.

В случае стационарного режима производится проверка нагрузки ТЭД путем сравнения фактического тока якоря с номинальным значением:

$$\frac{I_{я}}{I_{ном}} \leq 1. \quad (4)$$

В случае повышенной нагрузки поступает сигнал и делается запись об ухудшении состояния ТЭД.

При переходном режиме работы после определения вида переходного процесса вводится переменная B , используемая для замены и упрощения дальнейшего расчета. Производится расчет продолжительности текущего переходного процесса и ограничение отрезка времени, используемого при расчете до окончания предыдущего переходного процесса:

$$1 - A < \frac{B_{i+1}}{B_i} < 1 + A. \quad (5)$$

Затем производится расчет среднего уровня искрения до переходного процесса (в стационарном режиме) в случае, если продолжительность переходного больше продолжительности предшествующего ему стационарного режима работы:

$$I_{срдо} = \frac{\sum_{i=1}^j I_{ср}}{j - i}, \quad (6)$$

в случае, если продолжительность переходного меньше продолжительности предшествующего ему стационарного режима работы:

$$I_{срдо} = \frac{\sum_{i=1}^j I_{ср}}{j - k}; \quad (7)$$

и во время переходного режима. На следующем этапе рассчитывается критерий коммутационной устойчивости ТЭД с использованием этих значений по формуле (1).

По окончании расчета необходимых величин, значение полученного критерия сравнивается с допустимыми значениями:

$$K_{\min} \leq K \leq K_{\max}. \quad (8)$$

При выходе данного критерия за допустимые пределы поступает и делается запись об ухудшении состояния ТЭД.

Процесс диагностирования циклически повторяется до окончания работы двигателя. Для этого контролируется частота вращения ТЭД и в случае $n = 0$, то есть при остановке двигателя, система прекращает свою работу.

Предложенный алгоритм диагностирования может быть использован как условиях локомотивного депо при проведении приемо-сдаточных испытаний на испытательной станции для автоматизации контроля условий коммутации ТЭД, так и в качестве элемента алгоритма работы бортовой системы диагностирования ТЭД, позволяющий оценивать техническое состояние ТЭД в реальных условиях эксплуатации.

Список литературы

1. Харламов, В. В. Выбор диагностических параметров для мониторинга состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей подвижного состава [Текст] / В. В. Харламов, П. К. Шкодун, А. С. Огневский // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава: Материалы IV всеросс. научн.-техн. конф. с межд. участ. – Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2017. – С. 217-222.
2. ГОСТ 2582-2013. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия [Текст]. – Взамен ГОСТ 2582-81; Введ. с 01.01.2015. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 52 с.
3. Харламов, В. В. Анализ переходных процессов тяговых электрических двигателей электровозов с учетом условий эксплуатации / В. В. Харламов, Д. И. Попов, А. В. Проненко, П. К. Шкодун // Известия Томского политехнического университета. – 2012. № 4, т. 321 – С. 72-74.

4. Харламов, В. В. Влияние переходных процессов на коммутационную устойчивость машин постоянного тока / В. В. Харламов, А. С. Огневский // Интеллектуальная энергетика на транспорте и в промышленности: Материалы всеросс. молодежной науч.-практ. конф. с межд. участ. – Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2018. – С. 157-167.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Огневский Андрей Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Аспирант кафедры «Электрические машины
и общая электротехника» ОмГУПС.
Тел.: +7 (3812) 31-18-27.
E-mail: emoe@omgups.ru

Супоня Дмитрий Викторович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Аспирант кафедры «Электрические машины
и общая электротехника», ОмГУПС.
Тел.: +7 (3812) 31-18-27.
E-mail: emoe@omgups.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Shkodun Pavel Konstantinovich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian
Federation.
Candidate of Engineering Sciences, Associate
Professor of the department «Electrical
machines and general electrical engineering»
OSTU.
Phone: +7 (3812) 31-18-27.
E-mail: emoe@omgups.ru

Ognevskiy Andrey Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian
Federation.
Postgraduate of the department «Electrical
machines and general electrical engineering»
OSTU.
Tel: +7 (3812) 31-18-27.
E-mail: emoe@omgups.ru

Suponya Dmitriy Viktorovich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian
Federation.
Postgraduate of the department «Electrical
machines and general electrical engineering»
OSTU.
Tel: +7 (3812) 31-18-27.
E-mail: emoe@omgups.ru

В. Г. Даньшин¹, А. А. Комяков²

¹Сервисное локомотивное депо Московка, г. Омск, Российская Федерация

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

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КОМПРЕССОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

В работе приводятся сведения о эксплуатационных и энергетических показателях компрессорного оборудования, устанавливаемого на электровозы нового поколения 2ЭС6 «СИНРА». Произведен анализ факторов, который показывает возможные изменения показателей работы оборудования в зависимости от условий эксплуатации. Сделаны выводы о фактической надежности винтовых компрессорных агрегатов в условиях эксплуатации на Западно-Сибирской железной дороге.

Ключевые слова: эксплуатационные показатели, электроподвижной состав, агрегаты компрессорные.

Vadim G. Danshin¹, Alexandr A. Komyakov²

¹ Service Depot of Moskovka, Omsk, the Russian Federation,

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

ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING OPERATIONAL INDICATORS OF ELECTRIC ROLLING STOCK COMPRESSORS

The article provides information on the operational and energy indicators of compressor equipment installed on electric locomotives of the new generation 2ES6 SYNARA. An analysis of the influencing factors is made. Conclusions about the actual reliability of screw compressor units under operating conditions on the West-Siberian railway are made.

Ключевые слова: operational indicators, rolling stock, compressor

В связи с возрастанием требований к качеству воздуха, производимого компрессорными агрегатами на электроподвижном составе, применяемые ранее компрессорные установки поршневого типа перестали удовлетворять

современным условиям. В связи с этим производители переходят на компрессорные агрегаты винтового типа, которые обладают рядом преимуществ, к числу которых относятся низкая вибрация, невысокий уровень шума, небольшой вес, высокий заявленный ресурс и небольшие затраты на техническое обслуживание [1, 2].

В связи с этим возникает необходимость изменения принципов организации ремонта электровозов, особенно в связи с обновлением парка локомотивов. Одной из новых серий электровозов является 2ЭС6 «СИНАРА», на которых применяются винтовые компрессорные агрегаты ДЭН-30МО У2 или ВВ-3,5-10. Переход ремонтных и сервисных эксплуатационных депо в новый режим работы с новым оборудованием увеличивает необходимость пересмотра стратегии ремонта в связи увеличением или вовсе появлением новых, ранее неизвестных и нерассмотренных видов факторов, влияющих непосредственно на безопасность движения в целом.

Конструкционные решения, применяемые в изготовлении компрессорных установок, не просто очень глубоко внедрились и закрепились на рынке производства сжатого воздуха. Шнековые (винтовые) компрессоры при испытаниях показывали очень высокий результат по качеству сжатого воздуха, при использовании которого появлялась возможность применения высокотехнологичных систем электронного управления автотормозами. Чистота и отсутствие примесей существенно увеличивали эффективность торможения и скорость прохождения воздушного потока по тормозной магистрали, сокращали время торможения, а правильно распределенный поток воздуха приводил тормозной эффект в более эффективный в сравнении с электровозами ВЛ10.

Тем не менее, в начальный период эксплуатации шнекового оборудования для получения сжатого воздуха выявился ряд проблем, связанных в первую очередь с отсутствием опыта эксплуатации и ремонта данного оборудования на электроподвижном составе. В связи с этим в указанный период наблюдалось значительное увеличение отказов компрессорного оборудования, повлекших за собой неплановые ремонты. На рис. 1 приведен график распределения количества отказов компрессорного оборудования в зависимости от пробега за 2013 год в сервисном локомотивном депо Московка.

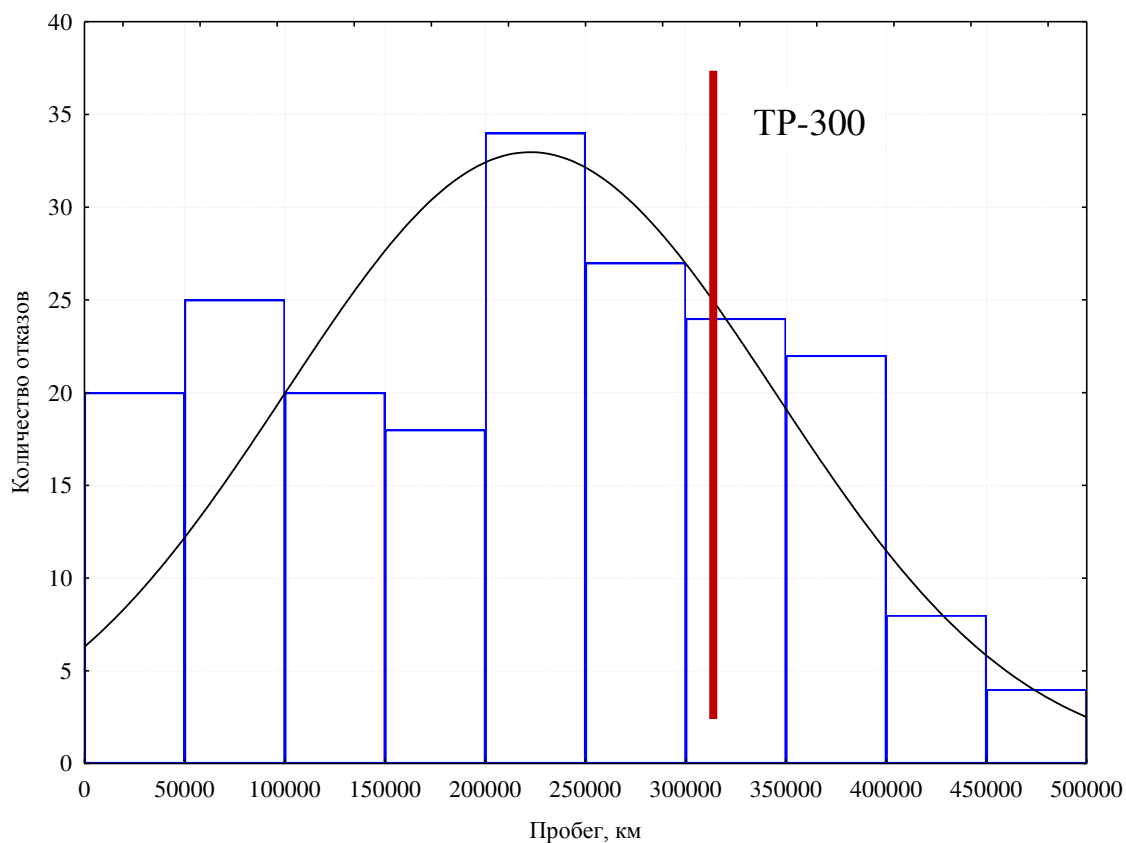


Рис. 1. График распределения количества отказов компрессорного оборудования в зависимости от пробега

Из представленных данных видно, что более 70 % unplanned repairs происходит до текущего ремонта в объеме ТР-300, в то время как в соответствии с руководством по эксплуатации 339.00.00.00-18 РЭ до указанного периода компрессорное оборудование не будет требовать серьезного внимания с точки зрения надежности. Более того, значительная часть отказов происходит до пробега 30 тыс. км (в так называемый «обкаточный» период).

С целью выявления основных причин, влияющих на эксплуатационные показатели компрессорного оборудования, выполнен анализ факторов, которые могут привести к отказу. Авторами предложено разделить их на четыре группы.

1. Отказы, связанные с выходом из строя электрической части. Их причины связаны с некачественным ремонтом на производстве, заводскими браками и ослаблениями контактных соединений в процессе эксплуатации, повышенными вибрациями при следовании поезда и увеличенной нагрузкой на оборудование при вождении сдвоенных поездов.

2. Отказы, связанные с снижением эффективности процесса смазки. К данной группе относится отсутствие смазочных материалов, неполный уровень, течь по сочленениям, проведение неполного технического обслуживания работниками с низким квалификационным разрядом. Также на выходы из строя по маслу может прямо влиять увеличенная вибрация как при работе компрессора на стоянке, так и вибрации от движущегося локомотива или поезда. При увеличенной вибрации происходит ослабление креплений как самого агрегата, так и различных уплотнительных крышек.

3. Отказы, связанные с воздухораспределительной системой. Их основные причины связаны с использованием расходных материалов, не рекомендованных заводом-изготовителем, а также постоянная несвоевременная замена фильтров, конденсация влаги в масле и, как следствие, задиры, заклинивание, падение производительности или выход из строя.

4. Прочие факторы. Они обусловлены применением некачественных запасных частей ввиду низкой эффективности входного контроля, применением ненормативных запасных частей и др.

Рассмотрим более подробно статистику отказов по группе 2 (снижение эффективности процесса смазки, рис. 2).

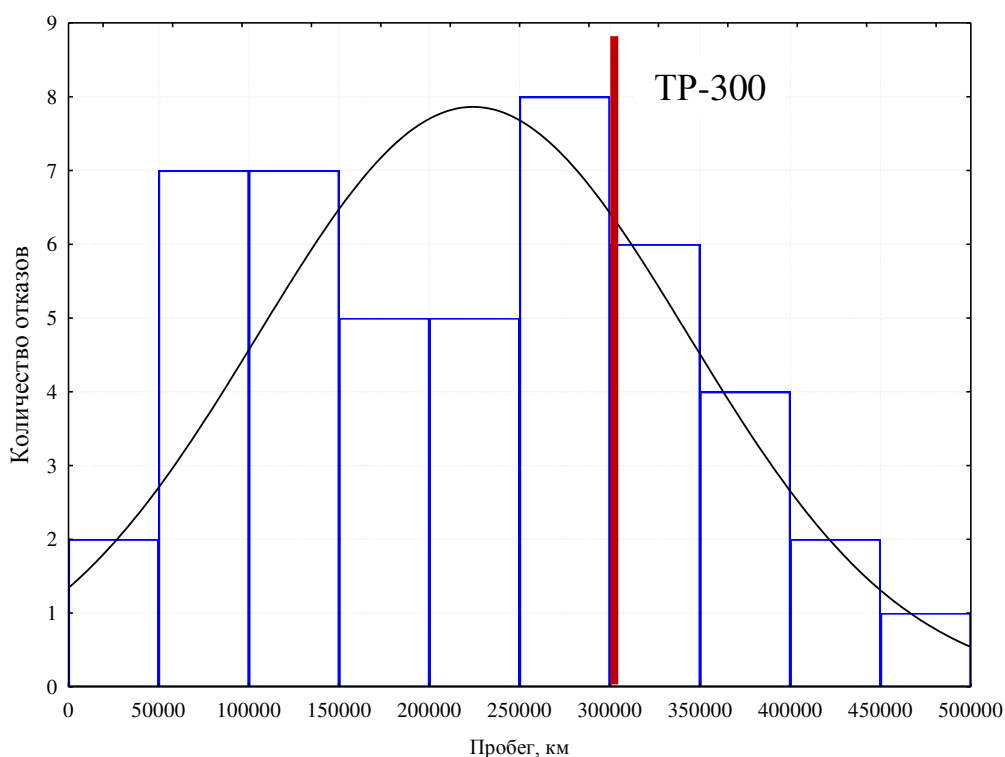


Рис. 2. График распределения количества отказов компрессорного оборудования по смазке в зависимости от пробега

При запуске в эксплуатацию локомотива, например, при пробегах до 50 тыс. км замечания по смазке есть, но они все незначительные и в основной своей части устраняются непосредственно при ТО-1 и ТО-2 электровоза.

Серьезные отказы (заклинивания, падение производительности) наблюдаются при пробеге в 120 – 150 тыс. км, что отслеживается на рис. 2.

Далее увеличение наблюдается перед пробегом 300 тыс. км в связи с недостаточно эффективным техническим обслуживанием и ремонтом и недостаточным вниманием со стороны локомотивных бригад к эксплуатации компрессорного оборудования.

Таким образом, авторами выполнен анализ факторов, влияющих на эксплуатационные показатели компрессорного оборудования электроподвижного состава и предложена классификация указанных факторов в зависимости от причин отказов, сформированная на основе реальных данных статистики отказов. В дальнейшем результаты работы могут быть использованы для создания усовершенствованной модели технологии эксплуатации и ремонта винтовых компрессорных агрегатов.

Список литературы

1. Современное компрессорное оборудование / С. Л. Утюшев, Ю. Н. Бобров, и др. // Химия и технология топлив и масел. – 2007. – № 1 (539). – С. 20 – 21.
2. Кузнецов, Л. Г. Новое компрессорное оборудование ОАО «Компрессор» / Л. Г. Кузнецов. – Главный энергетик. – 2010. – № 9. – С. 34 – 39.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Даньшин Вадим Геннадьевич

Сервисное локомотивное депо Московка,
Деповская 1, г. Омск, 644058, Российская
Федерация.

Инженер

Тел.: (3812) 42-72-88

E-mail: D.W.ru@mail.ru

Комяков Александр Анатольевич

Омский государственный университет путей
сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Теоретическая электротехника» ОмГУПС.

Тел.: (3812) 44-39-23

E-mail: tskom@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Danshin Vadim G.

Service Depot of Moskovka
Depovskaya st., 1, Omsk, 644058,
the Russian Federation.

Engineer

Phone: (3812) 42-72-88

E-mail: D.W.ru@mail.ru

Komyakov Alexandr A.

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Candidate of Engineering Sciences, Associate
Professor of the department «Theoretical the
electrical engineer» OSTU.

Phone: (3812) 44-39-23

E-mail: tskom@mail.ru

А. Г. Андриевский

Красноярский институт железнодорожного транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения, Красноярск, Российская Федерация

КОЖУХ ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ ЛОКОМОТИВА С ВИБРОЗАЩИТНЫМ КРЕПЛЕНИЕМ К ТЯГОВОМУ ДВИГАТЕЛЮ

Статья посвящена проблеме надежности кожуха зубчатой передачи. Автором проведен анализ отказов кожухов зубчатой передачи грузовых электровозов эксплуатируемых на Восточном полигоне. Обозначены возможные причины повреждений кожухов зубчатой передачи. Показана динамика отказов кожухов зубчатой передачи в течение года. Намечены пути снижения отказов кожухов зубчатой передачи. Предложена конструкция кожуха зубчатой передачи с амортизирующим креплением к тяговому двигателю.

Ключевые слова: надежность, кожух зубчатой передачи, тяговый привод, колесно-моторный блок, вибронгрузки в тяговом приводе, повреждения конструкции кожуха, взаимодействие пути и подвижного состава.

Anatoly. G. Andrievskiy

Krasnoyarsk Institute of Railway Transport of Irkutsk State Transport University,
Krasnoyarsk, Russian Federation

CUTTERS OF TRAFFIC TRANSMISSION OF A LOCOMOTIVE WITH VIBRATION PROTECTION TO TRAFFIC MOTOR

The article is devoted to the problem of reliability of the gear housing. The author has analyzed the failures of the gear housing casings of freight electric locomotives operated at the Eastern landfill. The possible causes of damage to gear housing are indicated. Shows the dynamics of failures of gear casings during the year. Outlined ways to reduce the failure of gear casings. The design of the gear housing with a shock mount to the traction motor is proposed.

Keywords: reliability, gear housing, traction drive, wheel-motor unit, vibration loads in the traction drive, damage to the housing design, interaction of the track and rolling stock.

Назначение кожуха зубчатой передачи локомотива – это защита зубчатых колес от попадания пыли и грязи, при этом нижняя разъемная часть кожуха хранит необходимый запас смазки, куда окунаются зубья большого зубчатого колеса при вращении и тем самым смазываются. Повреждения кожухов зубчатой передачи могут приводить к потере смазки, что существенно утяжеляет условия работы зубчатой пары и может привести к преждевременному выходу ее из строя [1].

Анализ неисправностей кожухов зубчатой передачи грузовых электровозов эксплуатируемых на Восточном полигоне показал, что более 60% повреждений приходится на корпус кожуха тягового редуктора.

Основные повреждения корпуса кожуха:

- обрыв полукольца по сварному шву большой или малой горловины;
- излом скобы крепления кожуха;
- трещины в боковине нижней или верхней половины кожуха;
- трещины желоба кожуха;
- пробой желоба кожуха;
- трещины или обрыв кронштейна крепления кожуха.

При этом необходимо отметить, что трещины возникают как по сварным швам, так и непосредственно в деталях сварной конструкции кожуха.

Механические повреждения корпуса кожуха зубчатой передачи часто возникают при отсутствии следов удара, т.е. внешнего воздействия, что свидетельствует о не совершенстве конструкции кожуха зубчатой передачи и его крепления [2].

Однако основное количество возникающих при эксплуатации повреждений кожухов происходит в период с января по апрель (зимне-весенний период), что составляет порядка 80% от общего количества отказов по итогам 12 месяцев (рис. 1).

Особенностью эксплуатации электровозов в зимне-весенний период является:

- наличие намерзшего снега внутри рельсовой колеи;
- величина жесткости пути выше, чем в летний период времени;
- низкие температуры, так при отрицательных температурах прочность стали возрастает, ударная вязкость падает и сталь становится более хрупкой;
- развитие сезонных деформаций пути, вызывающих дополнительные динамические нагрузки;
- рост протяженности участков пути с волнообразным износом рельсов.

Также необходимо отметить, что колесно-моторный блок грузовых электровозов находится в тягчайших условиях эксплуатации, так как подвержен влиянию переходных процессов, как в электрической, так и в механической составляющей тягового привода.

Так, например, вибрации, вызванные электромагнитными процессами в тяговом двигателе передаются через остов на кожух зубчатой передачи, или вибрации, вызванные пересопряжением зубьев редуктора передаются через подшипниковые щиты на остов тягового двигателя, откуда могут передаваться также на кожух зубчатой передачи.

Из рис. 2 видно, что частота возмущений передающихся на колесно-моторный блок локомотива значительно возрастает не только от увеличения скорости движения локомотива, но и от длины неровности пути $L_{\text{нер}}$. Волнообразный износ рельсов характеризуется длиной неровности пути менее

0,15 м. Так, например, при скорости 80 км/ч и следовании локомотива по рельсам с волнообразным износом частота возмущений со стороны пути достигнет порядка 270 Гц.

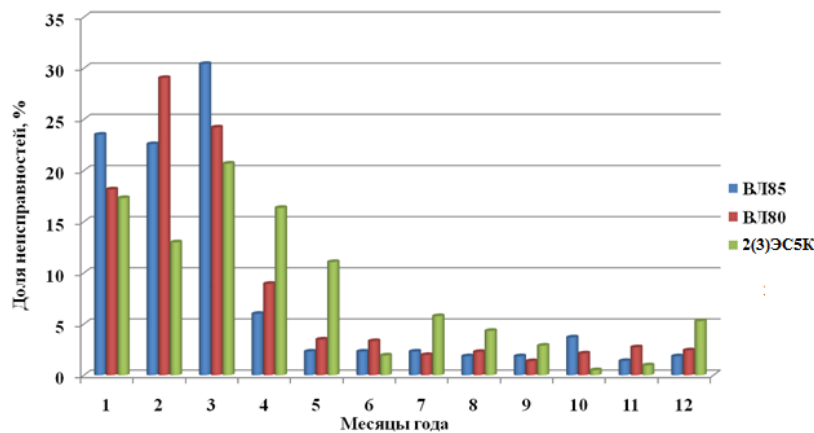


Рис. 1. Распределение неисправностей кожухов зубчатой передачи грузовых электровозов Восточного полигона по месяцам за 2017 год

Диаграмма изменения частоты возмущений от зубчатой передачи при изменении скорости движения локомотива приведена на рис. 3. Откуда видно, что гармоники возмущений fz порождаемые пересопряжением зубьев тягового редуктора имеют широкий диапазон частот.

Таким образом, представляется целесообразным оценить возможность работы кожуха зубчатой передачи в резонансном режиме, т.е. при совпадении частот возмущений с собственными частотами конструкции кожуха.

Гистограмма распределения собственных частот кожуха приведена на рис.4.

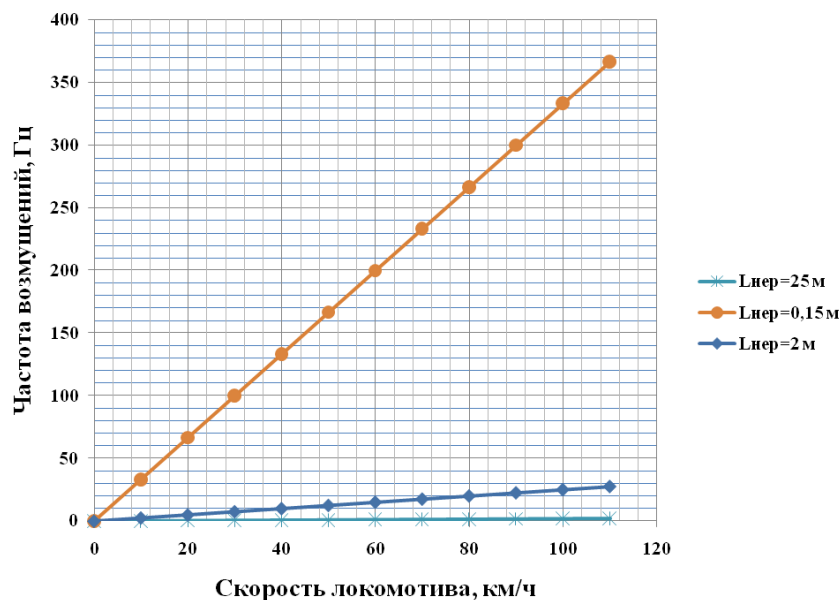


Рис. 2. Диаграмма изменения частоты возмущений от пути при изменении скорости движения локомотива

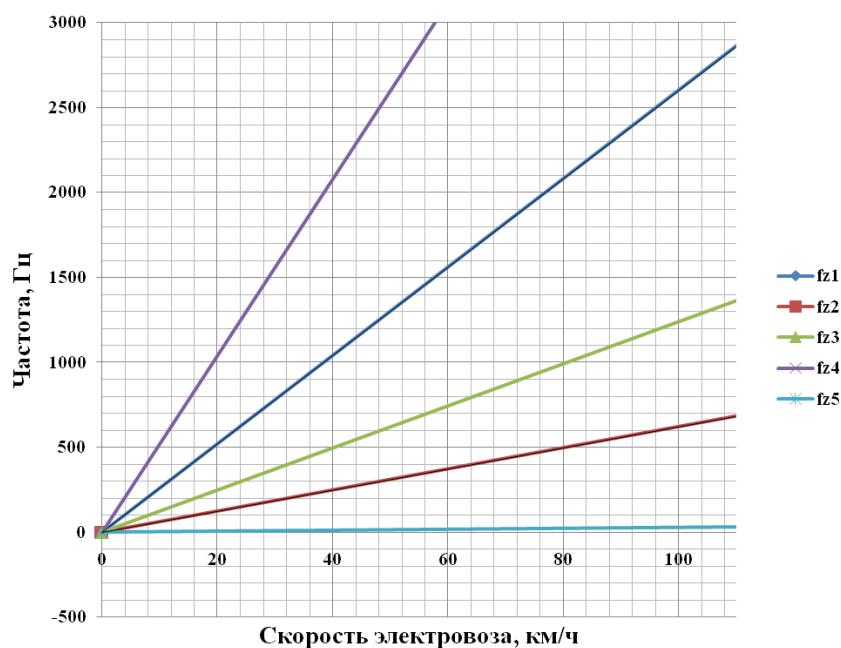


Рис. 3. Диаграмма изменения частоты возмущений от зубчатой передачи при изменении скорости движения локомотива

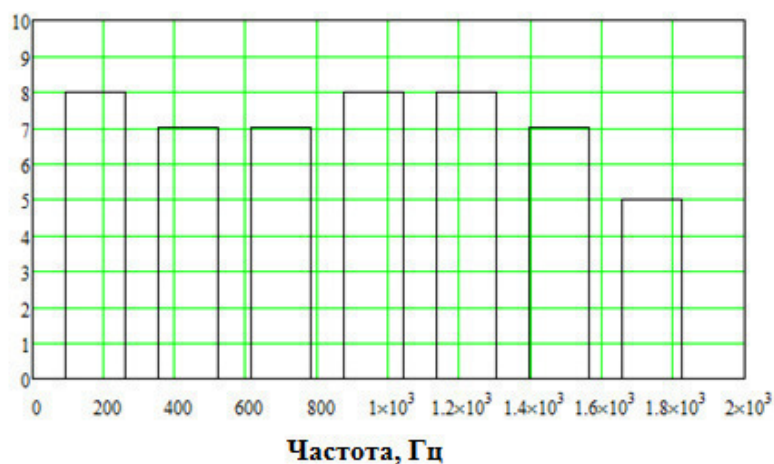


Рис. 4. Гистограмма распределения собственных частот кожуха зубчатой передачи электровоза ВЛ80

Сравнивая диапазон собственных частот с частотами возмущающих воздействий, видно, что возможно их совпадение, и, следовательно, кожух зубчатой передачи может воспринимать нагрузки, возникающие при резонансе, а это может привести к его повреждениям.

Для решения обозначенной проблемы автором предложено усовершенствовать крепление кожуха зубчатой передачи путем установки амортизирующих втулок (сайлентблоков) в точки крепления кожуха к тяговому двигателю. Амортизирующие втулки будут играть роль упругой развязки, и препятствовать передаче возмущений со стороны двигателя на кожух.

Список литературы

1. Бирюков, И. В. Механическая часть тягового подвижного состава / И. В. Бирюков, А. Н. Савоськин, Г. П. Бурчак; под ред. И. В. Бирюкова. – М.: Транспорт, 1992. – 440 с.

2. Андриевский, А. Г. Влияние сезонного фактора на возникновение отказов кожухов тяговой зубчатой передачи электровозов ВЛ80 / А.Г. Андриевский, Е. А. Чабан // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: Материалы восьмой междунар. науч.-практ. конф., 28 марта – 01 апреля 2017 г. Иркутск : в 2 т. – Иркутск : ИрГУПС, 2017. – Т. 2. – С. 405 – 409.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Андриевский Анатолий Геннадьевич
Красноярский институт железнодорожного транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения.
Ладо Кецовели, д. 89, г. Красноярск, 660028, Российская Федерация.
Старший преподаватель кафедры «ЭЖД» КрИЖТ ИрГУПС.
Тел.: 8-913-593-03-61
E-mail: Andrievs1@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrievskiy Anatoly Gennadyevich
Krasnoyarsk Institute of Railway Transport of Irkutsk State Transport University.
89, 89 Lado Ketskhoveli St., Krasnoyarsk, 660028, the Russian Federation.
Senior Lecturer at the Department of «RO» (KIRT ISTU).
Phone: 8-913-593-03-61
E-mail: Andrievs1@yandex.ru

УДК 629.424.3:621.436.03.001.42

А. П. Блинов¹, П. Н. Блинов², П. А. Бернс³

¹Филиал «Западно-Сибирский» ООО «Локотех-Сервис» г. Новосибирск, Российская Федерация,

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

³Западно-Сибирская железная дорога – филиал ОАО «РЖД», г. Новосибирск, Российская Федерация

АЛГОРИТМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТОПЛИВНОЙ И РЕГУЛИРУЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ ДИЗЕЛЯ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА СТЕНДАХ

Описываются параметры, влияющие на работу топливной аппаратуры при подаче топлива в цилиндры с учетом взаимодействия с регулятором частоты вращения коленчатого вала тепловозного дизеля. Предложена математическая модель совместной работы топливной аппаратуры и регулятора частоты вращения. В представленном алгоритме и программе расчета процесса подачи топлива в цилиндры дизеля учтены гидравлические характеристики элементов топливной аппаратуры и работа исполнительного механизма регулятора частоты вращения коленчатого вала дизеля.

Ключевые слова: тепловоз, дизель, топливная аппаратура, топливный насос высокого давления, нагнетательный трубопровод, форсунка, производительность насоса, регулятор частоты вращения, математическая модель, процесс подачи топлива, рабочий ход плунжера, режимы работы.

Aleksandr P. Blinov¹, Pavel N. Blinov², Pavel A. Berns³

¹West-Siberian Filial LLC «Lokotekh-service», Novosibirsk, Russian Federation,

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

³The West Siberian railway – branch of JSC «Russian Railways», Novosibirsk, Russian Federation

ALGORITHM OF INTERACTION AND CONTROL APPARATUS-FUEL DIESEL ENGINE TEST STANDS

Describes the options that affect the fuel equipment when the fuel supply into the cylinders, taking into account interactions with the crankshaft rotation frequency regulator diesel engine. Mathematical model of collaboration of fuel equipment and rotation speed regulator. In the presented algorithm and program calculation process the fuel feed to the cylinders of a diesel engine hydraulic characteristics taken into account elements of fuel equipment and work of the Executive mechanism of the regulator of the rotation frequency of the crankshaft of the diesel engine.

Keywords: diesel locomotive, gasoline, fuel equipment, high pressure fuel pump, discharge pipe, injector, pump capacity, speed control, mathematical model, the fuel delivery process, plunger stroke, modes of operation

Частота вращения коленчатого вала, положение регулирующего органа регулятора частоты вращения (РЧО) – рейки топливного насоса высокого давления (ТНВД) определяют режим работы и тепловое состояние силовой установки.

Для силовых установок тепловозов характерны частые изменения режимов работы.

Для магистральных тепловозов в общем балансе расхода топлива основная доля приходится на работу в номинальном режиме и значительная доля – на неустановившихся режимах [1].

Время работы дизелей на номинальном режиме для магистральных грузовых тепловозов составляет около 12 %, на холостом ходу около 50 %, на неустановившихся режимах около 30 % с числом смен режимов за час работы в среднем 50 – 60. Смена режимов пассажирских тепловозов происходит 110 – 115, а маневровых до 130 раз в час.

К основным эксплуатационным критериям правильного функционирования дизеля относятся минимальный удельный расход топлива при минимальной неравномерности цикловой подачи топлива по цилиндрам дизеля [2].

На цикловую подачу топлива $g_{ц}$ и ее неравномерность $\Delta g_{ц}$ оказывают влияние различные технологические и конструкционные характеристики элементов топливной аппаратуры (ТА).

В общем случае процесс топливоподачи тепловозных дизелей может быть описан в виде следующей математической модели [3]:

$$\left. \begin{aligned} P_n &= P_{n1} + \frac{f_n(h-h_1)}{\alpha_n V_n} - \frac{b\Delta t \mu f_{кан}}{\alpha_n V_n} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{|P_n - P_\phi|} - \frac{c\Delta t \mu f_{ов}}{\alpha_n V_n} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{|P_n - P_b|} - \frac{Q_{yn}\Delta t}{\alpha_n V_n}; \\ P_\phi &= P_{\phi1} + \frac{b\Delta t \mu f_{кан}}{\alpha_\phi V_\phi} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{|P_n - P_\phi|} - \frac{\Delta t \mu f_\phi}{\alpha_\phi V_\phi} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{|P_\phi - P_u|}; \\ g_u &= g_{u1} + \Delta t \rho \mu f_\phi \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{|P_\phi K - P_u|}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $P_n, P_{шт}, P_\phi$ – давление топлива в надплунжерной полости, штуцере ТНВД и в камере распылителя форсунки у иглы, соответственно, к расчетному углу поворота коленвала, Па;

$P_{n1}, P_{шт1}, P_{\phi1}$ – то же давление на предыдущем шаге расчета, Па;

P_b – давление топлива во всасывающей (отсечной) полости, Па;

g_u, g_{u1} – количество впрыснутого в цилиндр топлива к концу и началу текущего расчетного интервала, кг;

f_n – площадь поперечного сечения плунжера, м²;

h, h_1 – ход плунжера на текущем и предыдущем шаге расчета, м;

α_n – средний коэффициент сжимаемости топлива при давлении P_n , Па⁻¹;

V_n – средний объем надплунжерной полости, м³;

Δt – расчетный интервал, с;

ρ – плотность топлива, кг/м³;

$\mu f_{ов}$ – эффективное проходное сечение нагнетательного (отсечного) отверстия, м²;

Q_{yn} – утечки топлива по зазорам в плунжерной паре, м³/с;

b, c – коэффициенты, учитывающие направление движения топлива;

α_ϕ – средний коэффициент сжимаемости топлива при давлении P_ϕ , Па⁻¹;

V_ϕ – средний объем полости форсунки, м³;

μf_ϕ – эффективное проходное сечение форсунки, м²;

P_u – давление газов в цилиндре дизеля, Па;

K – коэффициент потери давления в трубопроводе, учитывающий гидравлические сопротивления, связанные с конечной длиной трубопровода.

Работа регулятора и системы автоматического регулирования (САР)

описывается дифференциальным уравнением, в котором левая часть, содержащая выходную координату и ее производные, определяет собственные свойства элемента или системы, а правая часть, включающая соответствующие входные координаты возмущающих или задающих воздействий, характеризует их влияние на работу элемента или системы.

Дифференциальное уравнение системы в общем виде при заданных условиях можно представить как линейное дифференциальное уравнение n -го порядка с постоянными коэффициентами [4]:

$$A_n \frac{d^n n_k}{dt^n} + A_{n-1} \frac{d^{n-1} n_k}{dt^{n-1}} + \dots + A_1 \frac{dn_k}{dt} + A_0 n_k = B_m \frac{d^m N}{dt^m} + B_{m-1} \frac{d^{m-1} N}{dt^{m-1}} + \dots + B_1 \frac{dN}{dt} + B_0 N + S_k \frac{d^k \psi}{dt^k} + S_{k-1} \frac{d^{k-1} \psi}{dt^{k-1}} + \dots + S_1 \frac{d\psi}{dt} + S_0 \psi, \quad (2)$$

где $A_n \frac{d^n}{dt^n}$ – собственный оператор САР;

n_k – частота вращения коленчатого вала дизеля;

$B_m \frac{d^m}{dt^m}$, $S_k \frac{d^k}{dt^k}$ – операторы возмущающих воздействий;

N – нагрузка регулируемого объекта;

ψ – положение рычага управления автоматическим регулятором.

Чаще всего на тепловозных дизелях применяются всережимные астатические, непрямого действия регуляторы частоты вращения коленчатого вала с гибкой (изодромной) обратной связью.

Дифференциальное уравнение для изодромной САР имеет вид:

$$A_5 \frac{d^5 \varphi}{dt^5} + A_4 \frac{d^4 \varphi}{dt^4} + A_3 \frac{d^3 \varphi}{dt^3} + A_2 \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + A_1 \frac{d\varphi}{dt} + A_0 \varphi = S_1 \frac{d\alpha_p}{dt} + S_0 \alpha_p - B_4 \frac{d^4 \alpha_0}{dt^4} - B_3 \frac{d^3 \alpha_0}{dt^3} - B_2 \frac{d^2 \alpha_0}{dt^2} - B_1 \frac{d\alpha_0}{dt}, \quad (3)$$

где α_0 , α_p – внешние воздействия, действующие на объект регулирования и чувствительный элемент регулятора;

φ – регулируемая координата.

Неоднородное уравнение (3) описывает вынужденные переходные процессы системы изодромного регулирования, появляющиеся в результате внешних воздействий α_0 и α_p .

Значения входных и выходных составляющих уравнения (3) определяются системой уравнений (4), в которой k_o^λ , k_o^α , k_p^ϕ , k_p^α – коэффициенты усиления по входным координатам; T_o – постоянная времени регулируемого объекта; T_p – постоянная времени регулятора; T_κ – постоянная времени катаракта (корректирующее звено); T_c – постоянная времени серводвигателя; T_i – постоянная времени изодрома; β_i – коэффициент пропорциональности.

$$\left. \begin{aligned} A_5 &= T_o T_p^2 T_c T_i; \\ A_4 &= (T_p^2 + T_o T_\kappa) T_c T_i + (T_c + T_i \beta_i) T_o T_p^2; \\ A_3 &= (T_p^2 + T_o T_\kappa) (T_c + T_i \beta_i) + (T_o + T_\kappa) T_c T_i; \\ A_2 &= (T_o + T_\kappa) (T_c + T_i \beta_i) + T_c T_i; \\ A_1 &= (T_c + T_i \beta_i) + T_i k_o^\lambda k_p^\phi; \\ A_0 &= k_o^\lambda k_p^\phi; \\ S_1 &= T_i k_o^\lambda k_p^\alpha; \\ S_0 &= k_o^\lambda k_p^\alpha; \\ B_4 &= T_p^2 T_c T_i k_o^\alpha; \\ B_3 &= (T_c + T_i \beta_i) T_p^2 k_o^\alpha + T_\kappa T_c T_i k_o^\alpha; \\ B_2 &= (T_c + T_i \beta_i) T_\kappa k_o^\alpha + T_c T_i k_o^\alpha; \\ B_1 &= (T_c + T_i \beta_i) k_o^\alpha; \\ B_0 &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Эффективным средством снижения эксплуатационного расхода топлива и выбросов с отработавшими газами токсичных веществ в дизелях различного назначения является применение электронных САР. В настоящее время на тепловозах 2ТЭ116, ТЭМ18, 2ТЭ10, 2ТЭ70, 2ТЭ25К, ТЭП70БС и ТЭП70У устанавливаются модификации электронных регуляторов типа ЭРЧМ30Т [5].

Электронная система автоматического регулирования частоты (САРЧ) вращения коленчатого вала дизеля типа ЭРЧМ30Т состоит из следующих звеньев регулирования: дизеля с ТНВД; модулятора дизеля (диск с зубьями, вращающийся с частотой вращения n); датчика частоты вращения (ДЧВ);

электронного регулятора частоты вращения (ЭРЧВ), содержащего блок управления и электрогидравлическое исполнительное устройство (ИУ); рычажной передачи от ИУ к ТНВД.

Коэффициент усиления ЭРЧВ равен произведению коэффициентов усиления блока управления и ИУ [6]:

$$k_{\text{ЭРЧВ}} = k_{\text{б.у}} k_{\text{ИУ}} = k_{\text{р.ч}} k_u \cdot \sqrt{\frac{(k_3 - k_2 \omega^2)^2 + (k_1 \omega)^2}{(1 + T_\phi^2 \omega^2) [(1 - T_\phi^2 \omega^2)^2 + (2\delta T \omega)^2]}}. \quad (5)$$

Перемещение реек ТНВД, мм,

$$x_p = k_{\text{р.п}} Y, \quad (6)$$

где Y – перемещение поршня сервомотора ИУ ЭРЧВ, мм;

$k_{\text{р.п}}$ – коэффициент рычажной передачи.

Коэффициент рычажной передачи:

$$k_{\text{р.п}} = \frac{x_{\text{р.п}}}{Y_N}, \quad (7)$$

где $x_{\text{р.п}}$ – номинальный ход реек ТНВД, мм;

Y_N – номинальный ход поршня сервомотора ИУ ЭРЧВ, мм.

Коэффициент усиления рычажной передачи от ИУ ЭРЧВ к рейкам ТНВД дизеля:

$$k_{\text{р.п}} = \sqrt{\frac{aw^2 + bw^2}{cw^2 + dw^2}} = \frac{x_{\text{р.п}}}{Y_N}. \quad (8)$$

Связь топливной аппаратуры и регулятора частоты вращения коленчатого вала дизеля осуществляется путем механического соединения ТНВД и РЧО управляющим органом – топливной рейкой.

Поэтому математические модели процесса подачи топлива и работы регулятора частоты вращения коленчатого вала дизеля возможно связать только через единственный параметр – ход рейки ТНВД.

Для гидромеханического регулятора необходимо связать

производительность ТНВД, которая определяется выходом рейки, с уравнениями регулятора (2) – (4). При этом необходимо учитывать все составляющие уравнения (1), влияющие на производительность ТНВД. Аналогично для электронного регулятора необходимо связать производительность ТНВД с уравнениями регулятора (6) – (8).

Предложенная математическая модель совместной работы топливной аппаратуры высокого давления и РЧО реализована в виде алгоритма и программы расчета, фрагменты которых представлены на рис. 1.

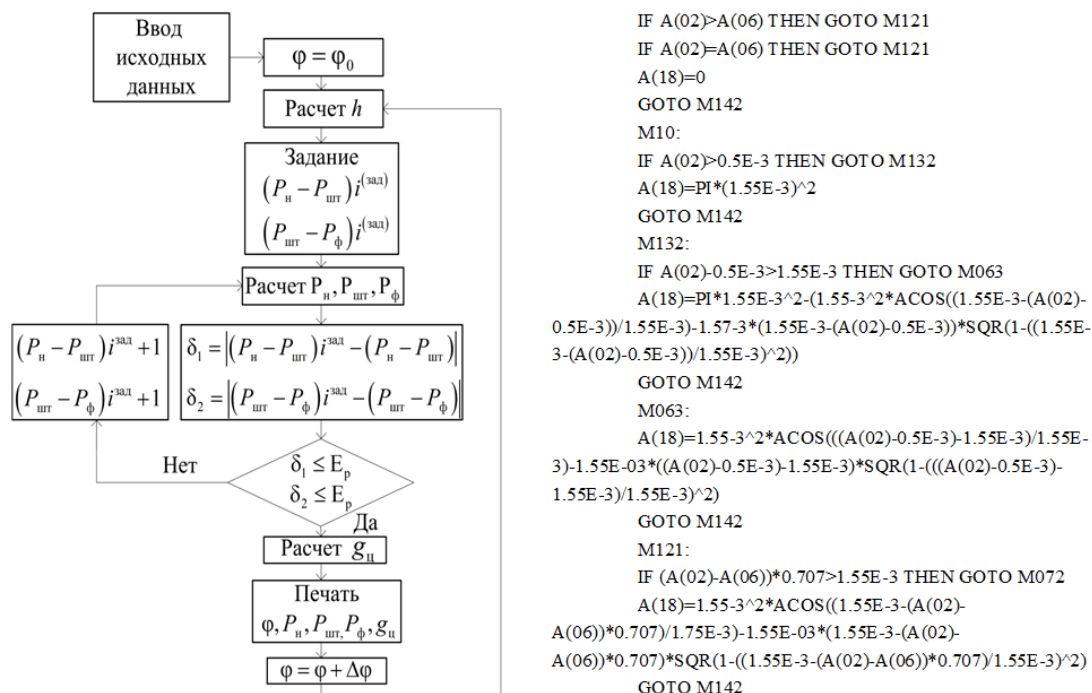


Рис. 1. Фрагменты алгоритма и программы для расчета топливоподачи

Предложенные алгоритм и модель взаимодействия топливоподающей аппаратуры и регулятора частоты вращения коленчатого вала дизеля может быть применена при формировании комплектов топливной аппаратуры и РЧО перед их установкой на дизель и для подбора параметров деталей топливной аппаратуры, используемых при обкатке ТНВД на стендах, применяемых в настоящее время в локомотивных депо.

Список литературы

1. Чулков, А. В. Факторы, характеризующие условия эксплуатации магистральных тепловозов [Текст] / А. В. Чулков, В. А. Михеев, Ю. Б. Гришина // Актуальные вопросы современной науки. – Новосибирск, 2010. – №12. – С. 216 – 221.

2. Блинов, П. Н. Совершенствование технического обслуживания и ремонта топливной аппаратуры тепловозных дизелей [Текст] / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Омск, 1986. – 177 с.

3. Блинов, П. Н. Модель процесса топливоподачи топливной аппаратурой тепловозных дизелей с учетом технологических характеристик ее деталей [Текст] / П. Н. Блинов, А. П. Блинов // Известия Транссиба. Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – № 3(3). – С. 2 – 7.

4. Крутов, В. И. Основы теории автоматического регулирования [Текст] / В. И. Крутов, Ф. М. Данилов, П. К. Кузьмин. – М.: Машиностроение. 1984. – 368 с.

5. Фурман, В. В. Улучшение эксплуатационно-технических характеристик дизель-генераторов тепловозов путем создания и совершенствования систем электронного управления / Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук [Текст] / Москва, 2016. – 321 с.

6. Марков, В. А. Исследование системы автоматического регулирования частоты вращения тепловозного дизеля [Текст] / В. А. Марков, В. В. Фурман, В. А. Иванов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2013. – № 8. С. 54 – 63.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Блинов Александр Павлович
Филиал «Западно-Сибирский»
ООО «Локотех-Сервис»
Ведущий инженер ООО «ТМХ-Сервис».
Ленина ул., д. 21/1, корп. 1, г. Новосибирск,
630004, Российская Федерация.
Тел. +7 (983) 309-34-14
E-mail: blinovap@mail.ru

Блинов Павел Николаевич
Омский государственный университет путей
сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Декан теплоэнергетического факультета,
кандидат технических наук, старший
научный сотрудник, доцент ОмГУПС.
Тел.: +7 (3812) 31-04-09.
E-mail: blinovpn@omgups.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Blinov Alexander Pavlovich
West-Siberian Filial LLC «TMH-service»
Leading engineer LLC «Lokoteh-service».
21/1, Lenin str., Bldg. 1, Novosibirsk, 630004,
Russian Federation.
Phone: +7 (983) 309-34-14
E-mail: blinovap@mail.ru

Blinov Pavel Nikolayevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian
Federation.
The Dean of faculty «Heat power», candidate of
Technical Sciences, the senior scientific
employee, the senior lecturer OSTU.
Phone: +7 (3812) 31-04-09.
E-mail: blinovpn@omgups.ru

Бернс Павел Александрович

Западно-Сибирская железная дорога – филиал ОАО «РЖД».

Вокзальная магистраль, д. 12,
г. Новосибирск, 630004, Российская Федерация.

Инженер Западно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО «РЖД».

Тел. +7 (923) 681-82-57

E-mail: p10499042@mail.ru

Berns Pavel Aleksandrovich

The West Siberian railway – branch of JSC «Russian Railways».

12, Vokzalnaya magistral, Novosibirsk, 630004, Russian Federation.

Engineer West-Siberian railway-branch of JSC «Russian railways».

Phone: +7 (923) 681-82-57

E-mail: p10499042@mail.ru

УДК 629.421.2

А. П. Буйносов

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС),

г. Екатеринбург, Российская Федерация

ВЛИЯНИЕ НА РЕСУРС БАНДАЖЕЙ ОБРАБОТКИ КОЛЕСНЫХ ПАР ТРИБОТЕХНИЧЕСКИМ СОСТАВОМ

Представлены результаты моделирования процесса изнашивания бандажей колесных пар электровоза ВЛ11М при наличии в зоне контакта пары «колесо–рельс» триботехнического состава. Расчеты произведены в среде программного комплекса численного интегрирования уравнений движения «Универсальный механизм».

Ключевые слова: электровоз, колесная пара, бандаж, ресурс, триботехника, состав, влияние.

Alexander P. Buynosov

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

INFLUENCE ON THE SERVICE LIFE OF TIRES PROCESSING OF WHEEL PAIRS TRIBOLOGICAL COMPOSITION

The article presents the results of modeling the wear process of wheelset bandages of electric locomotive VL11M in the presence of the contact zone of the pair «wheel-rail» tribotechnical composition. Calculations are made in the environment of the program complex of numerical integration of the equations of motion «Universal mechanism».

Keywords: locomotive, wheel pair, bandage, resource, tribology, composition, impact.

Проблема износа бандажей колесных пар локомотивов за последние несколько лет вышла на первое место по количеству отказов среди оборудования. Поскольку колесные пары являются одним из наиболее ответственных узлов

механической части железнодорожного подвижного состава, возникает серьезная угроза безопасности движения локомотива и состава в целом.

В настоящее время для улучшения условий взаимодействия в системе «колесо-рельс» применяются следующие меры: гребне- и рельсосмазывание; упрочение гребней бандажей; контроль качества ремонта и подбор диаметров колесных пар. Однако проведение перечисленных мер оказывается недостаточным. В связи с этим необходимы новые решения, направленные на увеличение ресурса бандажей [1].

Одним из перспективных способов снижения интенсивности изнашивания колесных пар, исследуемых в настоящее время, является обработка гребней локомотивов и электропоездов триботехническим составом – веществом, вводимым в зону трения и изменяющим параметры процесса трения [2, 3]. В отличие от лубрикации, триботехнический состав не требует присутствия в зоне трения после обработки. Результатом действия триботехнического состава является образование на поверхностях трения стеклокерамического покрытия. Покрытие образуется послойно, образование каждого слоя происходит за один полный оборот колесной пары.

В рамках исследования было проведено математическое моделирование процесса изнашивания поверхности бандажа [4]. В качестве объекта моделирования выступает математическая модель одной секции электровоза ВЛ11К [5], разрабатываемая в рамках исследования и реализуемая посредством программного комплекса «Универсальный механизм».

Структурная схема модели приведена на рис. 1.

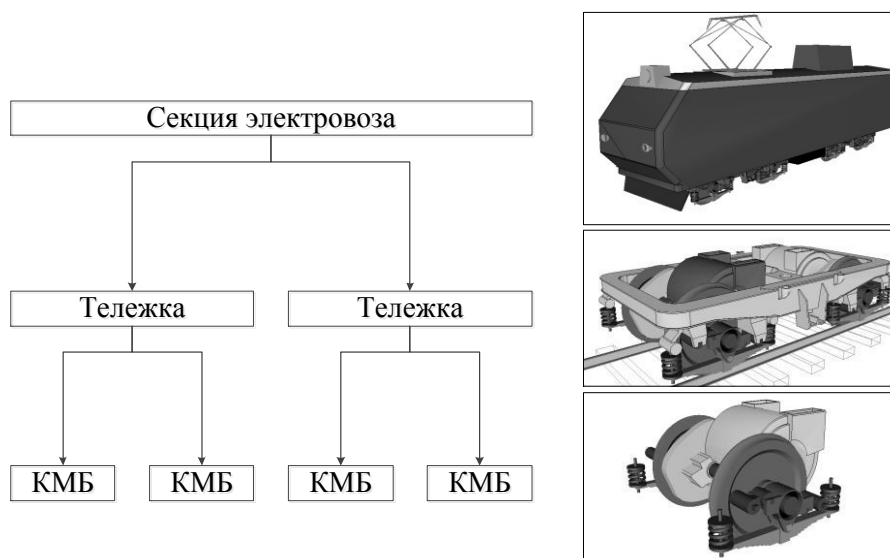


Рис. 1. Структурная схема модели одной секции электровоза

Расчетные схемы первой и второй ступеней рессорного подвешивания приведены на рис. 2 и 3.

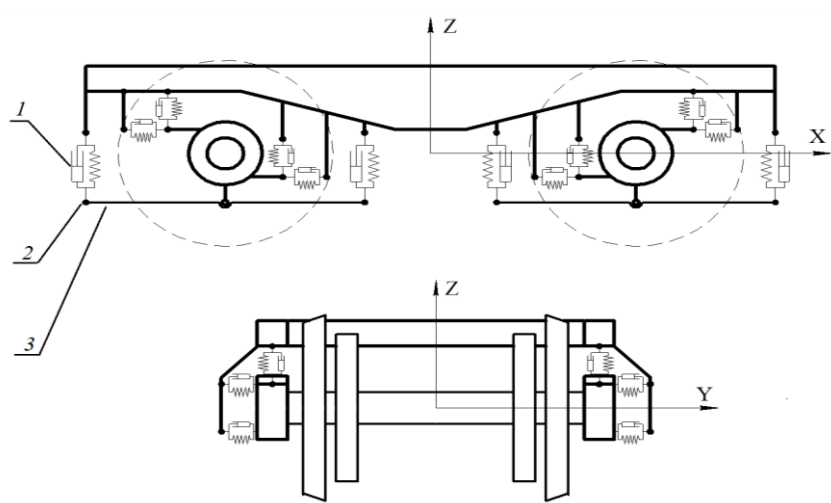


Рис. 2. Расчетная схема рессорного подвешивания первой ступени:

1 – упруго-диссипативный элемент; 2 – шарнир; 3 – абсолютно жесткое звено

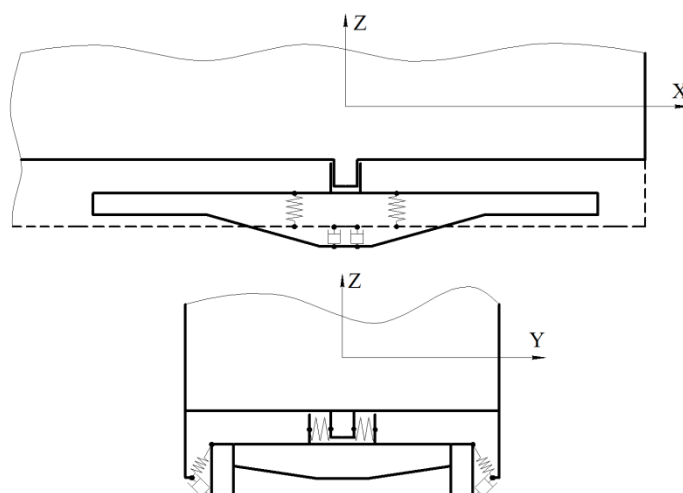


Рис. 3. Схема рессорного подвешивания второй ступени модели
на примере второй тележки

Адекватность разработанной модели проверялась путем анализа динамических характеристик в режимах выстойки и выбега. Величина нормальной силы в контакте колеса и рельса в состоянии покоя равна для всех колесных пар и составляет $1,13 \cdot 10^5$ Н. Вертикальные ускорения кузова не превышают $0,4 \text{ м/с}^2$ при частоте колебаний 30–35 Гц. Критерий безопасности Надаля при движении со скоростями до 100 км/ч в кривых радиусом до 400 м во время испытания модели не превысил значения 0,52.

В качестве профиля колесной пары назначен профиль ДМетИ. Начальный прокат бандажа, подрез гребня или иные дефекты поверхности (ползуны, волнообразный износ) отсутствуют. Испытание производилось на рельсах Р65 с неизношенным профилем. Неровности пути соответствовали предустановленному набору UIC_good_1000m.

Проводимое исследование включало в себя две ситуации, моделирование которых отличалось параметрами материалов контактирующих поверхностей колеса и рельса: движение локомотива без обработки гребней колесных пар, обработка триботехническим составом. Для каждой ситуации был проведен анализ эволюции профиля, состоящий из ста итераций. Значения параметров, различных для каждой ситуации, приведен в табл. 1.

Таблица 1

Значения параметров процесса моделирования

Параметр	Значения параметров	
	необработанный	обработанный НИОД
Коэффициент трения поверхности катания	0,45	0,45
Коэффициент трения боковой поверхности	0,45	0,35
Коэффициент Пуассона	0,28	0,24
Объемный коэффициент износа, м ³ /Дж	10 ⁻¹³	10 ⁻¹³

В процессе моделирования для каждой ситуации производилась фиксация значений удельного объемного износа, и по результатам были построены зависимости параметра $\Delta V_{\text{уд}}$ от проеденного локомотивом расстояния. Графически эти зависимости представлены на рис. 4.

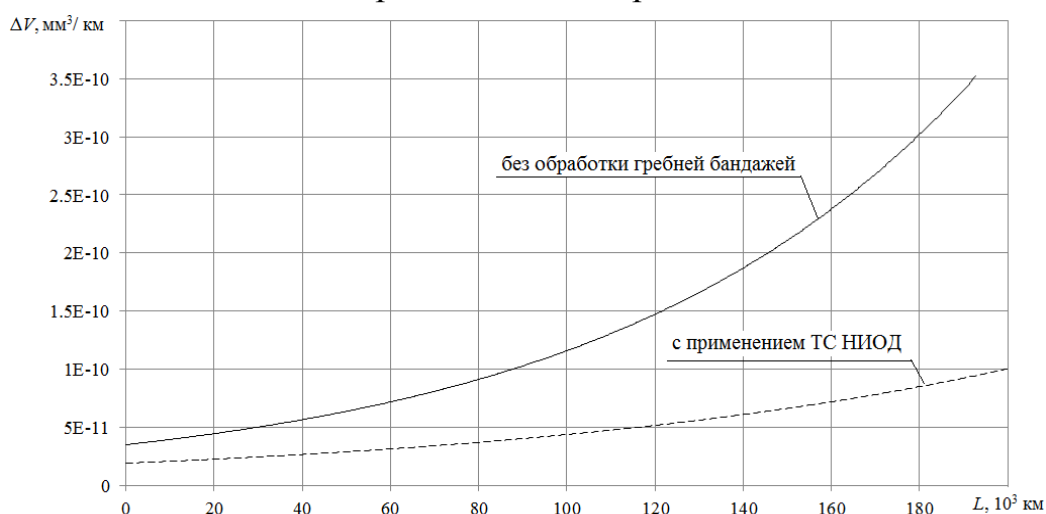


Рис. 4. Зависимости удельного объемного износа от пробега

Из полученных зависимостей (рис. 4) можно сделать следующие выводы:

1) интенсивность объемного износа возрастает по закону, близкому к степенной функции. Такая зависимость объясняется возрастанием вероятности отказа колесной пары с увеличением пробега при постепенном переходе от периода нормальной эксплуатации к периоду интенсивного износа;

2) применение триботехнического состава НИОД позволяет значительно снизить интенсивность изнашивания колесных пар. Особенно стоит отметить тот факт, что при обработке гребней ТС НИОД величина объемного износа достигает тех же значений, что и износ без обработки, но при пробеге локомотива в 1,5–2 раза больше.

Исследование эволюции профилей колес проводилось на основе модели износа ВНИИЖТ–1, встроенной в программный комплекс «Универсальный механизм» [6]. В результате моделирования первой ситуации, в которой отсутствовала обработка гребней, была получена картина эволюции профиля, представленная на рис. 5. Полный пробег модели составил 200 тыс. км.

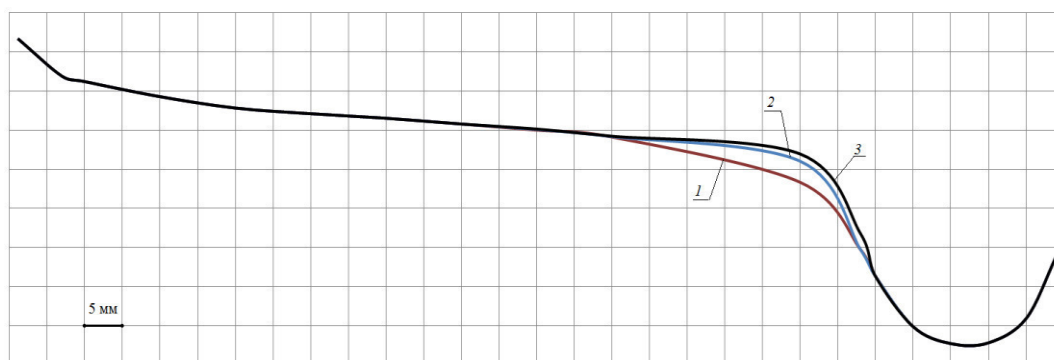


Рис. 5. Эволюция профиля колеса без обработки гребней:

1 – исходный профиль; 2 – пробег 100 тыс. км; 3 – пробег 200 тыс. км

При анализе картины износа заметно, что, несмотря на увеличение интенсивности объемного износа, с ростом пробега уменьшается толщина слоя изнашиваемого металла. Это можно объяснить несколькими причинами: явлением приработки поверхностей (за исходный был взят неизношенный профиль), постепенным увеличением площади поверхности, на которой происходит изнашивание [7, 8].

При моделировании второй ситуации, когда гребни колесных пар подвергались обработке триботехническим составом, также были получены профили, которые представлены на рис. 6. Полный пробег электровоза в данном случае составил 300 тыс. км.

Величина полного пробега увеличилась в 1,5 раза после обработки триботехническим составом. Эти результаты подтверждают данные статистического анализа [9], что свидетельствует об адекватности модели.



Рис. 6. Эволюция профиля колеса после обработки ТС НИОД:

1 – исходный профиль; 2 – пробег 100 тыс. км;
3 – пробег 200 тыс. км; 4 – пробег 300 тыс. км

Также проводилось сравнение изношенных профилей после пробега 100 тыс. км. Графически оно представлено на рис. 7.

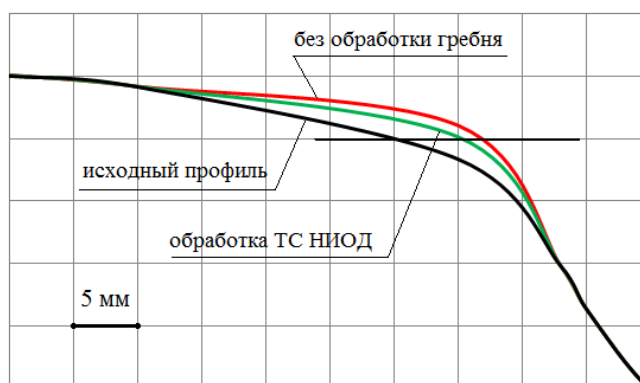


Рис. 7. Степень износа профилей колеса при пробеге 100 тыс. км

Из рис. 7 можно сделать вывод, что при пробеге 100 тыс. км износ гребня приблизился к предельно допустимому значению в 8 мм. В случае применения триботехнического состава НИОД износ при том же пробеге составляет 5–6 мм (темная линия на рис. 7), что является допустимым значением и не является поводом для проведения обточки.

Таким образом, исследование процесса изнашивания гребня на модели показало, что применение триботехнического состава НИОД для обработки колесных пар электровозов серии ВЛ11 позволит снизить интенсивность износа, а значит увеличить ресурс колесных пар в 1,5 раза, что соответствует

результатам, полученным при обработке гребней бандажей электровозов в локомотивных депо Свердловской железной дороги [10].

Список литературы

1. Буйносов, А. П. Основные причины интенсивного износа бандажей колесных пар подвижного состава и методы их устранения: Научная монография [Текст] / А. П. Буйносов / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург, 2009. – 224 с.
2. Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: взаимодействие колеса и рельса: Пер. с англ. [Текст] / У. Дж. Харрис, С. М. Захаров, Дж. Ландгрэн, Х. Турне, В. Эберсен. – М.: Интекст, 2002. – 408 с.
3. Буйносов, А. П. Ремонт локомотивов без прекращения их эксплуатации [Текст] / А. П. Буйносов, И. М. Пышный, В. А. Тихонов // Вестник Иркутского гос. техн. ун-та / Иркутский национальный исследовательский техн. ун-т. - Иркутск. – 2012. – № 1 (60). – С. 85 – 91.
4. Жаров, И. А. Температуры на пятнах контакта системы колодка – колесо – рельс при торможении экипажа [Текст] / И.А. Жаров, С.Б. Курцев // Вестник ВНИИЖТ. – 2008. – № 3. – С. 34 – 39.
5. Универсальный механизм 6.0. Руководство пользователя. – Брянск: Изд-во БГТУ, 2010. – 458 с.
6. Буйносов, А. П. Влияние применения триботехнического состава НИОД на ресурс колесных пар электроподвижного состава [Текст] / А. П. Буйносов, К. А. Стаценко, В. А. Тихонов // Вестник Транспорта Поволжья. – 2011. – №1 (25). – С. 30–34.
7. Наговицын, В. С. Алгоритм поиска критических узлов железнодорожного подвижного состава [Текст] / В. С. Наговицын, А. П. Буйносов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока / Сибирский гос. ун-т водного трансп. – Новосибирск. – 2014. – № 3 (21). – С. 17 – 21.
8. Буйносов, А. П. Математическое моделирование процесса изнашивания бандажей колесных пар электровоза А. П. Буйносов, И. М. Пышный, В. А. Тихонов // Научно-технический вестник Поволжья / Приволжский федеральный ун-т. – Казань, 2013. – № 3. – С. 107 – 110.
9. Буйносов, А. П. Выбор профиля поверхности катания бандажей колесных пар электровозов ВЛ11 / А. П. Буйносов, В. А. Тихонов // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения / Уральский гос.

ун-т путей сообщения. – Екатеринбург, 2012. – № 2. – С. 46 – 60.

10. Буйносов, А. П. Выбор остаточного проката бандажей при обточке колесных пар электровозов ВЛ11 / А. П. Буйносов // Журнал Сибирского Федерального университета. Серия: Техника и технологии. – Красноярск, 2013. – Т. 6 – № 2. – С. 221–228.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Буйносов Александр Петрович

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).

Колмогорова ул., д. 66, г. Екатеринбург, 620034, Российская Федерация.

Доктор техн. наук, профессор кафедры «Электрическая тяга» УрГУПС.

Тел. +7 (343) 319-59-32

E-mail: ABuinosov@usurt.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Buynosov Alexander Petrovich

Ural State University of Railway Transport (USURT).

66, Kolmogorova Street, Yekaterinburg, 620034, Russia, the Russian Federation.

Doctor of Tech. Science, Professor, of the Department «Electric Traction» USURT.

Tel. +7 (343) 319-59-32

E-mail: ABuinosov@usurt.ru

УДК 629.421.2

А. П. Буйносов, А. Р. Динисламов

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

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ЭЛЕКТРОВОЗОВ

Неразрушающий метод контроля глубины поверхностного термоупрочнения рассматривается как замена устаревшему разрушающему методу. Приводятся результаты статистического сравнения разрушающего и неразрушающего методов. Рассматриваются особенности неразрушающего метода акустического контакта.

Ключевые слова: электровоз, механическая часть, деталь, поверхность, термоупрочнение, эксплуатация, надежность, повышение.

INCREASING THE OPERATING RELIABILITY OF SURFACE-DETAINED DETAILS OF THE MECHANICAL ELECTRIC MOTOR

A non-destructive method for controlling the depth of surface thermal hardening is considered as a replacement for the obsolete destructive method. The results of statistical comparison of destructive and non-destructive methods are given. The features of the nondestructive method from the point of view of acoustic contact are considered.

Key words: electric locomotive, part, surface, thermal hardening, depth, non-destructive testing, ultrasound, measurement, method, error.

Следование современным тенденциям транспортного машиностроения, продиктованным в первую очередь экономическими реалиями, ведет к увеличению скоростей перевозок и снижению издержек. Поэтому вопрос о повышении эксплуатационной надежности электропоездов стоит как никогда остро. В то же время, поверхностно упрочненные детали механической части электровозов, в настоящее время, не подвергаются надлежащему контролю [1]. При производстве и ремонте деталей механической части применяются устаревшие разрушающие методы, они чрезвычайно трудозатратны и экономически невыгодны. Что представляет из себя разрушающий контроль: из всей партии выбирают одну или несколько деталей, производится механическая обработка, срезы в различных сечениях. Затем проводятся металлографические и другие исследования. Очевидно, что контроль одной детали не может достоверно охарактеризовать всю партию целиком.

Для решения этой проблемы в УрГУПС совместно с АО «НПО» Интротест» был разработан неразрушающий метод контроля глубины поверхностной закалки деталей механической части электровозов [2]. Суть метода заключается в регистрации сигналов рассеяния поперечно поляризованной ультразвуковой волны на границе закаленный слой – основной металл. Принципиальная схема приведена на рис. 1.

С помощью пьезоэлектрического [3, 4] преобразователя в объект контроля вводится ультразвуковая волна. В приповерхностном закаленном слое волна распространяется почти без рассеяния. В то время как в переходной зоне, где величина зерна начинает расти, волна рассеивается. По времени прихода эхосигналов рассеивания можно вычислить глубину закаленного слоя.

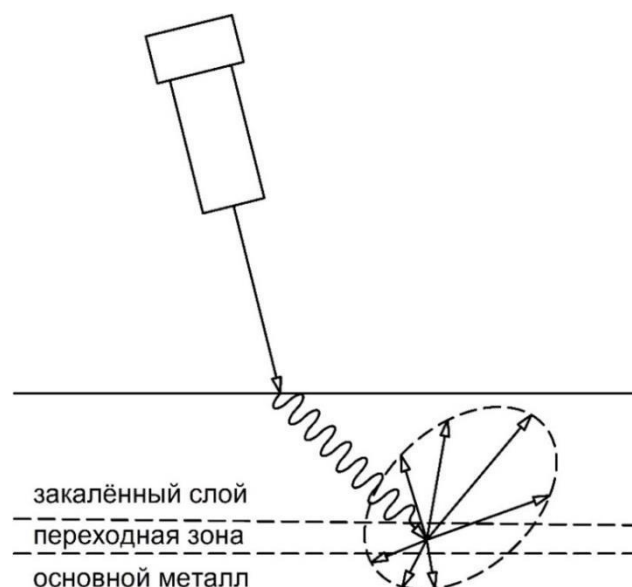


Рис. 1. Принципиальная схема неразрушающего метода контроля глубины закалки

Для проведения исследований, в качестве объекта контроля был выбран валик рессорного подвешивания ТЭМ2У.35.30.102-01 (рис. 2).



Рис. 2. Образцы, изготовленные из валика рессорного подвешивания
ТЭМ2У.35.30.102-0

В работе [5] было проведено статистическое сравнение разрушающего и неразрушающего методов. В частности, подтверждены гипотезы о соответствии совокупности результатов измерения профиля термоупрочненного слоя нормальному распределению (критерий χ^2) и сопоставимости дисперсий результатов измерения разрушающим и неразрушающим способами, т. е. удовлетворяют ли дисперсии результатов измерений критерию Фишера. Из

полученных результатов следует, что неразрушающий метод можно рассматривать как достоверную замену разрушающим методам.

В зависимости от акустического контакта различают два способа ультразвукового контроля:

– иммерсионный – объект контроля и преобразователь погружены в жидкость, расстояние $R_{\text{ж}}$ между преобразователем и деталью много больше длины волны $\lambda_{\text{ж}}$ в жидкости

$$R_{\text{ж}} \gg \lambda_{\text{ж}}; \quad (1)$$

– контактный – преобразователь излучает ультразвуковую волну в объект контроля через слой жидкости $r_{\text{ж}}$, который меньше или равен длине волны $\lambda_{\text{ж}}$ в жидкости

$$r_{\text{ж}} \leq \lambda_{\text{ж}}. \quad (2)$$

Для контроля относительно небольших партий деталей используется контактный ручной способ контроля. В АО «НПО»Интротест» был разработан пьезоэлектрический преобразователь А122-15-45 (рис. 3) и портативный универсальный ультразвуковой дефектоскоп-толщиномер «Интротест-1МВ» (рис. 4).



Рис. 3. Пьезоэлектрический преобразователь А122-15-45



Рис. 4. Портативный универсальный ультразвуковой дефектоскоп «Интротест-1МВ»

Форма и отражающая способность зерен металла в переходной зоне в различных точка образца могут сильно отличаться друг от друга [5, 6]. Поэтому при сканировании, эхо-сигнала рассеяния «перетекает» из одного положения в другое на А-скане. Для удобства работы целесообразно использовать режим огибающей [7]. Дефектоскоп регистрирует максимальную амплитуду сигнала в каждый момент времени с заданной частотой дискретизации и отображает ее на экране. А-скан эхо-сигнала рассеяния и огибающей представлен на рис. 5.

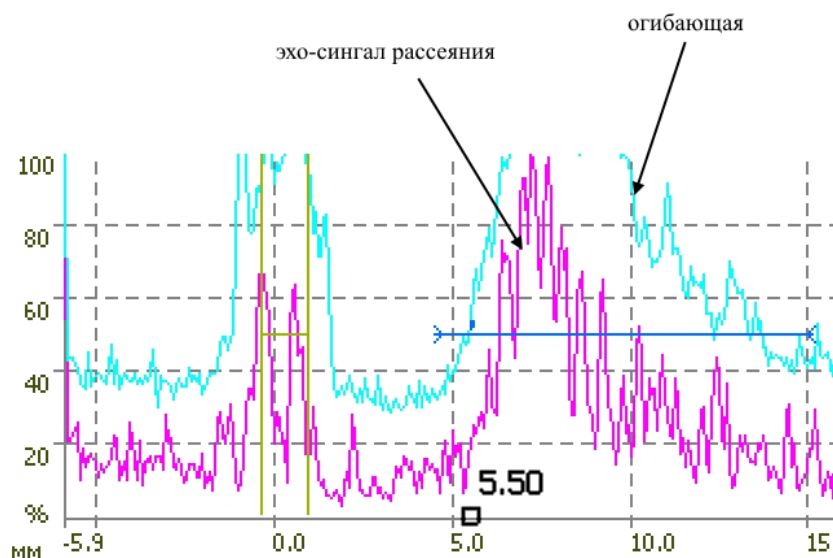


Рис. 5. А-скан и огибающая эхо-сигнала рассеяния

Таким образом, огибающая показывает минимальную толщину профиля термоупрочнения для всей детали целиком, так как данные накапливаются.

Неразрушающий метод контроля глубины упрочненного слоя представляет собой альтернативу разрушающим методам контроля. При этом обладает рядом преимуществ: деталь остается целой (в отличие от разрушающего метода); на контроль всей поверхности валика требуется не более двух минут, в то время как измерение разрушающим методом только в одной плоскости с учетом механической обработки занимает несколько часов; контролю подвергаются все детали партии.

Достоверность замены разрушающего метода неразрушающим доказана статистически.

Использование режима огибающей позволяет определить наибольшее утонение профиля термоупрочненного слоя.

В дальнейшем необходимо провести исследования по улучшению согласования с системе пьезопреобразователь – дефектоскоп.

Список литературы

1. Буйносов, А. П. Неразрушающий метод контроля глубины поверхностной закалки деталей механической части локомотивов как альтернатива разрушающим способам [Текст] / А. П. Буйносов, Д. В. Волков, А. Р. Динисламов // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург, 2018. – № 1 (56). – С. 26 – 29.

2. Буйносов, А. П. Ремонт локомотивов без прекращения их эксплуатации [Текст] / А. П. Буйносов, И. М. Пышный, В. А. Тихонов // Вестник Иркутского гос. техн. ун-та / Иркутский национальный исследовательский техн. ун-т. – Иркутск. – 2012. – № 1 (60). – С. 85 – 91.

3. Буйносов, А. П. Уменьшения погрешности измерения глубины поверхностного термоупрочнения деталей локомотивов неразрушающим ультразвуковым методом [Текст] / А.П. Буйносов, А.Р. Динисламов // Вестник транспорта Поволжья / Самарский гос. ун-т путей сообщения. – Самара, 2018. – № 1. – С. 7 – 10.

4. Наговицын, В. С. Алгоритм поиска критических узлов железнодорожного подвижного состава [Текст] / В. С. Наговицын, А. П. Буйносов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока / Сибирский гос. ун-т водного трансп. – Новосибирск. – 2014. – № 3 (21). – С. 17 – 21.

5. Буйносов, А. П. Ультразвуковой неразрушающий метод контроля глубины поверхностной закалки деталей механической части подвижного состава [Текст] / А. П. Буйносов, Д. В. Волков, А. Р. Динисламов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока / / Сибирский гос. ун-т водного трансп. – Новосибирск. – 2018. – № 1. – С. 104 – 108.

6. Буйносов, А. П. Уменьшение погрешности измерения глубины поверхностного термоупрочнения деталей локомотивов неразрушающим ультразвуковым способом [Текст] / А. П. Буйносов, А. Р. Динисламов // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург, 2018. – № 2 (57). – С. 69 – 72.

7. Буйносов, А. П. Основные причины интенсивного износа бандажей колесных пар подвижного состава и методы их устранения: Научная монография [Текст] / А. П. Буйносов / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург, 2009. – 224 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Буйносов Александр Петрович

Уральский государственный университет
путей сообщения (УрГУПС).

Колмогорова ул., д. 66, г. Екатеринбург,
620034, Российская Федерация.

Доктор техн. наук, профессор кафедры
«Электрическая тяга» УрГУПС.

Тел. +7 (343) 319-59-32

E-mail: ABuinosov@usurt.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Buynosov Alexander Petrovich

Ural State University of Railway Trans-port
(USURT).

66, Kolmogorova Street, Yekaterinburg,
620034, Russia, the Russian Federation.

Doctor of Tech. Science, Professor, of the
Departament «Electric Traction» USURT.

Tel. +7 (343) 319-59-32

E-mail: ABuinosov@usurt.ru

Динисламов Альберт Рифович
Уральский государственный университет
путей сообщения (УрГУПС).
Колмогорова ул., д. 66, Екатеринбург,
620034, Российская Федерация.
Аспирант кафедры «Электрическая тяга»
УрГУПС.
Тел. +7 9058057162
E-mail: al.dinislamov@gmail.com

Dinislamov Albert Rifovich
Ural State University of Railway Transport
(USURT).
66, Kolmogorova Street, Yekaterinburg,
620034, Russia, the Russian Federation.
Postgraduate of the department «Electric
traction» USURT.
Tel. +7 9058057162
E-mail: al.dinislamov@gmail.com

УДК 629.421.1

В. С. Иванов, И. А. Барinov

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

ЦЕПИ ЗАЩИТЫ ТРАНЗИСТОРНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЬНО- ИНВЕРТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В данной статье представлен анализ основных причин выходов из строя силовых IGBT-транзисторов. На основании проведенного анализа, был выбрано и рассчитано рациональное схемотехнические решения по предотвращению возникновения аварийных процессов при работе разработанного выпрямительно-инверторного преобразователя на моторвагонном подвижном составе переменного тока.

Ключевые слова: выпрямительно-инверторный преобразователь, IGBT-транзистор, снабберная цепь, коммутация, переходные процессы

Vladislav S. Ivanov, Igor A. Barinov

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

PROTECTIVE CIRCUITS FOR AC-FED ELECTRIC ROLLING STOCK TRANSISTOR POWER CONVERTERS

The article presents an analysis of power IGBTs main failure causes. Based on the analysis, the rational circuit solutions for catastrophic processes prevention are selected and calculated for a recently developed AC EMU power converter.

Keywords: rectifier-inverter Converter, IGBT-transistor, snubber circuit, switching, transients.

Проектирование цепей защиты преобразователей высокой мощности является одной из важных задач инженера, от которых будет зависеть не только работоспособность, но и долговечность преобразователя.

В качестве силовых ключей, разработанного выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП) электропоезда переменного тока, предлагается использовать современные полупроводниковые приборы IGBT-транзисторы.

Во время работы IGBT-транзистора на его выводах возникают перенапряжения вызываемые влиянием индуктивности рассеяния L_{PAC} при коммутации больших токов с высокой скоростью. При отключении IGBT-транзистора напряжение на коллекторе возрастает на величину $\Delta V = L_B \cdot \frac{di_C}{dt}$

относительно потенциала шины питания V_{DC} , где $\frac{di_C}{dt}$ - скорость спада тока коллектора. В результате чего суммарный сигнал «коллектор–эмиттер» $V_{CE} = V_{DC} + \Delta V$ может превысить допустимое значение и вывести транзистор из строя [1].

Аналогичный процесс происходит при открывании IGBT-транзистора, в этом случае перенапряжение вызывается скачком тока $\frac{di_{rr}}{dt}$ (di_{rr}, t_{rr} - ток и время обратного восстановления) при выключении оппозитного диода.

Как правило, выходы из строя IGBT-транзисторов чаще всего происходят в моменты его коммутации.

При выключениях транзистора, могут возникать обратные индуктивные выбросы, способные вывести из строя транзистор. Уменьшение амплитуды таких выбросов достигается управлением драйвера, формирующий плавное выключение транзистора. Кроме того, с помощью драйвера имеется возможность контроля падения напряжения на переходе коллектор–эмиттер предотвращающий превышения порогового значения токовой нагрузки, тем самым снижая нагрев транзистора.

Так же при коммутациях транзистора могут возникнуть пробойи напряжением, которые в свою очередь делятся на пробой перехода затвор–эмиттер, основными причинами которого могут быть неисправность драйвера, либо попаданием напряжения на затвор через емкость Миллера, в большинстве случаев для решения данной проблемы достаточно установить ограничитель напряжения между затвором и эмиттером, в этом случае емкость сама снизит ΔU до значений с которыми справится ограничитель, условием установки которого является

максимальная близость к транзистору, так же решение возможно с помощью установки обратного диода с затвора на цепь плюсового питания драйвера.

Вторым видом пробоя напряжением является перенапряжение коллектор-эмиттер, при возникновении которого достаточно всего нескольких мкс, чтобы выйти из строя, при этом ни одна защита не сумеет сработать. На сегодняшний день существуют два способа борьбы с данными видами перенапряжения. Первый - это активная защита «active clamping», заключающаяся в увеличении длительности выключения транзистора, за счет подзарядки емкости Миллера в случаях превышения порогового значения напряжения на коллекторе. Однако активная защита не обладает быстродействием, что является основным недостатком данного способа защиты [2]. Так же существует и второй способ – пассивный. Пассивная защита в свою очередь представлена двумя способами, первый это снижение ΔU , к которому относятся снабберные цепи, и второй – это ограничение его же с помощью ограничителей и варисторов.

Практически все современные транзисторы и модули IGBT имеют прямоугольную область безопасной работы (ОБР или SOA – Safe Operating Area), то есть допускают работу в режиме «жесткого переключения», когда коммутируется максимальный ток и напряжение. В этом случае, как правило, рекомендуется простейший снаббер, рис. 1 а., представляющий собой пленочный конденсатор низкоиндуктивный. Конструкция снабберной емкости должна обеспечивать не только минимальную распределенную индуктивность, но и удобство подключения к терминалам силового модуля. Для снижения добротности паразитного колебательного контура последовательно с конденсатором может быть установлен резистор, рис. 1 б. Для ограничения скорости коммутации транзисторов рекомендуется цепь, представленная на рис. 1 в. Быстрый диод и резистор, используемые в этой схеме, необходимы для разделения цепей заряда и разряда и ограничения разрядного тока.

В наиболее мощных схемах паразитная индуктивность, образованная снабберной цепью, может оказаться настолько большой, что это приведет к появлению выбросов напряжения, вызванных коммутацией тока на индуктивности снаббера. В этом случае используется схема, рис. 1. г). Принцип ее работы такой же, как в предыдущем случае, однако паразитная индуктивность ниже, поскольку снабберы подключены непосредственно к коллектору и эмиттеру каждого транзистора.

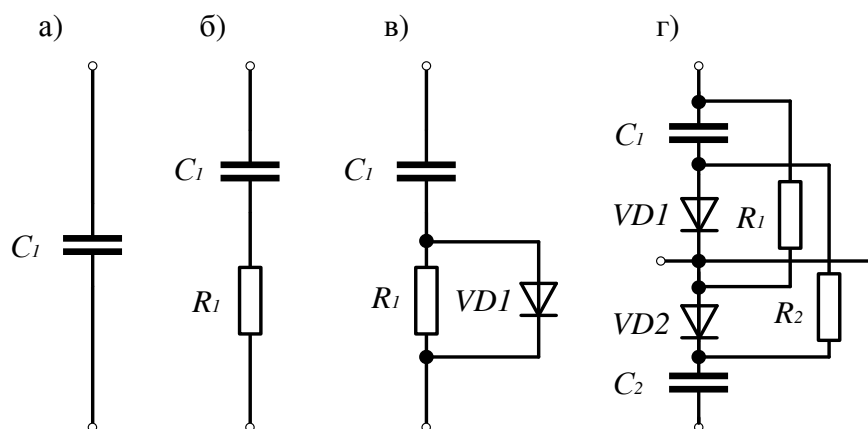


Рис. 1. Типы снабберных схем

В данной статье предпочтение отдано RC-снабберу, т.к. снабберная цепь с использованием резистора играет роль фильтра низких частот, замыкая через себя ток переходного процесса. Такие цепи ограничивают выбросы при переходном процессе, а также уменьшают динамические потери в силовых ключах и формируют траекторию переключения, а также резистор является средством уменьшения добротности LC контура.

На рис. 2 приведена схема электрическая принципиальная плеча ВИП электропоезда с защитными (снабберными) цепями IGBT-транзисторов [3].

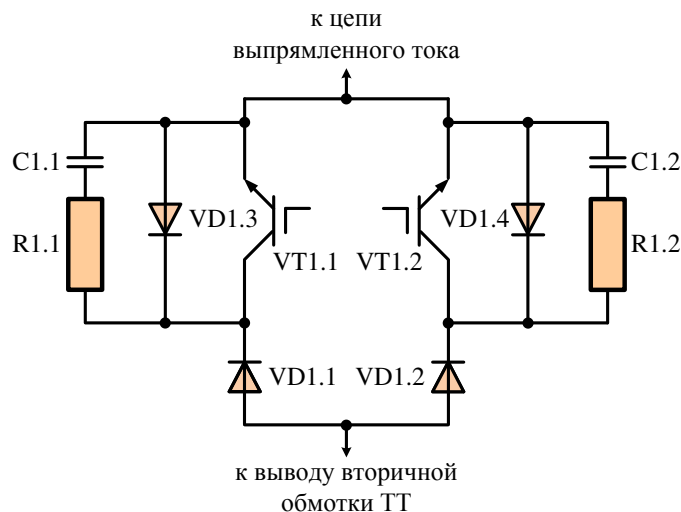


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема плеча ВИП электропоезда с защитными цепями IGBT-транзисторов

Номинал резистора RC-цепи выбирается исходя из условия что постоянная времени RC-цепи должна быть больше чем длительность импульса возникающего при перенапряжении и удовлетворять условию

$$\tau < RC, \quad (1)$$

где t – длительность импульса при перенапряжении;

R – номинал снабберного резистора;

C – номинал снабберного конденсатора.

По результатам математического моделирования, длительность импульса при перенапряжении равна $t=1,1$ мс. Так постоянная времени RC-цепи (τ) должна быть больше длительности импульса возникающего при перенапряжении, то примем ее, равной $\tau = 1,4$ мс, из стандартного ряда значений номиналов конденсаторов выберем емкость равную 6,8 мкФ (при выборе емкости от конкретного производителя необходимо учитывать его рекомендации по выбору) и с учетом τ произведем расчет номинала снабберного резистора.

$$R = \frac{\tau}{C}.$$

$$R = \frac{1,4 \cdot 10^{-3}}{6,8 \cdot 10^{-6}} = 205,88 \text{ Ом}.$$

Получившееся значение снабберного резистора составляет 205,88 Ом, выберем из ряда стандартных номинальных значений сопротивлений наиболее близкое, которое равно 200 Ом.

По проведенным расчетам, произведем математическое моделирование с принятыми значениями $C1.1=C1.2=6,8$ мкФ, $R1.1=R1.2=200$ Ома.

Как видно из рис. 3. выброс напряжения при включении транзистора отсутствует, что свидетельствует о правильном выборе типа снабберной цепи и подборе её параметров.

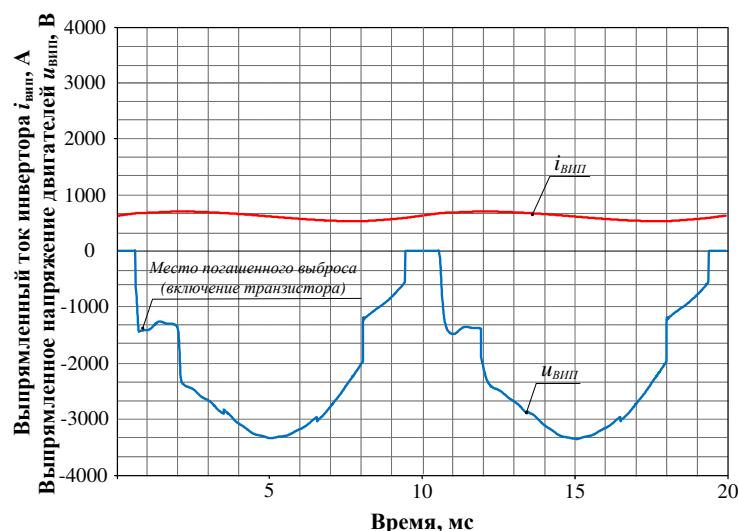


Рис. 3. Диаграммы напряжения и тока на примере транзисторного ВПТ электропоезда переменного тока в режиме рекуперативного торможения

При проведении математического моделирования экспериментальным путем были подобраны значения снабберных резистора и конденсатора, которые установлены параллельно обмоткам тягового трансформатора. Значения емкости и активного сопротивления составили: $C=500$ мкФ, $R=1$ Ом.

При этом характерное время такой RC-цепи составит

$$\tau = 1 \cdot 500 \cdot 10^{-6} = 500 \text{ мкс.}$$

Заключение. Проектировка ВИП для электроподвижного состава является сложнейшей задачей, требующей особого подхода на всех этапах. Одним из главных параметров при проектировке ВИП является распределенная индуктивность звена постоянного тока (сглаживающие реакторы, обмотки тяговых электродвигателей), определяющая уровень переходных перенапряжений и во многом влияющая на надежность работы преобразователя. В данной статье рассмотрены основные причины выходов из строя силовых IGBT-транзисторов, а также произведен выбор и расчет оптимального схемотехнического решения (RC-цепь) предотвращающее аварийные процессы при работе разработанного транзисторного ВИП.

Список литературы

1. Колпаков, А. Проблемы проектирования IGBT-инверторов: перенапряжения и снабберы / А. Колпаков // Компоненты и технологии. – 2008. – №5 – С. 98-103.
2. Сайт АО «Электрум АВ» [Электронный ресурс]. – Орел.2018. – Режим доступа: <http://electrum-av.com>, свободный.
3. Иванов, В. С. Разработка выпрямительно-инверторного преобразователя и выпрямительной установки возбуждения для моторвагонного подвижного состава переменного тока на диодно-транзисторной базе / В. С. Иванов, О. В. Мельниченко, А. О. Линьков // Электропривод на транспорте и в промышленности: тр. II Всерос. науч.-практ. конф. (Хабаровск, 20–21 сентября 2018 г), 2018. – 423 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Иванов Владислав Сергеевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).
Чернышевского, 15, г. Иркутск, 664074,
Российская Федерация.
Аспирант кафедры «Электроподвижной состав»
ИрГУПС.
Тел.: +7 (983) 153-10-75.
E-mail: Vladislav-Sergeevich-Irgups@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivanov Vladislav Sergeevich

Irkutsk State Transport University (ISTU).
15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, Russian
Federation.
Postgraduate of the department «Electric rolling
stock» ISTU.
Phone: +7 (983) 153-10-75.
E-mail: Vladislav-Sergeevich-Irgups@mail.ru

Баринов Игорь Александрович

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского, 15, г. Иркутск, 664074,

Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электроподвижной состав»
ИрГУПС.

Тел.: +7 (914) 907-37-20.

E-mail: ib4558@yahoo.com

Barinov Igor Alexsandrovich

Irkutsk State Transport University (ISTU).

15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, Russian
Federation.

Postgraduate of the department «Electric rolling
stock» ISTU.

Phone: +7 (914) 907-37-20.

E-mail: ib4558@yahoo.com

УДК 629.4.053

А. А. Свечников, И. В. Метальников

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС),

г. Самара, Российская Федерация

КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ТЕПЛОВОЗОВ 2ТЭ116У В ЭКСПЛУАТАЦИИ

В данной статье рассмотрены современные методы контроля и диагностики тепловозов в эксплуатации. Особое внимание уделено бортовым системам диагностики. Авторы предлагают расширить функциональные возможности микропроцессорной системы управления тепловозом за счет установки дополнительных датчиков, контролирующих работу центробежного масляного фильтра. Приведена схема расположения датчиков на тепловозе и подробно описан принцип работы предложенной системы диагностики.

Ключевые слова. Диагностика тепловозов, диагностика дизеля, диагностика масляной системы, центробежный фильтр, датчик частоты вращения.

Aleksandr A. Svechnikov, Iliya V. Metalnikov

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

CONTROL AND DIAGNOSTICS OF HEAT TRUCKS 2TE116U IN OPERATION

In this article, modern methods of control and diagnostics of diesel locomotives in operation. Particular attention is paid to on-board diagnostic systems. The authors propose to expand the functionality of the microprocessor control system of the diesel locomotive by installing additional sensors that control the operation of the centrifugal oil filter. The scheme of arrangement of sensors on the locomotive is given and the operating principle of the proposed diagnostic system is described in detail.

Keywords. Diagnostics of diesel locomotives, diesel diagnostics, oil system diagnostics, centrifugal filter, speed sensor.

Основными показателями работы тепловоза являются надежность, мощность и экономичность, определяемые техническим состоянием. Существующая до настоящего времени система технического обслуживания и текущих ремонтов по регламентированным перечням без оценки технического состояния ведет к неоправданным затратам.

Согласно целевой программе «Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года», утвержденной постановлением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р, одним из основных направлений научно-технического развития ОАО «Российские железные дороги» является повышение экономичности и увеличение эксплуатационного ресурса технических средств.

Повышение эксплуатационной эффективности подвижного состава неразрывно связано с совершенствованием системы планово-предупредительной системы технического обслуживания и ремонта путем перехода к смешанной системе ремонта подвижного состава с учетом фактического состояния, реализация, которой во многом определяется уровнем, технического контроля и диагностирования локомотивов в процессе эксплуатации.

Для обеспечения надежной работы тепловозных дизелей, снижения затрат на техническое обслуживание, ремонт и эксплуатацию необходима точная оценка их технического состояния в течение всего периода эксплуатации, что осуществимо лишь при внедрении современных методов, средств и систем технического контроля и диагностирования.

Известно, что в межремонтный период эксплуатации тепловозов возможно снижение мощности до уровня в 70–60 %, с одновременным ухудшением экономичности до 35 % паспортных значений. Во многом это происходит из-за непринятия своевременных мер по восстановлению работоспособности основных систем и агрегатов двигателей, по причине отсутствия детализированной и точной информации о состоянии узлов и агрегатов тепловоза.

В связи с этим в последние годы на сети дорог ОАО «РЖД» внедряются различные системы технического диагностирования, в том числе и бортовые, способные существенно повысить скорость получения диагностической информации при одновременном снижении трудоемкости и времени обработки полученных результатов.

Расширение применения современных средств и методов диагностирования и контроля локомотивов, а также увеличение контролируемых параметров, позволит оперативно реагировать на изменение

технического состояния подвижного состава, и повысить эффективность системы технического обслуживания и ремонта.

В эксплуатационной практике имеют место случаи внезапного возникновения неисправностей или отказов в работе локомотивов. Анализ отказов тепловозов 2ТЭ116У в эксплуатации показал, что основную долю неисправностей составляет дизельная установка (около 40 %) и электрическое оборудование (около 30 %).

В свою очередь, анализ основных причин неисправностей дизеля показал, что значительную долю производственных отказов составляют неисправности, связанные с плохим качеством ремонта и технического обслуживания топливной аппаратуры (ТА) и механизма газораспределения (МГР) в депо (71 % и 38,1 % соответственно). Также причиной значительной доли неисправностей цилиндро-поршневой группы (ЦПГ) является преждевременный износ (38,5 %), который в большей степени зависит от степени загрязнения смазочных материалов.

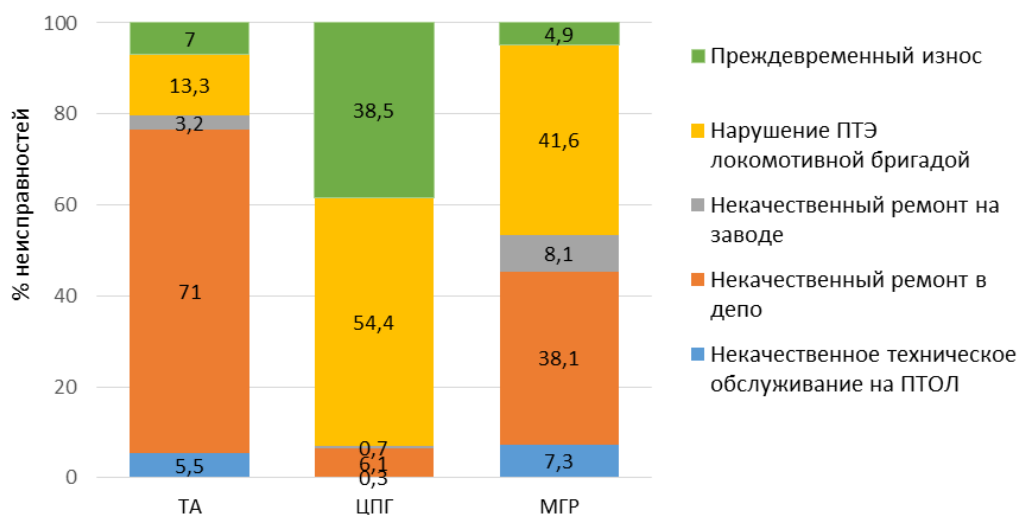


Рис. 1. Распределение основных причин неисправностей дизеля

Работа тепловозов с таким техническим состоянием ТА, ЦПГ и МГР тепловозных дизелей приводит к существенным потерям в эксплуатации, связанным с перерасходом топлива, увеличением времени простоя в ремонте, перерасходу запасных частей и затратам на проведение ремонта тепловозов.

Проблема точного планирования и своевременного заказа запасных частей на сегодняшний день для сервисных локомотивных депо стоит особо остро [1].

Обеспечить обнаружение представленных неисправностей можно увеличив уровень контроля технического состояния подвижного состава, что даст возможность определить текущее состояние локомотива и обеспечить

выработку рекомендаций о требуемом объеме выполняемых работ.

Техническое состояние локомотива влияет также на расход топлива в процессе эксплуатации [2]. Кроме того, исследования показали, что после проведения ТО-3 и ТР-1 удельный расход топлива тепловозами снижается, а с увеличением наработки возрастает. Разница в расходе топлива между исправным локомотивом и локомотивом с пробегом после ремонта может достигать 7–10 %. Это связано с ухудшением технического состояния систем дизеля.

Оперативное обнаружение неисправностей и износа, позволит производить ТО и ТР своевременно, что обеспечит сокращение расхода топлива для локомотива 2ТЭ116 на 3–5 % и снизит внезапные отказы в эксплуатации на 70–80 %.

Наиболее эффективными системами контроля и диагностики тепловозов являются бортовые системы. Сравнительный анализ бортовых систем тепловозов показал, что наиболее проработанной является система МСУ-Т (микропроцессорная система управления и диагностики), используемая на тепловозе 2ТЭ116У. МСУ-Т обеспечивает широкий набор диагностируемых параметров. Однако, ни одна из существующих современных бортовых систем контроля и диагностирования, не производит прямой или косвенной оценки уровня загрязнения масла. Отсутствие контроля работы центробежного масляного фильтра является признанной проблемой и входит в «ТОП 100 проблем сервисного обслуживания локомотивов».

Конструктивно система бортовой диагностики тепловоза 2ТЭ116У выполнена в модульном исполнении, что облегчает выполнение поиска неисправности и ремонта в случае выхода из строя в процессе эксплуатации.

На рис. 2 приведена схема расположения основных датчиков на тепловозе 2ТЭ116У.

В модуль аналого-цифрового преобразования поступают аналоговые электрические сигналы с датчиков скорости, давления, температуры и плотности топлива, температуры и уровня воды, частоты вращения центробежного масляного фильтра, давления и температуры масла и прочих аналоговых датчиков. Обработываются и передаются в модуль обработки информации. Он, в свою очередь, выводит информацию на дисплейный модуль и записывает на энергонезависимое запоминающее устройство.

От оборудования тепловоза дискретные сигналы о переключении позиции контроллера машиниста, реверсора, включении тормозного переключателя, компрессора, вентиляторов охлаждения дизеля поступают в модуль дискретного

ввода. Обрабатываются и также поступают в модуль обработки информации.

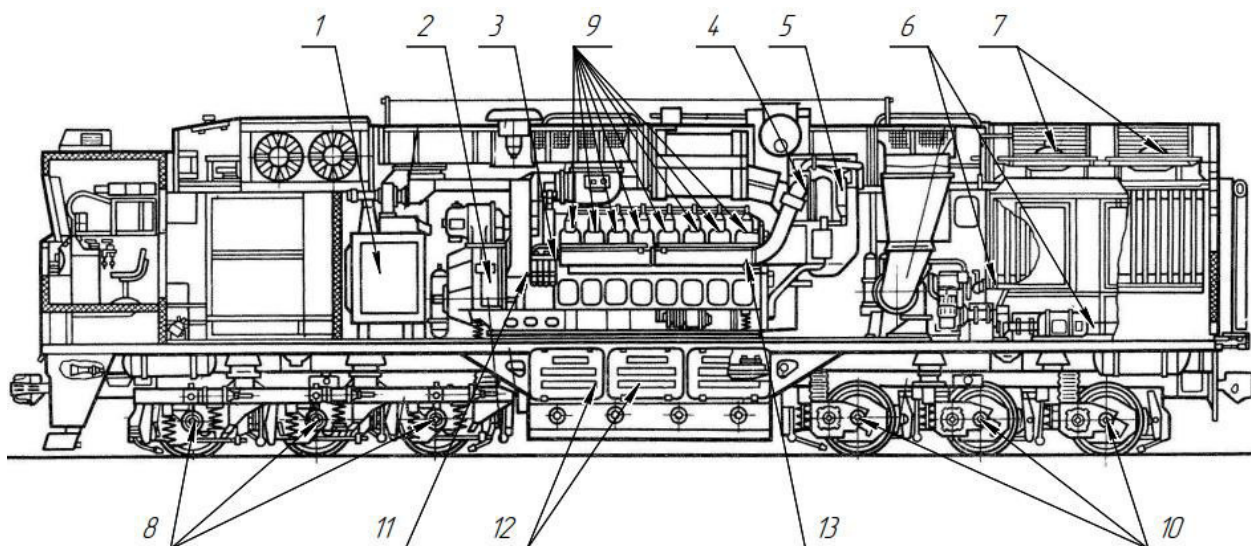


Рис. 2. Схема расположения основных датчиков на тепловозе 2ТЭ116У:

1 – датчики тока каналов выпрямительной установки; 2 – тока и напряжения главного генератора; 3 – частоты вращения коленчатого вала дизеля; 4 – температуры выхлопных газов на входе в турбокомпрессор; 5 – частоты вращения ротора турбокомпрессора; 6 – температуры воды на входе и выходе из радиаторов охлаждения; 7 – включения мотор-вентиляторов охлаждения; 8 – скорости вращения колесных пар; 9 – температуры отработанных газов на выходе из цилиндров; 10 – токов тяговых электродвигателей; 11 – датчик частоты вращения центробежного масляного фильтра; 12 – датчики уровня, плотности и температуры топлива; 13 – датчики давления и температуры масла

Питание модулей и датчиков осуществляется через источник питания, который поддерживает в заданных пределах напряжение питания потребителей.

Выпрямитель питания обмоток возбуждения тягового генератора предназначен для преобразования входного однофазного переменного напряжения в регулируемое по величине постоянное напряжение, питающее обмотку возбуждения тягового генератора тепловоза.

Отличительной особенностью, предложенной системы контроля и диагностики является наличие датчика частоты вращения ротора центробежного масляного фильтра.

На рис. 3 показана зависимость фактора разделения от частоты оборотов центрифуги.

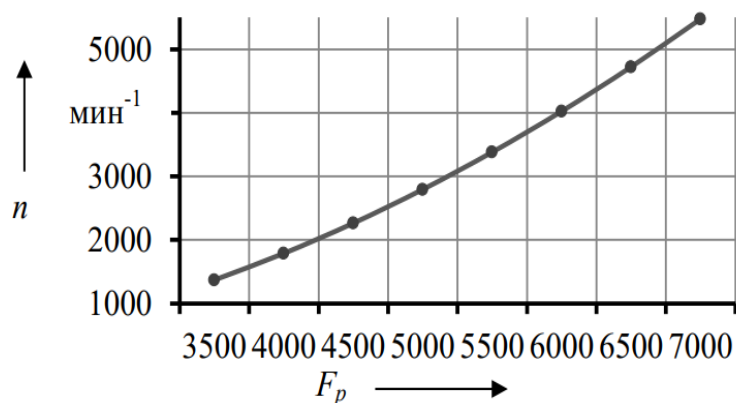


Рис. 3. Зависимость фактора разделения от частоты оборотов центрифуги

Из представленной зависимости видно, что увеличение фактора разделения центрифуги напрямую зависит от ее угловой скорости. В процессе эксплуатации масло загрязняется продуктами износа, и частота вращения центробежного фильтра падает, что ведет к некачественной очистке масла и еще большему ее загрязнению.

Для определения момента замены масла в картере двигателя как раз и предлагается внедрение датчика, измеряющего частоту вращения ротора центробежного масляного фильтра.

Высокая эффективность контроля работоспособности центробежного масляного фильтра позволяет исключить работу двигателя внутреннего сгорания при пониженной частоте вращения ротора центробежного масляного фильтра, связанную с большими отложениями загрязнений в роторе, тем самым предотвратить попадание загрязненного масла в систему смазки работающего двигателя и повысить эксплуатационные характеристики двигателя.

Список литературы

1. Виртуальный склад как средство оптимизации запаса и расходования запасных частей в структуре сервисного обслуживания [Текст] / А. Ю. Балакин, А. В. Курунов, Д. Я. Носырев и др. // Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов: Материалы второй международной научно-практической конференции. – М: ООО «Локомотивные технологии», 2015. – С. 107-109.
2. Свечников, А. А. Перспективные направления экономии топлива при тепловозной тяге [Текст] / А. А. Свечников, А. В. Муратов, Д. Я. Носырев //

Trans-Mech-Art-Chem: Труды V Международной научно-практической конференции / Московский гос. ун-т путей сообщения. – М: Федеральное агентство ж.д. транспорта, 2008. – С. 204-206.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Свечников Александр Александрович
Самарский государственный университет
путей сообщения (СамГУПС).
443066, г. Самара, ул. Свободы, 2 В.
Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Локомотивы» СамГУПС.
Тел.: +7 917-952-83-88.
E-mail: alexzander751@mail.ru

Метальников Илья Владимирович
Самарский государственный университет
путей сообщения (СамГУПС).
443066, г. Самара, ул. Свободы, 2 В.
Аспирант 1-го года обучения, специальности
05.04.02 «Тепловые двигатели» СамГУПС
Тел.: +7 937-207-15-66
E-mail: ykrainzcev@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Svechnikov Aleksandr Aleksandrovich
Samara State Transport University (SSTU).
443066, g. Samara, Svobody, 2 V, Russia.
Ph.D. in Technical Sciences, the senior lecturer
of the department «Locomotives» SSTU.
Phone: +7 917-952-83-88.
E-mail: alexzander751@mail.ru

Metalnikov Ilya Vladimirovich
Samara State Transport University (SSTU).
443066, g. Samara, Svobody, 2 V, Russia.
Post-graduate student of the first year of
training, specialty 05.04.02 «Thermal engines»
SSTU.
Phone: +7 937-207-15-66.
E-mail: ykrainzcev@mail.ru

УДК 629.4.077

Е. В. Федоров

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

СПОСОБ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Предлагаемый в статье способ закрепления подвижного состава имеет важное отличие, сущность которого состоит в том, что для закрепления железнодорожного подвижного состава используется тормозная система самого подвижного состава в рамках установленного технологического процесса без необходимости использования внешних тормозных средств.

Ключевые слова: подвижной состав; автоматические тормоза; закрепление; эффективность; расчет; метод.

THE METHOD OF FASTENING OF ROLLING STOCK

The method of fastening the rolling stock proposed in the article has an important difference, the essence of which is that for the fastening of the railway rolling stock the brake system of the most rolling stock is used within the established technological process without the need for using external braking means.

Keywords: rolling stock; automatic brakes; fastening; efficiency; calculation; method.

Для закрепления подвижного состава применяются внешние средства в виде переносных ручных тормозных башмаков; автономные средства – ручные (стояночные) тормоза – на локомотивах, мотор-вагонном подвижном составе, на пассажирских и грузовых вагонах [1].

В соответствии Правилами технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации (ПТЭ) стоящие на станционных путях без локомотива составы поездов, вагоны и специальный подвижной состав должны быть закреплены от ухода тормозными башмаками, ручными тормозами или другими установленными средствами закрепления.

Инструкция по движению поездов и маневровой работе на железных дорогах Российской Федерации содержит нормы и основные правила закрепления подвижного состава на станционных путях с помощью тормозных башмаков и других средств.

Правила технического обслуживания тормозного оборудования у управления тормозами для удержания состава на перегоне содержат специальную таблицу потребного количества ручных тормозов и тормозных башмаков на каждые 100 тс веса состава в зависимости от крутизны уклона [2].

Таким образом, в качестве средств закрепления подвижного состава на станционных путях рекомендуются ручные тормозные башмака, а при остановке на перегоне и ручные тормоза.

Установленные перечисленными Инструкциями и Правилами нормативы закрепления весьма приблизительны и недостаточно обоснованы. Основополагающий документ (ПТЭ) содержал рекомендации по закреплению подвижного состава только на станционных путях, для которых допустимый уклон составляет величину 0,0025. Инструкция по движению поездов и маневровой работе также учитывает только станционные пути и не содержит

нормативов для ручных тормозов. Только в Правилах технического обслуживания тормозного оборудования есть рекомендации по закреплению поезда ручными тормозами после вынужденной остановки на уклоне при исправно действующих тормозах и приведены нормативы применения ручных тормозов на уклонах до 20 ‰ даже в случае неисправности автотормозов [2].

Научный подход к решению серьёзной транспортной задачи закрепления подвижного состава упомянутыми средствами [5] позволил разработать универсальные расчётные формулы, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Потребное количество тормозных средств для удержания состава или группы вагонов (в процентах)

Тормозные башмаки (РТБ)	Пассажирские вагоны	$N_3/N = 0,5 \cdot i$
	Грузовые вагоны	$Q_3/Q = 0,5 \cdot i$
Ручные тормоза (РТ)	Пассажирские вагоны	$N_3/N = i$
	Грузовые вагоны порожние	$N_3/Q = 0,030 \cdot i$
	Грузовые вагоны груженые	$N_3/Q = 0,025 \cdot i$

Содержание таблицы основано на следующих положениях:

- каждый вагон оборудован одним комплектом ручного тормоза;
- незачем подсчитывать вес состава пассажирского поезда для тормозных башмаков, ведь нагрузка на каждое колесо вагона пропорциональна его tare, а тара вагонов не имеет существенных отклонений.

С этой точки зрения расчёт числа тормозных башмаков для отдельного закрепления порожних и гружёных вагонов по различным формулам теряет смысл [4].

Башмак относится к переносным средствам закрепления массой около 7 кг, и для закрепления в парке прибытия состава средней длины и веса требуется установить в среднем 10 башмаков, кроме того, в парках сортировочных станций нередки случаи схода подвижного состава вследствие перекатывания колеса через башмак.

Кроме перечисленных средств, в эксплуатации также достаточную известность получили стационарные устройства заклинивающего типа, например, упор УТС-380, предложенный учёными ВНИИЖТ, устройства закрепления составов УЗ0С-86 и УЗС-86Р системы Н. И. Пачеса.

Стояночные тормоза для закрепления состава в парке прибытия сортировочной станции не находят массового применения возможно вследствие того, что тормозное усилие стояночного тормоза остаётся непредсказуемым в случае приведения его в действие при отпущенных автоматических тормозах [3].

По степени влияния на безопасность движения стояночный тормоз не уступает автоматическому, но ему уделяется недостаточное внимание, что подтверждается случайным и необоснованным переходом на раздельное торможение, при котором необдуманно вдвое понизили эффективность ручного тормоза вагона.

Сложившееся состояние свидетельствует об отсутствии глубокого анализа тормозной системы вагона в целом, ведь до сих пор не раскрыто важное свойство любого вагона сохранять максимальную тормозную эффективность и полную неистощимость после приведение в действие ручного тормоза при заторможенном автоматическом тормозе.

Тормозное оборудование вагона следует рассматривать как комплексную систему, в состав которой входят автоматический и стояночный тормоза [6]. Только с помощью комплексного подхода к тормозной системе вагона в целом позволяет с помощью ручного тормоза использовать максимальную силу автоматического тормоза. Такое свойство целесообразно использовать для закрепления подвижного состава, в первую очередь на станционных путях парка прибытия сортировочных станций при отстое в ожидании роспуска с горки или выполнении маневровых работ.

Важное отличие и определяющая сущность комплексного подхода состоит в том, что для закрепления железнодорожного подвижного состава используется тормозная система самого подвижного состава в рамках установленного технологического процесса без необходимости использования внешних тормозных средств [7].

Закрепление подвижного состава с помощью комплекса тормозных средств вагона производится следующим порядком.

После отцепки локомотива в соответствии с разработанной технологией выполняется полная разрядка тормозной магистрали состава, после полного торможения автоматическими тормозами приводятся в действие стояночные тормоза концевых вагонов в «голове» и «хвосте» состава, после прицепки локомотива перед выполнением маневровых работ производится обычный

ручной отпуск автоматических тормозов разрядкой рабочих камер и перевод стояночных тормозов концевых вагонов в отпускное состояние.

Применение эффекта торможения автоматическим тормозом совершенно не зависит от усилия на штурвале ручного тормоза – достаточно повернуть штурвал до состояния упора.

Приведение в действие стояночных тормозов после полного торможения автоматическими тормозами обеспечивает полное использование эффективности автотормозов подвижного состава; в статическом состоянии тормозная сила вагона достигает максимальной величины B_0 , сила скатывания T состава весом Q на расчётном уклоне i определится из выражения общего вида

$$T = Q \cdot i, \quad (1)$$

а условие предотвращения скатывания

$$Q \cdot i < n \cdot B_0, \quad (2)$$

или

$$n > i \cdot Q / B_0, \quad (3)$$

где n – число вагонов с действующими стояночными тормозами.

Тормозная сила в статическом состоянии B_0 для порожнего вагона с учётом силы сопротивления движению составляет 3 тс; для гружёного вагона – 5,5 тс; максимальный уклон путей в парке прибытия $i = 0,0025$; в таком случае число вагонов, закрепляемых предлагаемым способом, составляет:

– $n = 0,7 \cdot Q$ – для концевых вагонов в порожнем состоянии;

– $n = 0,4 \cdot Q$ – для концевых вагонов в гружёном состоянии.

В результате при затормаживании стояночными тормозами двух концевых порожних вагонов (в «голове» и «хвосте» состава) обеспечивается надёжное закрепление состава весом до 3 тыс. тс, а при гружёном состоянии вагонов – состава весом до 5 тыс. тс.

Закрепление состава с помощью ручного (стояночного) тормоза одного вагона равноценно применению четырёх тормозных башмаков.

Поэтому для достижения таких же результатов требуется установить по четыре тормозных башмака под колёса каждого из двух расчётных вагонов.

В случае превышения расчётных значений веса состава следует увеличить число затормаживаемых вагонов на станционных путях с использованием следующих нормативов:

– заторможенный с помощью стояночного тормоза один порожний вагон позволяет закрепить состав весом 1,5 тыс. тс; два порожних вагона (в голове и хвосте состава) – состав весом 3,0 тыс. тс;

– заторможенный с помощью стояночного тормоза гружёный вагон позволяет закрепить состав весом 2,5 тыс. тс; два гружёных вагона (в голове и хвосте состава) – состав весом 5,0 тыс. тс.

При этом обязательно соблюдается требование закрепления стояночными тормозами вагонов с обоих концов состава.

Повышение надёжности закрепления состава вагонов обеспечивается также дополнительным технологическим приёмом, который заключается в том, что разрядка автоматических и отпуск ручных тормозов производятся непосредственно перед выполнением маневровых работ [8].

Приведенные расчётные формулы могут применяться для продольного профиля любой величины, что свидетельствует об их универсальности.

Список литературы

1. Буйносов, А. П. Совершенствование метода расчета длины тормозного пути железнодорожного подвижного состава [Текст] / А. П. Буйносов, Е. В. Федоров // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 1 (33). – С. 13 – 22.

2. Правила технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава. Утверждены Советом по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества №60 (Протокол от 6-7 мая 2014 г., г. Астана), приказом Минтранса России от 03.06.2014 г. № 151 и Распоряжением ОАО «РЖД» № 2071р от 03.09.2014 г.

3. Глушко, М. И. Проверка действия тормозов [Текст] / М. И. Глушко, Е. В. Федоров // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2011. – № 1 (28). – С. 55 – 58.

4. Глушко, М. И. Роль человеческого фактора в условиях нарушения безопасности движения [Текст] / М. И. Глушко, Е. В. Федоров // Инновационный транспорт / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2014. – № 2 (12). – С. 31 – 34.

5. Глушко, М. И. Закрепление вагонов автономными средствами [Текст] / М. И. Глушко, Е. В. Федоров // Вагоны и вагонное хозяйство / Открытое

акционерное общество Российские железные дороги. – Москва. – 2012. – № 3. – С. 36 – 37.

6. Федоров, Е. В. Метод расчета пути подготовки тормозов [Текст] / Е. В. Федоров // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Транспорт-2012»: в 3-х частях. Ростовский гос. ун-т путей сообщения. – Ростов-на-Дону. – 2012. – С. 300 – 302.

7. Буйносов, А. П. Определение эффективности тормозов железнодорожного подвижного состава в пути следования [Текст] / А. П. Буйносов, Е. В. Федоров // Транспорт: наука, техника, управление / Всероссийский институт научной и технической информации (ВИНИТИ РАН) – Москва. – 2018. – № 8. – С. 7 – 11.

8. Буйносов, А. П. Метод определения производительности компрессоров локомотива [Текст] / А. П. Буйносов, Е. В. Федоров // Научно-технический вестник Поволжья / Приволжский федеральный ун-т. – Казань. – 2018. – № 9. – С. 39 – 41.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Федоров Евгений Валерьевич

Уральский государственный университет
путей сообщения (УрГУПС)

Колмогорова ул., д. 66, г. Екатеринбург,
620034, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электрическая тяга»
УрГУПС.

Тел.: (343) 221-24-70

E-mail: EFedorov@usurt.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Fedorov Evgeny Valeryevich

Ural State University of Railway Transport
(USURT)

66, Kolmogorova Street, Yekaterinburg,
620034, Russia, the Russian Federation.

Postgraduate of the department «Electric
traction» USURS.

Tel: (343) 221-24-70

E-mail: EFedorov@usurt.ru

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЯГИ ПОЕЗДОВ

УДК 621.331

А. Энх-Амгалан

Локомотивное депо Улан-Батор, АО «УБЖД», г. Улан-Батор, Монголия

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЯГИ ПОЕЗДОВ НА УЛАН-БАТОРСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ

Рассмотрено сегодняшнее состояние железных дорог Монголии. Показатели работы железных дорог, а также выполненные расчеты свидетельствуют, что применение электрической тяги имеет высокую эффективность и позволяет улучшить эксплуатационные показатели Улан-Баторской железной дороге.

Ключевые слова: железная дорога, электрификация, тяга, локомотив.

A. Enkh-Amgalan

Loc-depot of Ulaanbaatar, JSC «UBTZ», Ulaanbaatar, Mongolia

INCREASE EFFICIENCY TRACTION OF TRAIN THE ULAN BATOR RAILWAY

Considered the current state of the railways of Mongolia. The performance of railways, as well as the calculations performed, indicate that the use of electric traction has high efficiency and allows to improve the operational performance of the Ulaanbaatar railway.

Keywords: railway, electrification, traction, locomotive.

Железные дороги Монголии являются ведущим видом транспорта в стране. Они играют решающую роль в выполнении перевозок важнейших грузов, топлива, промышленного сырья, готовой продукции. Бесперебойное функционирование железнодорожного транспорта служит гарантией возможности развития экономики страны, ее промышленности и сельского хозяйства.

Общая протяженность железных дорог Монголии составляет 1815 км. Крупнейшей железнодорожной линией Монголии является Трансмонгольская магистраль Сухэ-Батор - Улан-Батор - Дзамын-Ууд протяженностью 1111 км.

В настоящее время в Монголии применяется тепловозная тяга. В грузовом и пассажирском движении работают тепловозы российского производства, при этом для вождения грузовых поездов используются тепловозы серии 2ТЭ25КМ, 2ТЭ116 (УМ, УД), а вождение пассажирских

поездов осуществляется тепловозами серии 2М62, 2ZAGAL (модернизированные 2М62).

Эффективность тяги поездов во многом определяется расходом топливно-энергетических ресурсов. Тепловозы потребляют большое количество дорогостоящего дизельного топлива, приобретаемого за рубежом. Это значительно увеличивает стоимость перевозок на железной дороге. Опыт других стран, прежде всего, России, показывает, что стоимость перевозок существенно снижается при электрической тяге. Электрификация железных дорог позволяет повысить массу и скорость движения поездов, пропускную и провозную способность железных дорог, уменьшить эксплуатационные расходы.

Во всем мире общая протяженность железных дорог к началу XXI в. приблизилась к 1 млн.км, из них 25% электрифицировано, а 75% работает на тепловозной тяге. Мировой объем перевозок между этими видами тяги распределяется примерно одинаково: по 50%. Следовательно, при меньшей протяженности электрифицированных железных дорог средняя грузонапряженность на них в 3 раза выше, чем на линиях с тепловозной тягой.

В настоящее время на Улан-Баторской железной дороге, как отмечалось выше, применяется тепловозная тяга, основные показатели объем транспортной работы ежегодно возрастает. Ретроспективный анализ показателей работы Улан-Баторской железной дороге свидетельствует о том, что объем транспортной работы ежегодно возрастает (рис. 1).

Поскольку средняя масса поезда увеличивается, а среднесуточный пробег локомотива находится примерно на одном уровне, то среднесуточная производительность локомотива также возрастает. Ежегодно средняя стоимость дизельного топлива увеличивается, это приводит к увеличению эксплуатационных расходов.

Прогноз объема перевозок на железных дорогах Монголии показывает, что в 2020 году ожидается увеличение объемов перевозок (рис. 2). По минимальному варианту (1 вариант) развития к 2020 г. по прогнозу объем перевозок составит 34,6 млн. тонн. При этом планируется увеличение международных перевозок грузов за счет развития экспортного потенциала Монголии и наращивания экспортных поставок, главным образом, продукции горнорудной промышленности Монголии: наращивание добычи на железорудных месторождениях Баянгол, Тумуртей, Баргилт и существующий транзитным объемом. По среднему варианту (2 вариант) развития к 2020 г. по прогнозу объем перевозок составит 48,2 млн. тонн. в год.

Прирост объемов грузовых перевозок по сети АО «УБЖД» будет обусловлен, динамичным приростом перевозок экспортоориентированной продукции добывающий промышленности: на начальных этапах разработки угольных месторождений Тавантолгой и Овоот, а также железорудного месторождения Мон-Дулаан и возрастающий транзитный объем. По максимальному варианту (3 вариант) развития к 2020 г. по прогнозу объем перевозок составит 73,7 млн, тонн. в год. Наибольший прирост объемов грузовых перевозок по сети АО «УБЖД» по третьему варианту будет обусловлен транзитным динамичным приростом перевозок экспортоориентированной продукции добывающий промышленности: с выходом на проектную мощность и планируемую транзитную перевозку между РФ и КНР. Выполнение такого большого объема перевозок тепловозной тягой потребует больших эксплуатационных расходов. Поэтому для снижения эксплуатационных расходов и повышения эффективности перевозочного процесса на железных дорогах целесообразно использовать электрическую тягу на переменном токе.

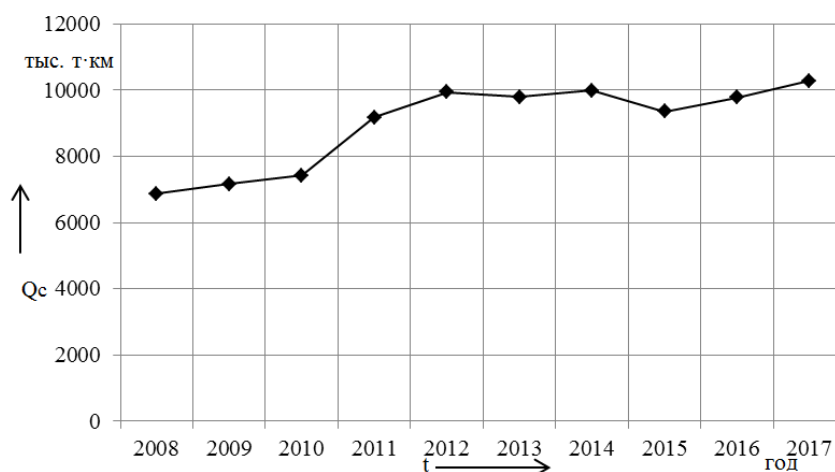


Рис. 1. Объем транспортной работы локомотивное депо Улан-Батор на Улан-Баторской железной дороге



Рис. 2. Перспективы объемов перевозок на Улан-Баторской железной дороге, млн. т

Максимальная масса состава вагонов определяется по различным условиям, прежде всего, по условиям движения с установившейся скоростью на расчетном подъеме и по условиям трогания и разгона. Во всех случаях расчет максимальной массы состава вагонов производится с учетом основных положений теории тяги поездов и рекомендаций [1-3].

Согласно [1-3] максимальная масса состава вагонов по условию движения поезда с установившейся скоростью в режиме тяги, т.

$$m_c = \frac{F_{кр} \cdot 10^3 - m_{л}g(w_{ол} + i)}{g(w_{ос} + i)}. \quad (1)$$

где $F_{кр}$ – касательная сила тяги локомотива;

$m_{л}$, m_c – массы локомотива и состава вагонов;

g – ускорение свободного падения;

$w_{ол}$, $w_{ос}$ – удельное основное сопротивление движению локомотива и состава вагонов;

i – крутизна подъема.

Удельное основное сопротивление движению локомотива под током, Н/кН

$$w_{ол} = w_o' = 1,9 + 0,01V + 0,0003V^2. \quad (2)$$

Удельное основное сопротивление движению 4-осных грузовых вагонов на роликовых подшипниках, Н/кН

$$w_{ос} = w_o'' = 0,7 + (3 + 0,1V + 0,0025V^2)/m_{во}, \quad (3)$$

где $m_{во}$ – масса на ось вагона, т.

Количество вагонов состава поезда определяется выражением

$$n_v = m_c / (4m_{во}). \quad (4)$$

Исходные данные и результаты расчета максимальной массы поезда, ведомого электровозом 2ЭС5К и тепловозом 2ТЭ116 с установившейся расчетной скоростью и силой тяги на расчетном подъеме, приведены в таб. 1. Расчет максимальной массы поезда выполнен для одного из лимитирующих подъемов крутизной 16 ‰, имеющих на Улан-Баторской железной дороге, на таких подъемах требуется подталкивание тяжелых поездов массой 3000 т и выше.

Результаты расчета показывают, что при движении с расчетной скоростью и силой тяги на лимитирующем подъеме крутизной 16 ‰ максимальная масса поезда для одного электровоза 2ЭС5К составляет 2772 т против 2665 т для одного тепловоза 2ТЭ116, т. е. на 107 т больше, хотя скорость электровоза 43,5 км/ч почти в два раза выше скорости тепловоза 24,2 км/ч.

Таблица 1

Исходные данные и результаты расчета максимальной массы поезда

Тип и серия локомотива	Электровоз 2ЭС5К	Тепловоз 2ТЭ116
Масса локомотива $m_{\text{л}}$, т	192	276
Расчетная скорость $V_{\text{р}}$, км/ч	43,5	24,2
Расчетная сила тяги локомотива $F_{\text{кр}}$, кН	502,3	496,4
Вагоны	Грузовые 4-осные на подшипниках качения	
Масса на ось вагона $m_{\text{во}}$, т	17,5	
Путь	Звеньевой	
Крутизна расчетного подъема i , ‰	16	
Удельное основное сопротивление движению локомотива под током w_0' , Н/кН	2,88	2,32
Удельное основное сопротивление движению грузовых вагонов w_0'' , Н/кН	1,16	1,09
Масса поезда $m_{\text{с}}$, т	2772	2665

Оценим энергетическую эффективность применения электрической тяги на участке пути 1 км с подъемом крутизной 16 ‰.

а) Для электровоза 2ЭС5К время прохождения 1 км пути с расчетной скоростью 43,5 км/ч составляет

$$T = L/V = 1 \cdot 60 / 43,5 = 1,37 \text{ мин.}$$

Удельный расход электроэнергии электровоза 2ЭС5К при движении с расчетной скоростью 43,5 км/ч и силой тяги 502,3 кН согласно [3] равен

$$a_3 = 123,4 \text{ кВт} \cdot \text{ч/мин.}$$

Тогда полный расход электроэнергии на тягу поезда массой 2772 т на участке пути 1 км с подъемом крутизной 16 ‰ составляет

$$A_3 = a_3 T = 123,4 \cdot 1,37 = 169,0 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

Стоимость израсходованной электроэнергии при ее тарифе на Улан-Баторской железной дороге $c_3 = 142:39,28 = 3,6 \text{ р./кВт} \cdot \text{ч}$ [6] составляет

$$\Pi_3 = c_3 A_3 = 3,6 \cdot 169,0 = 608,4 \text{ р.}$$

б) Для тепловоза 2ТЭ116 время прохождения 1 км пути с расчетной скоростью 24,2 км/ч составляет

$$T = L/V = 1 \cdot 60 / 24,2 = 2,48 \text{ мин.}$$

Удельный расход дизельного топлива тепловоза 2ТЭ116 при движении с расчетной скоростью 24,2 км/ч и силой тяги 496,4 кН согласно [3] равен $a_{\text{т}} = 8,0 \text{ кг/мин.}$

Тогда полный расход дизельного топлива на тягу поезда массой 2665 т на участке пути 1 км с подъемом крутизной 16 ‰ составляет

$$A_T = a_T T = 8 \cdot 2,48 = 19,84 \text{ кг.}$$

Стоимость израсходованного дизельного топлива при его тарифе на Улан-Баторской железной дороге $c_T = 2010/39,28 = 51,17$ руб/кг [4] составляет

$$\Pi_T = c_T A_T = 51,17 \cdot 19,84 = 1015,2 \text{ р.}$$

По результатам расчетов видно, что на 1 км пути лимитирующего подъема крутизной 16 ‰ затраты на топливно-энергетические ресурсы при электрической тяге примерно в 1,7 раза меньше, чем при тепловозной тяге. На участках с легким профилем пути, т. е. с подъемами меньшей крутизны, энергозатраты при электрической тяге будут еще меньше по сравнению с тепловозной тягой, поскольку при малых нагрузках и на холостом ходу расход электроэнергии электровозов существенно снижается, а расход дизельного топлива тепловозов практически не уменьшается.

Список литературы

1. Осипов, С. И. Теория электрической тяги [Текст] / С. И. Осипов, С. С. Осипов, В. П. Феоктистов. – М.: Маршрут, 2006. – 434 с.
2. Бакланов, А. А. Теория электрической тяги. Тяговые расчеты: Методические указания по курсовому и дипломному проектированию [Текст] / А. А. Бакланов. – Омск.: ОмГУПС, 1999. – 39 с.
3. Правила тяговых расчетов для поездной работы [Текст] / П. Т. Гребенюк, А. Н. Долганов и др. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.
4. [Электронный ресурс]. – режим доступа: <https://www.mongolbank.mn/>
5. [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://shunkhlai.mn/>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Алтангэрэл Энх-Амгалан

Локомотивное депо Улан-Батор, АО «УБЖД».
Улица Сеул-42, г. Улан-Батор, 210535,
Монголия.
Инженер локомотивного депо Улан-Батор,
АО «УБЖД».
Тел.: +976 86119909.
E-mail: enkhamgalan0203@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Altangerel Enkh-Amgalan

Loc-depot of Ulaanbaatar, JSC «UBTZ».
St. Seoul-42, Ulaanbaatar, 210535, Mongolia.
Engineer of Locomotive depot of Ulaanbaatar,
JSC «UBTZ».
Phone.: +976 86119909.
E-mail: enkhamgalan0203@gmail.com.

К. И. Доманов, С. Г. Истомин

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

ТЯГОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЭЛЕКТРОВОЗА ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ 2ЭВ120 НА ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ

В статье рассмотрены тяговые параметры электровоза двойного питания нового поколения. Представлены существующие схемы участков обслуживания электровозами и локомотивными бригадами на исследуемом полигоне железных дорог. Приведено сравнение основных параметров электровозов постоянного тока и однофазного переменного, эксплуатация которых в настоящее время организована на участках движения с поездами расчетной массы в длительном режиме тяги на подъемах различной крутизны. Представлена схема предполагаемой организации эксплуатации электровоза двойного питания и локомотивных бригад. Рассчитаны тяговые параметры двухсистемного электровоза с учетом плана и профиля пути на предполагаемых участках эксплуатации, удельное основное сопротивление движению локомотива и составу поезда при расчетной скорости движения, удельные ускоряющие и замедляющие силы поезда.

Ключевые слова: электровоз, 2ЭВ120, двойного питания, двухсистемный, тяговые расчеты, удельные силы сопротивления движению.

Kirill I. Domanov, Stanislav G. Istomin

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

TRAFFIC OPPORTUNITIES OF ELECTRIC POWER OF DOUBLE POWER 2EV120 ON THE WESTERN SIBERIAN RAILWAY

The article discusses the traction parameters of a new generation electric locomotive. The existing schemes of service areas by electric locomotives and locomotive brigades on the studied railway test site are presented. A comparison is made of the main parameters of DC and single-phase AC electric locomotives, the operation of which is currently organized on sections of movement with trains of calculated mass in the long-term mode of thrust on climbs of various steepness. The scheme of the proposed organization of operation of a double power locomotive and locomotive crews is presented. Calculated traction parameters of a two-system electric locomotive, taking into account the plan and profile of the track in the proposed areas of operation, the specific basic resistance to movement of the locomotive and the composition of the train at the estimated speed of movement, the specific accelerating and decelerating forces of the train.

Key words: electric locomotive, 2EV120, dual power, dual-system, traction calculations, specific forces of resistance to movement.

Повышение эффективности перевозочного процесса на железнодорожном транспорте зависит от комплексного развития инфраструктуры. Наиболее важными элементами данной системы являются вагонный парк, пути, система электроснабжения, устройства обеспечивающие безопасность движения поездов, отвечающий современным техническим требованиям тяговый подвижной состав.

Наиболее экономически важным направлением грузовых перевозок России является транспортный коридор Кузбасс-Центр, часть которого пролегает по Западно-Сибирской железной дороге. Железнодорожные магистрали дороги соединяют крупнейшие бассейны по добыче угля, руды, углеводородов с предприятиями перерабатывающей промышленности и сухопутными пограничными переходами. Вынужденные технические стоянки для смены локомотивов и локомотивных бригад, на станциях стыкования электротяги постоянного тока с номинальным напряжением в контактной сети 3 кВ с переходом на питание однофазным переменным током с номинальным напряжением в контактной сети 25 кВ с промышленной частотой 50 ГЦ, отрицательно влияют на важнейшие показатели грузопотока [1].

Ранее для таких участков была выпущена сравнительно небольшая партия отечественных грузовых электровозов двойного питания серии ВЛ82М с коллекторными тяговыми двигателями, которые до сих пор эксплуатируются на электрифицированных участках Южной, Северо-Кавказской и Октябрьской железных дорог. Данные электровозы физически и морально устарели, их тяговые и эргономические характеристики не соответствуют намеченному в компании ОАО «РЖД» вектору развития грузового движения, ни комфортным условиям труда локомотивных бригад. В настоящее время для увеличения объема перевозок и повышение показателей работы железнодорожного транспорта возрастает актуальность применения электровозов двойного питания [1].

Вследствие большой протяженности рассматриваемого транспортного коридора, нами выбран участок, имеющий лимитирующий подъем и начальным пунктом формирования грузового поезда. Ключевым элементом в определении тяговых возможностей электровоза на конкретном плече обслуживания является продольный профиль пути, который на участке Междуреченск – Алтайская наиболее сложный. В результате проведенного анализа выбранного участка определены перегоны и участки с наихудшими условиями для движения поездов, имеющие лимитирующие подъемы. Таким перегоном стал Артышта II – Аламбай. При расчетах принято начальная скорость 0 км/ч от станции Артышта II. В расчетах не учитывалась кратная тяга, подталкивание и применение бустерного режима.

Рассматриваемый участок Артышта II – Аламбай имеет протяженность 30 км. Он имеет 53 участка, 10 из которых являются спусками не большой величины, а 43 участка представляют собой подъемы, максимальный из которых равен значению 9,1 ‰. При проведении расчетов, а также для учета длины поезда при определении сил, действующих на поезд от уклонов, смежные участки близкие по крутизне и одинаковые по знаку элементов реального профиля пути спрямляют. Крутизна уклона определяется по формуле [2]:

$$i'_c = \frac{\sum_{j=1}^z i_j l_j}{\sum_{j=1}^z l_j} = \frac{1}{l_c} \sum_{j=1}^z i_j l_j = \frac{10^3}{l_c} (h_k - h_n) , \quad (1)$$

где z – количество спрямленных элементов;

i_j – крутизна j -го элемента, ‰;

l_j, l_c – длина j -го элемента и суммарная длина спрямленных элементов, м;

h_k, h_n – конечная и начальная высота над уровнем моря спрямленного участка, м.

При наличии кривых в плане элементов пути на спрямлённом участке их заменяют фиктивным подъёмом, крутизну которого находят с помощью выражения (2):

$$i''_c = \frac{1}{l_c} \sum_{j=1}^z w_{rj} l_{rj} , \quad (2)$$

где w_{rj} – удельное дополнительное сопротивление движению от j -й кривой, Н/кН;

l_{rj} – длина j -й кривой, м;

z – количество кривых на участке.

Расчетным подъемом при определении параметров электровоза для осуществления поездной работы является наиболее крутой и длинный на исследуемом участке подъем, на котором локомотив реализует расчетную касательную силу тяги при установившейся расчетной скорости движения. Этот подъем выбирают путем анализа спрямленного и приведенного профиля пути. На тяговом плече Артышта II – Тягун наиболее крутой подъем находится на первом перегоне до станции Аламбай, он имеет небольшую длину и перед ним расположен участок с легким профилем пути, позволяющие поезду подойти к данному подъему с большой скоростью, такой подъем нецелесообразно принимать в качестве расчетного, так как для его преодоления может быть использована запасенная поездом кинетическая энергия.

Во время движения по перегону, на поезд будут действовать различные силы. Силы сопротивления движению делят на основные, действующие при движении поезда всегда, и дополнительные, возникающие только при движении по отдельным участкам пути или в отдельные периоды времени. Важная составляющая, при определении тяговых возможностей двухсистемного электровоза 2ЭВ120, величина удельного основного сопротивления движению поезда w'_0 (3). Она определяется при расчетной скорости V в зависимости от типа пути по эмпирическим формулам, причем для электровоза находят удельное основное сопротивление движению под током, а для вагонов данную величину определяют в зависимости от типа вагонов, буксовых подшипников и массы, приходящейся на одну ось вагона [2]. Рельсовый путь перегона Артышта II – Аламбай имеет бесстыковой путь.

$$w'_0 = 1,9 + 8 \cdot 10^{-3} \cdot V + 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot V^2 \quad (3)$$

Примем в расчетах, что при экспериментальной поездке в состав поезда вошли самые многочисленные на сети ОАО «РЖД» грузовые четырехосные вагоны на подшипниках качения. Удельное основное сопротивление движению таких вагонов w''_c определяется с помощью выражения (4):

$$w''_c = 0,7 + \frac{3 + 0,1 \cdot V + 0,0025 \cdot V^2}{m_{в.о}}, \quad (4)$$

где $m_{в.о}$ – масса приходящиеся на ось вагона в груженом состоянии равная 22 т.

Одной из важнейших составляющих при проведении тяговых расчетов служит величина массы состава вагонов грузового поезда. Она рассчитывается (5) по разным критериям, исходя из полного использования мощности и тяговых качеств электровоза. Прежде всего рассчитывают наибольшую массу состава m_c по условиям сцепления колес электровоза массой $m_{л}$ с рельсами при движении в установившемся режиме тяги с расчетной скоростью V и касательной силой тяги $F_{к.р}$ на расчетном подъеме крутизной i_p .

$$m_c = \frac{F_{к.р} \cdot 10^3 - m_{л} g (w'_0 + i_p)}{g (w''_0 + i_p)}, \quad (5)$$

для усредненных неблагоприятных условий сцепления (влажные рельсы с применением песка по необходимости автоматически или вручную) ограничение по сцеплению для электровоза 2ЭВ120, при работе как на переменном, так и на постоянном токе, рекомендуется принимать с использованием формулы расчета коэффициента сцепления на ободу колесной пары (в среднем для электровоза) [2-4]:

$$\Psi_k = 0,31 + \frac{4,5}{50 + 6 \cdot V} - 0,0006 \cdot V \quad (6)$$

Данная формула дает величины коэффициента сцепления, по сравнению с Правилами тяговых расчетов для электровозов с коллекторными тяговыми двигателями и контакторным регулированием силы тяги:

- примерно на 12% выше чем электровозы переменного тока;
- примерно на 19% выше чем электровозы постоянного тока.

На конкретных участках эксплуатации электровоза 2ЭВ120 ограничение по сцеплению может отличаться от рекомендованного: выше в зависимости от характерных особых видов загрязнения рельсов (масляная пленка, угольная пыль и др) [3-4].

В тяговых расчетах рассматриваются только те слагаемые полных и удельных сил, приложенных к поезду, которые направлены вдоль линии движения поезда, так как именно они влияют на поступательное движение поезда по рельсовой колее. Удельная сила – это сила сопротивления каждой единицы веса поезда. Без значений удельных ускоряющих и замедляющих сил невозможно решить тормозную задачу. Эти силы характеризуют ускорение, а также замедление поезда в различных режимах движения на прямом горизонтальном участке пути, они используются при решении уравнения движения поезда. Удельную ускоряющую силу поезда массой m в режиме тяги определяют по формуле (7):

$$f_y = f_k - w_0 = \frac{F_k \cdot 10^3}{mg} - w_0, \quad (7)$$

где w_0 – основное удельное сопротивление движению всего поезда, кН (8);

F_k – значения силы тяги на ходовых позициях, кН;

m – масса поезда (сумма m_l и m_c).

$$w_0 = \frac{w'_0 \cdot m_l + w''_c \cdot m_c}{m_l + m_c}. \quad (8)$$

Расчет f_y целесообразно выполнить для ограничивающих линий и тяговых характеристик F_k на ходовых позициях регулирования напряжения тягового двигателя с интервалом скорости 5 – 10 км/ч, включая расчетную скорость V и скорости в других характерных точках [2].

Примем в расчетах, что удельная замедляющая сила движения поезда $f_{з.в}$ равна основному удельному сопротивлению движения поезда. Тогда удельную тормозную силу поезда при экстренном пневматическом торможении найдем по формуле (9):

$$b_{п.т} = 1000 \cdot \varphi_{к.р} \cdot \vartheta_p, \quad (9)$$

где $\varphi_{к.р}$ – расчетный коэффициент трения тормозных колодок;

ϑ_p – расчетный тормозной коэффициент.

При проведении комплекса приемочных и сертификационных испытаний двухсистемного электровоза 2ЭВ120 в октябре 2017 года, первыми, согласно графику, проводили тормозные испытания. Здесь разработчиков электровоза ожидали отрицательные результаты, в части несоответствия по нормативам тормозного пути экстренного торможения. На электровозе двойного питания «Князь Владимир» с момента его выпуска были применены чугунные колодки без гребней, ранее используемые на чехословацких электровозах серии ЧС. По окончанию первичных испытаний было выявлено, что фрикционный коэффициент примененных колодок не соответствует расчетной формуле, приведенной в Правилах тяговых расчетов для стандартных чугунных колодок с относительно низким содержанием фосфора. Это несоответствие привело к ошибке в проектных расчетах тормозной силы [3-4].

Для устранения выявленной проблемы, необходимо было повысить фрикционный коэффициент тормозных колодок за счет увеличения концентрации содержания фосфора. Опытная партия тормозных колодок была изготовлена на электровозоремонтном заводе в городе Ярославль. Новые колодки были сертифицированы, так как при повторных испытаниях они показали положительный результат. При проведении расчетов на исследуемом нами участке перегона Артышта II – Тягун значение $\varphi_{к.р}$ в зависимости от скорости движения для тормозных колодок с повышенным содержанием фосфора определяем с помощью выражения (10):

$$\varphi_{к.р} = 0,30 + \frac{V+100}{5 \cdot V+100}. \quad (10)$$

Наименьшее значение расчетного тормозного коэффициента φ_r согласно нормативам тормозных расчетов для грузовых груженых поездов с тормозными колодками имеющие повышенное содержание фосфора и максимальной скоростью движения на исследуемом участке до 80 км/ч принимают 0,33 [2].

Для решения тормозной задачи необходимо определить удельную замедляющую силу поезда в режиме служебного пневматического торможения (11):

$$f_{з.п.т} = w_0 + k_{\varphi_p} \cdot b_{п.т}, \quad (11)$$

где k_{φ_p} – степень использования расчетного тормозного коэффициента при графиковых остановках на отдельных пунктах и проверке действия автотормозов на эффективность для грузовых поездов равен 0,5. При регулировочном торможении для поддержания установленной скорости движения на спусках используется, как правило, 1-я ступень служебного торможения и степень использования расчетного тормозного коэффициента принимается для грузовых поездов на груженом и среднем режимах воздухораспределителей 0,3.

Во время движения поезда машинистом, на исследуемом перегоне где есть участки профиля пути, выраженные в виде спуска, может быть использован режим электрического торможения. На двухсистемном электровозе 2ЭВ120 применяется рекуперативное и реостатное электрическое торможение. На скорость движения данный режим влияет как удельная замедляющая сила при электрическом торможении, которое возможно определить по формуле (12):

$$f_{з.р} = b_k + w_0 = \frac{B_k}{mg} + w_0, \quad (12)$$

где b_k – удельная тормозная сила электрического тормоза электровоза, Н/кН.

Расчет $f_{з.р}$ выполняют для ограничивающих линий и тормозных характеристик электровоза на всех позициях регулирования с интервалом скорости 5 – 10 км/ч.

Важнейшим нормативом грузоперевозок является осуществление заявленного количественного показателя, выражающегося в совершенной тонно-километровой работе, выполнение которой зависит от поездных весовых норм. По результатам проведенных расчетов, мы делаем вывод, что электровоз двойного питания 2ЭВ120 «Князь Владимир» может выполнять поездную работу на тяговом плече Артышта II – Алтайская в соответствии установленной ранее нормой массы поезда приказом заместителя генерального директора ОАО «РЖД» – начальником Дирекции тяги З-СИБ ЦТ-108 от 30.05.2017 года «Об установлении норм масс и длин пассажирских и грузовых поездов на участках, обслуживаемых Западно-Сибирской дирекцией тяги» [5]. Двухсистемный электровоз 2ЭВ120 в составе поезда, масса которого превышает критическую для поездов с ведущими локомотивами ВЛ80С, и составляет от 4000 т до 5520 т, может безостановочно проследовать участки имеющие лимитирующие подъемы и требующие подталкивающие локомотивы. В трехсекционном исполнении электровоз 2ЭВ120 на данном тяговом плече может без подталкивания вести поезда массой до 7300 т. Когда как электровозы 1,5ВЛ80С без подталкивания имеют ограничения по массе поезда 5700 т.

На двухсистемном электровозе 2ЭВ120 установлен тяговый асинхронный привод. Считается, что он обеспечивает максимальные показатели сцепных свойств. На электровозе применяется поосное регулирование тяги и специальные алгоритмы управления, для повышения коэффициента сцепления. По результатам расчета коэффициент сцепления на тяговом плече Артышта II – Алтайская в расчетном режиме равен 0,294, при силе тяги в расчетном режиме 578 кН.

Список литературы

1. Бакланов, А. А. Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов [Текст] / А. А. Бакланов, Н. В. Есин, А. П. Шиляков // Материалы третьей всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов». – Омский государственный университет путей сообщения. – Омск, 2016. – С. 22 – 28.
2. Бакланов, А. А. Теория электрической тяги. Тяговые расчеты / А. А. Бакланов // Учебно-методическое пособие к курсовому и дипломному проектированию. – Омский государственный университет путей сообщения. – Омск, 2015. – С. 40.
3. Опытные рейсы электровоза 2ЭВ120 // Локомотив – 2016. – № 7. – С. 39.
4. Покровский, С. В. Электровоз 2ЭВ120: Итоги испытаний / С. В. Покровский // Локомотив. – 2018. – № 2. – С. 33 – 36.
5. Валинский, О. С. Приказ 3-СИБ ЦТ-108 «Об установлении норм масс и длин пассажирских и грузовых поездов на участках, обслуживаемых Западно-Сибирской дирекцией тяги» / Канцелярия начальника Дирекции тяги. – Москва ОАО «РЖД», 2017. – С. 54.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Доманов Кирилл Иванович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Инженер, аспирант кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» ОмГУПС.
Тел.: +7 (923) 671-56-33.
E-mail: domanov35@gmail.com

Истомин Станислав Геннадьевич

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) 37-60-82.
E-mail: istomin_sg@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Domanov Kirill Ivanovich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.
Engineer, Postgraduate of the department «Railway Rolling Stock» OSTU.
Phone: +7 (923) 671-56-33.
E-mail: domanov35@gmail.com

Istomin Stanislav Gennadyevich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.
Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the department «Railway Rolling Stock» OSTU.
Phone: +7 (3812) 37-60-82.
E-mail: istomin_sg@mail.ru

С. Г. Истомин, О. Д. Юрасов, А. А. Штраухман

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

**АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ
ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИГОРОДНЫХ
ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА СЕРИИ ЭД4М**

В статье на основе данных руководства по эксплуатации электропоезда постоянного тока серии ЭД4М выполнен анализ энергетических показателей вспомогательного оборудования данного электропоезда. По полученным данным выполнена приблизительная оценка потерь электроэнергии на собственные нужды.

Ключевые слова: электропоезд постоянного тока, расход на собственные нужды, отопление, система микроклимата.

Stanislav G. Istomin, Oleg D. Yurasov, Alexander A. Shtraukhman

¹Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

**ANALYSIS OF PARAMETERS AND OPERATING MODES OF THE
AUXILIARY EQUIPMENT OF FURNISHING ELECTRIC TRACKS OF THE
DIRECT CURRENT CURRENT OF ED4M SERIES**

In the article, on the basis of the data on the manual for the operation of a DC electric train of the ED4M series, the energy indicators of auxiliary equipment of this electric train are analyzed. According to the data obtained, an approximate estimate of energy losses for own needs was made.

Keywords: direct current train, consumption for own needs, heating, microclimate system.

Одной из приоритетных задач Энергетической стратегии холдинга «Российские железные дороги» на период до 2015 года и на перспективу до 2030 года является значительное повышение энергетической эффективности тяги поездов. Так, в целом по ОАО «РЖД» прогнозируемое снижение удельного расхода тягово-энергетических ресурсов на тягу поездов к уровню 2015 года должно составить к 2020 году – 2,5 - 4,4%, к 2030 году 8,0 - 9,0% [1].

На реализацию этой приоритетной задачи, в частности, направлены мероприятия по повышению энергетических характеристик электроподвижного

состава (ЭПС) при их создании на заводах-изготовителях или модернизации эксплуатируемых электропоездов за счет подбора оптимальных по энергопотреблению параметров вспомогательного электрооборудования и организации контроля и управления за его энергоэффективной работой.

В настоящее время в отчетных данных ОАО «РЖД» отсутствует информация о расходе электроэнергии на собственные нужды ЭПС, что препятствует проведению оценки энергетической эффективности работы вспомогательного оборудования и разработке рекомендаций по ее повышению.

В общем случае оценку потерь электроэнергии на собственные нужды ЭПС возможно выполнить на основе анализа параметров и режимов работы вспомогательного электрооборудования [2, 3], заявленных в руководствах по эксплуатации ЭПС [4].

Ниже в табл. 1 приводятся результаты подобного анализа, выполненного на примере электропоездов серии ЭД4М (10 вагонное исполнение) стандартной комплектации ранних выпусков.

Оценка потерь энергии на собственные нужды выполнялась в следующем порядке:

1. Определена часовая мощность вспомогательного оборудования.
2. Экспертно определены коэффициенты использования мощности оборудования собственных нужд электропоезда.
3. В соответствии с данными коэффициентами подсчитаны суммарные потери электроэнергии на собственные нужды, которые составили от 448,5 до 732,5 кВт·ч.
4. Рассчитана доля потерь на собственные нужды при условии работы электропоезда в режиме тяги в течение одного часа.

Исходя из того, что часовая мощность на валах тяговых двигателей электропоезда ЭД4М равна 4700 кВт, то доля потерь энергии на собственные нужды составляет от 9,54 % до 15,6% от расхода на тягу электропоезда.

Подобный метод оценки не позволяет достоверно определить значение и характер потребления электроэнергии вспомогательного оборудования электропоезда, так как в этом случае не учитываются реальные режимы работы оборудования в зависимости от типа профиля пути (равнинный или холмистый).

В связи с этим в дальнейших исследованиях целесообразно выполнить экспериментальную оценку потенциала сокращения потерь электроэнергии на собственные нужды электропоездов постоянного тока на различных типах профиля пути [5, 6].

Таблица 1

**Основные параметры и режимы работы вспомогательного оборудования
электропоезда постоянного тока серии ЭД4М**

Вид Оборудования	Номинальная мощность, кВт	Коэффицие нты использова ния оборудован ия	Общее количество на электропоезде, шт	Общая мощность, кВт
Электромашинный вспомогательный преобразователь НВП- 44/38 для питания	44	0,8	6	211
Установка кондиционирования воздуха УКВ-4,5-ЭД кабины машиниста	4,5	0,5	2	4,5
Отопительно- вентиляционная установка ОВПУ – 2500 – 3000/628 – 25 – XX головных и моторных вагонов	13,6 – 37,8	0,8	12	131 - 363
Агрегат моноблочный вентиляционно – отопительный АМВО ВЭ прицепных вагонов	16 - 24	0,8	8	102 – 154
Итого с учетом коэффициентов использования оборудования				448,5 – 732,5

В заключении стоит отметить, что при выполнении подобной оценки необходимо учесть наличие на более поздних сериях электропоездов серии ЭД4М вместо электромашинного преобразователя НВП-44/38 высоковольтного статического преобразователя серии ПСН80 У1 для питания цепей собственных нужд: освещения, управления, установок кондиционирования воздуха, компрессора, заряда аккумуляторной батареи и др. [7], который имеет целый ряд достоинств в сравнении с НВП-44/38.

Список литературы

1. Гапанович, В. А. Энергетическая стратегия и электрификация российских железных дорог [Текст] / В. А. Гапанович, С. Н. Епифанцев, В. А. Овсейчук. – М.: Эко–Пресс, 2012. – 196 с.
2. Истомин, С. Г. Анализ параметров и режимов работы вспомогательного оборудования пассажирских электровагонов постоянного тока

железных дорог [Текст] / С. Г. Истомин, О. Д. Юрасов, Д. А. Рахманов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: Материалы Девятой Международной науч.-практической конференции, 10 – 13 апреля 2018 г. Иркутск: в 2 т. – Иркутск: ИрГУПС, 2018. – Т.2. С 282 – 285.

3. Истомин, С. Г. Анализ параметров и режимов работы вспомогательного оборудования грузовых электровозов постоянного тока железных дорог [Текст] / С. Г. Истомин, О. Д. Юрасов, Д. А. Рахманов // Молодежь и XXI век - 2018: Материалы VIII Международной молодежной научной конференции: В 5 томах. Том. 5. Юго-Зап. гос. ун-т, Курск: ЗАО Университетская книга, 2018. С. 135 – 139.

4. Электропоезд ЭД4М модели 62-301: Руководство по эксплуатации: / ОАО «Демиховский машиностроительный завод. Демихово, 2008. 423 с.

5. Истомин, С. Г. К вопросу оценки энергетической эффективности вспомогательного оборудования электровозов серии 2ЭС6 [Текст] / С. Г. Истомин, Д. И. Бондаревский // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы научной конференции / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2017. – С. 151 – 156.

6. Истомин, С. Г. Применение регрессионных моделей для оценки энергетической эффективности вспомогательного оборудования электровозов серии 2ЭС6 [Текст] / С. Г. Истомин, Д. И. Бондаревский // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – №1 (33). – С. 22 – 30.

7. Трансконвертер [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://transconverter.ru/psn80y>, свободный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Истомин Станислав Геннадьевич

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: istomin_sg@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Istomin Stanislav Gennadevich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian
Federation.
Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor of the department «Rolling stock
electric railways» OSTU.
Phone: +7 (3812) 31-34-19
E-mail: istomin_sg@mail.ru

Юрасов Олег Дмитриевич

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
Email: yurasov_oleg@mail.ru

Yurasov Oleg Dmitrievich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian
Federation.
Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor of the department «Rolling stock
electric railways» OSTU.
Phone: +7 (3812) 31-34-19
Email: yurasov_oleg@mail.ru

Штраухман Александр Андреевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС)
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация
Студент ОмГУПС.
Тел.: +7 904-828-93-07
E-mail: shtraukhman.aa@gmail.com

Shtrauhman Alexander Andreevich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian
Federation.
Graduate student OSTU.
Phone: +7 904-828-93-07
E-mail: shtraukhman.aa@gmail.com

УДК 621.314

М. А. Кузнецова

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

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ
ТЯГОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В УСЛОВИЯХ ТЯЖЕЛОВЕСНОГО
ДВИЖЕНИЯ**

В статье рассматриваются методы диагностирования силовых трансформаторов. Показаны способы повышения эффективности методов диагностирования трансформаторов при увеличении пропускной способности поездов. Приводятся возможности акустических методов диагностирования.

Ключевые слова: Высоковольтные трансформаторы, тяговое электроснабжение, диагностирование, акустический метод, частичные разряды.

Maria A. Kuznetsova

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

**IMPROVING THE EFFICIENCY DIAGNOSIS METHODS OF TRACTION
TRANSFORMERS IN THE HEAVYWEIGHT MOVEMENT**

The article discusses the diagnosing power transformers methods. Shown are ways to increase the efficiency of diagnostic methods for transformers with increasing train capacity. The acoustic diagnostic methods possibilities are given.

Key words: High-voltage transformers, traction power supply, diagnostics, acoustic method, partial discharges.

Рост перевозочной нагрузки железнодорожного транспорта оказывает влияние на эксплуатационные характеристики оборудования тяговых подстанций, в первую очередь на силовые трансформаторы системы тягового электроснабжения. Большая часть которых, находится в работе более 20 лет, и продолжает использоваться при условии сохранения твердой изоляции.

На работу силовых трансформаторов тяговых подстанций особое влияние оказывает характер нагрузки. На железнодорожном транспорте она является непрерывно переменной из-за прохода разного количества и с различной массой поездов в разное время. При таком режиме эксплуатации в момент резких увеличений мощности, отдаваемой в контактную сеть, наиболее вероятно возникновение аварийных режимов.

Серьезные отказы подстанционного оборудования могут произойти мгновенно или развиваться постепенно в связи с процессами старения или развития дефектов. Например, при ближнем коротком замыкании происходит динамическое смещение обмоток силового трансформатора, межвитковое замыкание и повреждение трансформатора. Это мгновенный отказ, который диагностическими методами не предсказывается. По статистике таких случаев около 30%. Остальные отказы оборудования возникают в результате сравнительно медленных процессов, и эти аварии могут быть спрогнозированы (или диагностически выявлены) и предотвращены.

При пиковых нагрузках, близких к номинальным повышается температура обмоток трансформатора, что влечет за собой повышение температуры трансформатора в целом. Изменение температуры силового трансформатора тяговой подстанции при прохождении грузового состава, зарегистрированное при помощи тепловизора показано на рис. 1 [1].

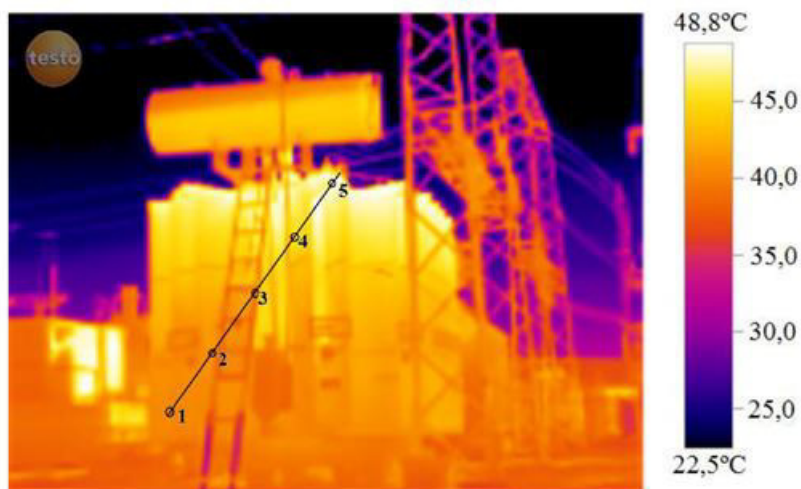


Рис. 1. Тепловой замер силового трансформатора тяговой подстанции при прохождении пассажирского состава

Работа при повышенных температурах приводит к деградации изоляционных свойств обмоток трансформаторов, развитию дефектов, сопровождающихся частичными разрядами.

Для силовых трансформаторов существуют более 40 методов контроля, часть из них являются обязательными. Каждый из методов в основном выявляет только определенные дефекты, но, как правило, различные способы диагностики взаимно дополняют друг друга. Наиболее общими методами являются тепловидение и хроматографический анализ растворенных газов (ХАРГ). С помощью тепловидения выявляются локальные нагревы поверхности (дефекты, выделяющие тепловую мощность более 1 Вт), поэтому этот способ незаменим для контроля контактных соединений и короткозамкнутых магнитных контуров. ХАРГ является чувствительным интегральным методом для определения локальных перегревов и разрядных процессов.

В последнее время всё более широкое распространение получает акустический способ обследования электрооборудования. Он основан на регистрации звуковых импульсов, возникающих при электрических разрядах, с помощью датчиков, устанавливаемых, к примеру, на стенку бака трансформатора. Современные ультразвуковые датчики позволяют регистрировать разрядные процессы с энергией до 10^{-7} Дж [2].

Этот способ диагностики отличается оперативностью и позволяет локализовать место дефекта, сопровождающегося разрядами. Кроме того, на основании акустического метода разработаны весьма экономичные системы мониторинга энергооборудования, популярные в энергетике России и за рубежом. В 2016 г. вышел новый международный стандарт МЭК (IEC/TS 62478(2016)) по измерению частичных разрядов акустическим методом [3]. В России проводятся работы по его внедрению.

В силовых трансформаторах, в элегазовых аппаратах источник электрического разряда может находиться в глубине оборудования. В этом случае ультразвук проходит ряд преград и значительно затухает.

Если у небольших маслonaполненных объектов величина акустического сигнала практически одинакова в любой точке поверхности, то при обследовании, например, силового трансформатора это отличие более значительно, и необходимо, перемещая датчик, искать область поверхности с максимальным сигналом [4].



Рис. 2. Установка преобразователей акустической эмиссии

По результатам диагностирования выдаются рекомендации по дальнейшей эксплуатации: без увеличения объема обследований, либо снижении их потенциалов; выполнение повторных измерений, при появлении дополнительных кластеров, либо увеличении потенциалов ранее обнаруженных; эксплуатация с увеличенным объемом обследований, если произошло значительное увеличение количества и потенциалов кластеров. В этом случае определяются конкретные виды дополнительных диагностических обследований. Пример установки датчиков на корпусе трансформатора приведен на рис. 2.

Тестовые измерения выполнялись при помощи акустико-эмиссионной системы типа СЦАД-16 [5]. При проведении эксперимента сравнивались два сигнала полученные акустическим методом, представленные на рис. 3. По каналу 12 был зарегистрированы частичные разряды, имеющие характерный затухающий сигнал. По каналу 13 показаны частичные разряды с наложением вибрации корпуса трансформатора при прохождении поезда в непосредственной близости от места установки трансформатора. Для более четкого разграничения сигналов были проанализированы спектры сигналов, представленные на рис. 4 и 5. Частичные разряды описываются более узким спектром, что говорит о подобию амплитудных и временных параметров сигналов. Вибрация корпуса трансформатора описывается более широким спектром с различными амплитудами и частотами их появления.

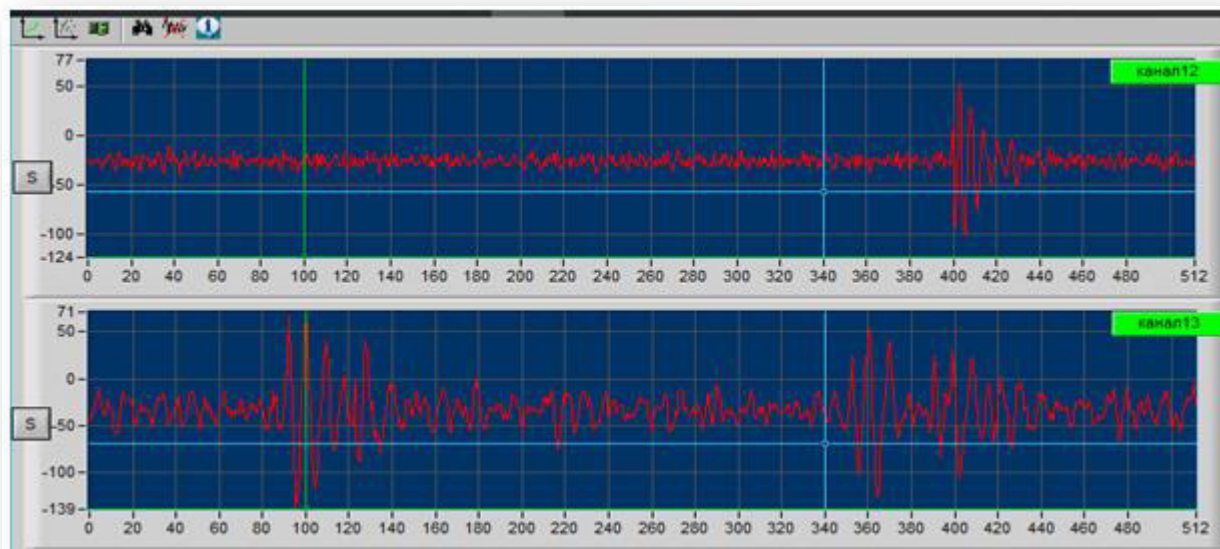


Рис. 3. Осциллограмма акустического сигнала ЧР и колебания от поезда

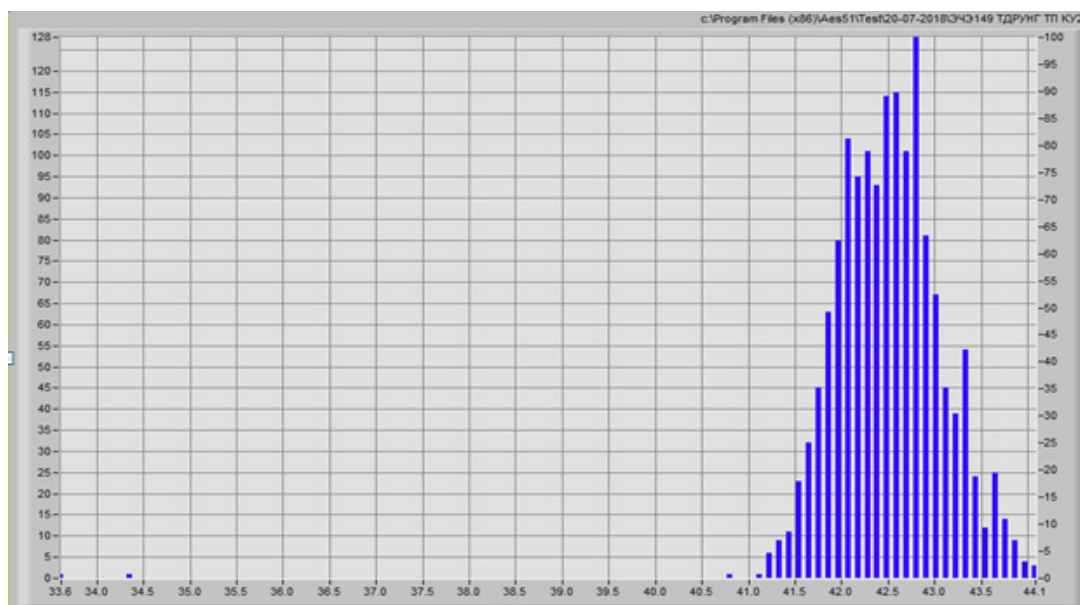


Рис. 4. Спектр сигнала при регистрации частичных разрядов

Характер нагрузки железнодорожного транспорта существенно отличается от характера нагрузки районных потребителей. На подстанциях системы тягового электроснабжения целесообразно применять метод акустической локализации частичных разрядов, получивший развитие в последнее время [6].

В работе представлены результаты экспериментальных исследований по обнаружению частичных разрядов на тяговых трансформаторах железных дорог постоянного тока. Приведены критерии, позволяющие повысить достоверность обнаружения частичных разрядов.

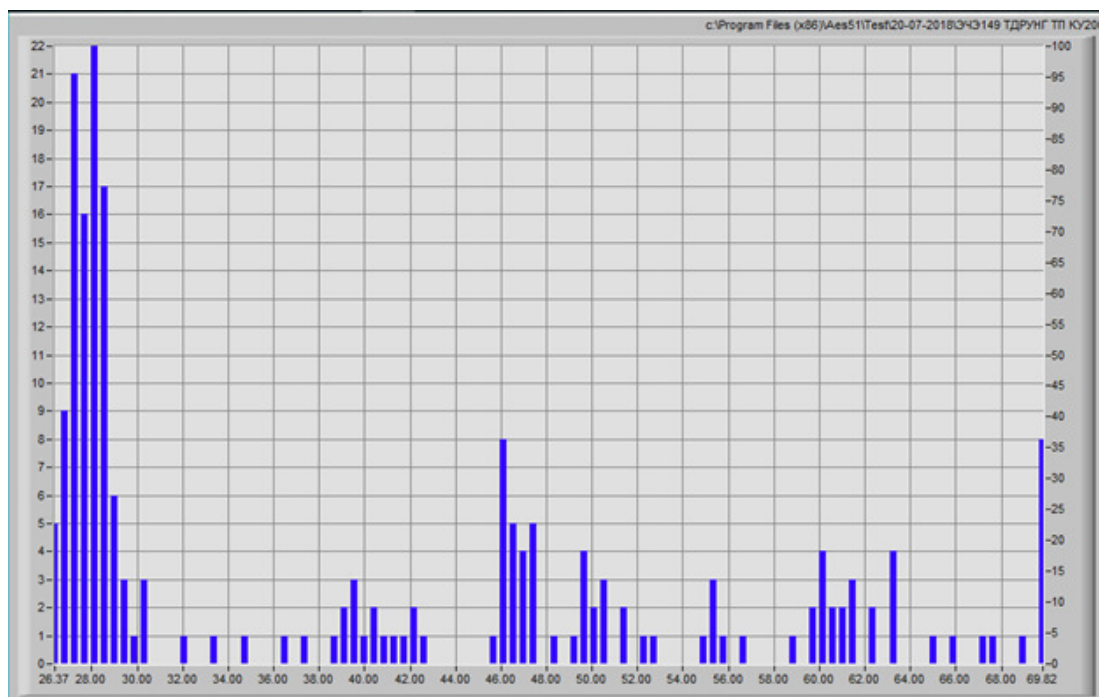


Рис. 5. Спектр сигнала при вибрации корпуса трансформатора

Дальнейшие исследования предполагается проводить с целью миниатюризации измерительной аппаратуры и дистанционной беспроводной регистрации сигналов, содержащих частичные разряды. Кроме того предполагается уточнить пороговые значения, соответствующие предаварийному состоянию высоковольтных трансформаторов для рекомендации вывода их в ремонт.

Список литературы

1. Луковенко, А. С. Повышение надежности оборудования электрических подстанций тягового электроснабжения при работе в критических режимах / А. С. Луковенко, Р. М. Христинич / ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2016. – №2. – С. 36 –40.
2. Диагностирование силовых трансформаторов методом локации частичных разрядов / А. С. Карандаев, С. А. Евдокимов и др. / Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. – 2012. – №1. – С. 105 –108.
3. IEC/TS 62478(2016) High voltage test techniques - Measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods. 76 p. (Стандарт МЭК Методы испытаний высоким напряжением. Измерение частичных разрядов электромагнитным и акустическим методами. Дата опубликования 29.08.2016.
4. Кузнецов, А. А. Повышение эффективности методов диагностирования тяговых трансформаторов при увеличении массы поездов / А. А. Кузнецов, А. Ю. Кузьменко, М. А. Кузнецова // Инновационные проекты и технологии в

образовании, промышленности и на транспорте: Материалы научной конференции / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2018. – С. 20 – 27.

5. Чуличков, А. И. Классификация акустических сигналов разрядных процессов в изоляции на основе формы их вейвлет-спектров / А.И. Чуличков, Н.Д. Цыбульская, С.К. Цветаев, О.С. Сурконт / Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. – 2009. – № 2. – С. 103-105.

6. Акустико-эмиссионный контроль железнодорожных конструкций / А. Н. Серьезнов, Л. Н. Степанова, В. В. Ивлиев, С. И. Кабанов, С. А. Бехер и др. – Новосибирск: Наука, – 2011. – 272 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Кузнецова Мария Андреевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» ОмГУПС.

Телефон: 8-983-116-10-84.

E-mail: kuznetcova994@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kuznetsova Maria Andreevna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Postgraduate of the department «Rolling stock of electric Railways» OSTU.

Phone: 8-983-116-10-84..

E-mail: kuznetcova994@gmail.com.

УДК 621.331: 629.4

М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм

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

ВЛИЯНИЕ МАССЫ СОСТАВОВ И РАЗМЕРОВ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ РЕКУПЕРАЦИИ НА УЧАСТКАХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В статье представлены подходы к оценке эффективности использования энергии рекуперации на участках железных дорог. На примере расчета эффективности использования энергии рекуперации для двухпутного участка переменного тока выполнен анализ влияния изменения средней массы грузовых поездов на участке и размеров движения поездов, на эффективность использования энергии рекуперации. В статье приведены результаты оценки баланса энергии рекуперации, включающего в себя потери энергии рекуперации и составляющие, используемые эффективно при различных вариантах организации движения поездов на действующем участке переменного тока.

Ключевые слова: энергетическая эффективность, система тягового электроснабжения, энергия рекуперации, эксплуатационные показатели, массы поездов, размеры движения поездов.

INFLUENCE OF TRAIN MASS AND SIZE OF THE TRAIN MOVEMENT ON EFFICIENCY OF ENERGY RECOVERY USE ON RAILROAD SECTIONS OF ALTERNATING CURRENT

The article presents approaches to the assessment of recovery energy efficiency in railway sections. Using the example of calculating the energy efficiency of recovery for a double-track section of alternating current, an analysis is made of the influence of changes in the average weight of freight trains at a site and the size of train traffic on the efficiency of energy recovery. The article presents the results of the assessment of the energy balance of recovery, which includes the loss of recovery energy and components that are used effectively in various variants of the organization of train movement in the current section of alternating current.

Keywords: energy efficiency, traction power supply system, energy recovery, operational indicators, masses of trains, the size of the trains movement.

Одной из приоритетных задач Энергетической стратегии холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года установлено повышение объема рекуперированной энергии и эффективности ее использования [1]. При этом согласно базовому сценарию развития объем рекуперированной энергии должен увеличиться к 2020 году на 15 % по отношению к факту 2015 года, а к 2030 году – на 27 %.

Учитывая, что с 2003 по 2015 годы объем рекуперированной энергии по счетчикам электроподвижного состава увеличился на 130 % [2], решение поставленной задачи без использования комплексного научно-обоснованного подхода представляется затруднительным.

Проведенные исследования показывают, что возврат энергии рекуперации в контактную сеть приводит к увеличению потерь электроэнергии в системы тягового электроснабжения (СТЭ) [3]. Соответственно, главным вопросом, на который необходимо ответить при решении задачи увеличения применения рекуперативного торможения, является вопрос оценки эффективности использования энергии рекуперации [4 – 7].

При принятии решения о внедрении организационно-технических мероприятий по увеличению применения рекуперативного торможения и повышению эффективности использования рекуперации необходимо учитывать окупаемость предлагаемых мероприятий [8].

Обобщенные методические подходы к определению эффективности использования энергии рекуперации подробно рассмотрены в [9].

Предложенная методика оценки эффективности использования энергии рекуперации предполагает распределение ее объемов по составляющим полезного потребления и потерь в устройствах СТЭ с использованием эмпирических коэффициентов, разработанных на основании специально созданной математической модели.

К составляющим энергии рекуперации, используемым эффективно, можно отнести:

- потребление на собственные нужды рекуперирующего электроподвижного состава (ЭПС);
- на тягу поездов другим ЭПС, находящимся на участке в режиме тяги;
- на собственные нужды тяговых подстанций, на нужды железнодорожных и сторонних потребителей, питающихся от электросетей районов электроснабжения и линий продольного электроснабжения;
- возврат энергии рекуперации в систему внешнего электроснабжения.

Потери энергии рекуперации складываются из потерь:

- в контактной сети при передаче энергии рекуперации от рекуперирующего ЭПС к другому ЭПС, находящемуся в режиме тяги, и к тяговым подстанциям;
- в выпрямительно-инверторных преобразователях (ВИП) и тяговых трансформаторах тяговых подстанций постоянного тока при возврате энергии рекуперации из контактной сети;
- в понижающих трансформаторах тяговых подстанций постоянного и переменного тока при передаче энергии рекуперации через них в систему внешнего электроснабжения.

Использование такого подхода позволяет оценивать текущий уровень эффективности использования энергии рекуперации, но и прогнозирования изменение уровня эффективности использования энергии рекуперации и подбирать оптимальные сочетания факторов для получения наименьших потерь энергии рекуперации и наибольшей энергоэффективности.

Это может быть достигнуто путем обоснованного изменения значений исходных параметров. Получаемый при этом баланс энергии рекуперации может быть представлен, например, в виде круговой диаграммы, отображающей все составляющие использования энергии рекуперации.

Рассмотрим пример расчета текущего уровня эффективности использования энергии рекуперации на двухпутном участке переменного тока и проанализируем изменение этого уровня в зависимости от изменения средней

массы составов по направлениям движения (четное, нечетное) и размеров движения грузовых поездов и общих на участке.

Необходимые для расчета исходные данные, характеризующие показатели работы участка и его параметры представлены в табл. 1. Данный участок характеризуется сложным профилем пути и значительным объемом удельной рекуперации, который составил за расчетный период $12,8 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/10^4 \text{ ткм}$ брутто. Средняя масса грузовых поездов на участке в нечетном направлении – 5300 т, средняя масса грузовых поездов на участке в четном направлении – 2100 т. Средняя техническая скорость в грузовом движении на участке 50,2 км/ч, участковая – 44,3 км/ч.

Таблица 1

Исходные данные для расчета эффективности использования энергии рекуперации на участке переменного тока

Наименование показателя		Значение
Объем рекуперации по всем сериям ЭПС, кВт·ч		134 828
Средняя масса грузовых поездов на участке в нечетном направлении, т		5 300
Средняя масса грузовых поездов на участке в четном направлении, т		2 100
Средняя техническая скорость в грузовом движении на участке, км/ч		50,2
Средняя участковая скорость в грузовом движении на участке, км/ч		44,3
Среднее количество пар поездов в сутки по всем видам движения на участке, пар		72
Среднее количество пар поездов в сутки в грузовом движении на участке, пар		60
Количество тяговых подстанций на участке		5
Средневзвешенное относительное сопротивление контактной подвески участка, о.е		1,88
Средневзвешенное относительное сопротивление контактной сети расчетного участка в зависимости от схем питания межподстанционных зон, о.е.		1,07
Средняя мощность потерь холостого хода понижающих трансформаторов тяговых подстанций участка, кВт		63
Средняя мощность потерь короткого замыкания понижающих трансформаторов тяговых подстанций участка, кВт		210
Линейный пробег электровозов, рекупирующих на расчетном участке, лок. км	ВЛ80 (всех индексов)	13 000
	ЭП1	2 800
Средняя техническая скорость электровозов, рекупирующих на расчетном участке, км/ч	ВЛ80 (всех индексов)	45,0
	ЭП1	65,0

В абсолютном выражении объем рекуперации, оценка эффективности использования которой выполнена в данном исследовании, составил 134 828 кВт·ч – это отчетная величина по электровозам ВЛ80СК, ВЛ80ТК и ЭП1 на рассматриваемом участке. На участке работают пять тяговых подстанций.

Объем энергии рекуперации, переданной ЭПС в контактную сеть, за вычетом ее потерь в контактной сети $B_{\text{рек.эф}}^{\text{КС}}$ составил 132 704 кВт·ч, а объем потерь энергии в контактной сети, таким образом – 2 124 кВт·ч.

Объем энергии рекуперации, возвращенной на тяговые подстанции расчетного участка $B_{\text{рек}}^{\text{ЭЧЭ}}$ составил 1 689 кВт·ч., а объем энергии рекуперации, потребленной другим ЭПС на участке $B_{\text{рек}}^{\text{ЭПС др}}$ – 131 015 кВт·ч. Баланс энергии рекуперации на расчетном участке представлен на рис. 1.

Объем энергии рекуперации, переданной ЭПС в контактную сеть и используемой эффективно, можно рассчитать как сумму $B_{\text{рек}}^{\text{ЭЧЭ}}$ и $B_{\text{рек}}^{\text{ЭПС др}}$.

Величина эффекта $\Theta_{\text{рек}}$ в приведенном примере составит 132 704 кВт·ч. Это позволяет утверждать, что 98,4 % всей рекуперированной энергии в данных эксплуатационных условиях используется эффективно.

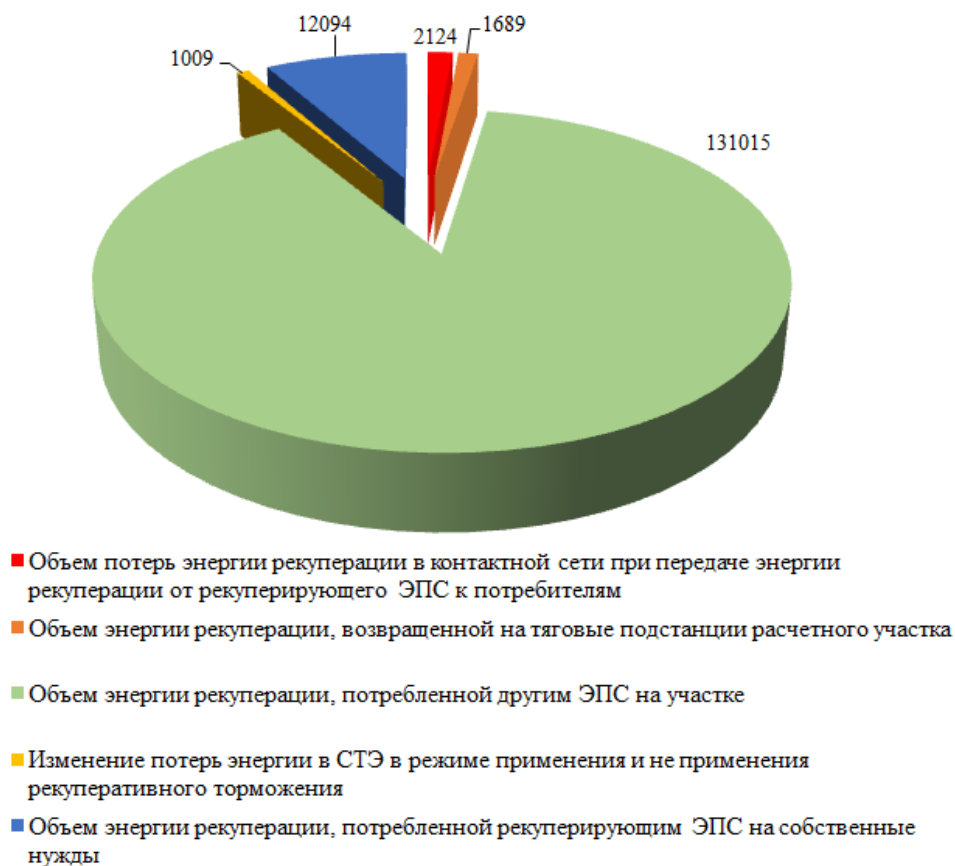


Рис. 1. Диаграмма баланса энергии рекуперации на расчетном участке

Как видно из рис. 1, предложенная методика позволяет также выполнить оценку изменения потерь энергии в СТЭ в режиме применения и неприменения рекуперативного торможения [2] и объема энергии рекуперации, потребленной рекуперирующим ЭПС на собственные нужды и не учтенной счетчиками рекуперации на ЭПС.

Первая величина $\Delta B_{\text{рек}}^{\text{СТЭ}}$ составила 1 009 кВт·ч сокращения потерь энергии в СТЭ.

Объем энергии рекуперации, потребленной рекуперирующим ЭПС на собственные нужды $B_{\text{рек}}^{\text{ЭПС с.н.}}$, составил 12 094 кВт·ч. С учетом данных величин экономия электроэнергии за счет применения рекуперативного торможения и использования энергии рекуперации на участке будет определяться суммой, кВт·ч:

$$\mathcal{E}_{\text{рек}}^{\text{Сумм}} = B_{\text{рек}}^{\text{ЭПС др.}} + B_{\text{рек}}^{\text{ЭЧЭ}} + \Delta B_{\text{рек}}^{\text{СТЭ}} + B_{\text{рек}}^{\text{ЭПС с.н.}}. \quad (1)$$

Значение суммарного эффекта $\mathcal{E}_{\text{рек}}^{\text{Сумм}}$ в данном случае составляет 145 807 кВт·ч.

Далее выполним анализ влияния изменения средних массы составов и размеров движения поездов на участке на величину изменения эффективности использования энергии рекуперации. С этой целью были выполнены расчеты и проанализированы зависимости изменения эффективности использования энергии рекуперации для четырех случаев:

а) изменения размеров движения грузовых поездов в диапазоне от 20 до 65 пар с постоянным общим количеством пар поездов на участке – равным 72 парам;

б) изменения общих размеров движения поездов в диапазоне от 47 до 92 пар с постоянной долей числа грузовых поездов в общих размерах движения – равной 0,83;

в) изменения средней массы составов в более легком направлении в диапазоне от 4 100 т до 6 800 т;

г) изменения средней массы составов в более сложном направлении в диапазоне от 1 500 т до 4 200 т.

Согласно методике, изложенной в [9], более легким направлением считается менее энергозатратное для движения поезда направление. В данном случае таковым является нечетное направление.

Динамика объемов энергии рекуперации, используемой эффективно, в зависимости от изменения размеров движения поездов представлена на рис. 2.

С увеличением размеров движения грузовых поездов с 20 до 65 пар в неизменных общих размерах движения поездов – 72 пары, происходит существенное увеличение потребления энергии рекуперации на собственные нужды рекуперирующего ЭПС с 6500 кВт·ч до 12793 кВт·ч (см. рис. 2, а). Увеличивается величина разницы потерь энергии в СТЭ для случаев применения и не применения рекуперации с величины 250 кВт·ч до 1116 кВт·ч. При этом величины использования энергии рекуперации на тягу другого ЭПС на участке и возврат энергии на тяговые подстанции суммарно практически не изменяется – с увеличением доли грузовых поездов меняется только их соотношение. Так, доля потребления энергии рекуперации другим ЭПС с увеличением доли грузовых поездов увеличивается, доля возврата на тяговые подстанции – уменьшается.

При этом величина суммарной экономии электроэнергии за счет применения рекуперативного торможения и использования энергии рекуперации с увеличением количества грузовых поездов в общих размерах движения на данном двухпутном участке переменного тока будет увеличиваться (на 6891 кВт·ч или на 4,93 % с увеличением числа пар грузовых поездов с 20 до 65).

При этом увеличение общих размеров движения поездов на данном участке (с 47 до 92 пар) приводит лишь к незначительному повышению объемов энергии рекуперации, формирующих экономию энергии на участке (см. рис. 2, б).

Зависимости объемов энергии рекуперации, используемой эффективно, от средних масс составов грузовых поездов можно проанализировать на основании таблицы изменения баланса энергии рекуперации для трех значений средней массы грузовых поездов в более легком направлении – 4100 т, 5600 т, 6800 т (табл. 2).

Из табл. 2 видно, что изменение средних масс грузовых поездов не приводит к существенному изменению потерь энергии в СТЭ в режиме применения и не применения рекуперации, объемов энергии рекуперации, потребленной на собственные нужды, и других составляющих эффективного использования энергии рекуперации.

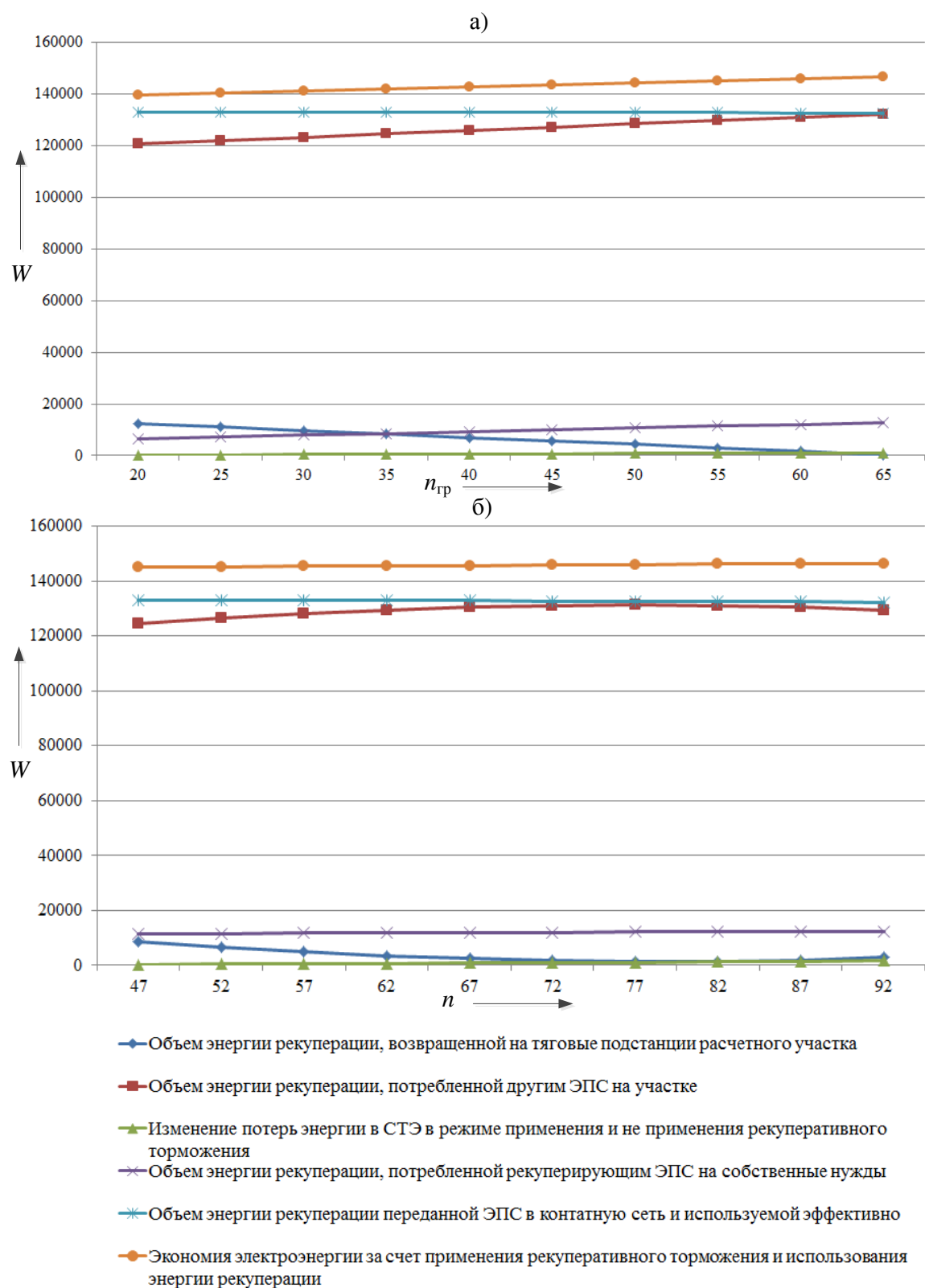


Рис. 2. Графики зависимости объемов энергии рекуперации, используемой эффективно и повышающей энергетическую эффективность тяги поездов:
 а) от изменения размеров движения поездов с постоянной долей числа грузовых поездов;
 б) от изменения размеров движения грузовых поездов с постоянным общим количеством пар поездов

Таблица 2

Результаты расчетов влияния изменения средней массы грузовых поездов в более легком направлении на расчетном участке переменного тока

Наименование показателя	Значение показателя, кВт·ч		
Средняя масса, т	4 100	5 600	6 800
Объем энергии рекуперации, переданной в контактную сеть	132 705	132 704	132 703
Объем потерь энергии рекуперации в контактной сети при передаче энергии рекуперации от рекупирующего ЭПС к потребителям	2 123	2 124	2 125
Объем энергии рекуперации, возвращенной на тяговые подстанции	3 595	1 548	2 330
Объем энергии рекуперации, потребленной другим ЭПС на участке	129 109	131 156	130 373
Изменение потерь энергии в СТЭ в режиме применения и не применения рекуперации	1 012	1 009	1 005
Объем энергии рекуперации, потребленной рекупирующим ЭПС на собственные нужды	11 845	12 156	12 405
Объем энергии рекуперации переданной ЭПС в контактную сеть и используемой эффективно	132 705	132 704	132 703
Экономия электроэнергии за счет применения рекуперативного торможения и использования энергии рекуперации	145 562	145 868	146 113

Данные примеры показывают возможности предлагаемого метода оценки эффективности использования энергии рекуперации. Положенный в основу методики расчетно-аналитический подход эффективен при необходимости планирования изменений параметров работы участка и улучшения эксплуатационных показателей работы участка при отсутствии возможности проведения синхронных измерений процессов токопотребления на тяговых подстанциях и ЭПС. С помощью данного подхода становится возможным оценить влияние изменения важных эксплуатационных показателей участка на эффективность использования энергии рекуперации.

Список литературы

1. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года. Москва, 2016. 76 с.
2. Черемисин, В. Т. Основные положения методики оценки эффективности использования энергии рекуперации / В. Т. Черемисин,

М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 1. (65). – С. 114 - 120.

3. Вильгельм, А. С. Влияние энергии рекуперации на уровень потерь в системе тягового электроснабжения [Текст] / А. С. Вильгельм, М. М. Никифоров // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2017. – № 2(53). – С. 55 - 60.

4. Черемисин, В. Т. Методология оценки энергетической эффективности применения рекуперативного торможения и использования энергии рекуперации [Текст] / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм // Известия Транссиба. – 2016. – № 1(25). – С. 60 – 70.

5. Никифоров, М. М. Влияние параметров и режимов работы системы тягового электроснабжения на эффективность использования энергии рекуперации [Текст] / М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм, В. И. Гутников // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 1 (29). – С. 74 – 83.

6. Черемисин, В. Т. Методика оценки использования энергии рекуперации [Текст] / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм // Мир транспорта / Московский гос. ун-т путей сообщения Императора Николая II. – Москва. – 2018. – № 1(74). – С. 34 - 45.

7. Никифоров, М. М. Расчет эффективности использования энергии рекуперации на однопутных и двухпутных участках железных дорог постоянного и переменного тока [Текст] / М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм // Вестник транспорта Поволжья. – Самара. – 2018. – № 2 (68). – С. 28 - 37.

8. Черемисин, В. Т. Методика расчета экономической эффективности применения рекуперативного торможения и использования энергии рекуперации [Текст] / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм // Транспорт Урала. – 2016. – № 3(50). – С. 95 – 99.

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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.: (381-2) 44-39-23
E-mail: nikiforovmm@rambler.ru

Вильгельм Александр Сергеевич

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.: (381-2) 44-39-23
E-mail: vilgelm87@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikiforov Mikhail Mikhailovich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian
Federation.
Cand.Tech.Sci, deputy director, Research
Institute for Energy Efficiency in Railway
Transport OSTU.
Phone: (381-2) 44-39-23
E-mail: nikiforovmm@rambler.ru

Vilgelm Alexander Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian
Federation.
Candidate of Engineering Sciences, Associate
Professor of the department «Rolling stock of
electric railways» OSTU.
Phone: (3812) 44-39-23.
E-mail: vilgelm87@gmail.com

УДК 629.42:629.46

В. А. Михеев, О. С. Томилова, П. Б. Сергеев

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

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТЯГОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА В ГРУЗОВОМ ДВИЖЕНИИ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ ПОЛУВАГОНОВ

В статье рассмотрен вопрос влияния инновационных вагонов на укрупненные показатели высокопроизводительного использования тягового подвижного состава в грузовом движении. Сформированы комплексные системы показателей эффективности инновационных вагонов, обеспечивающие совокупный мультипликативный эффект роста производительности тягового подвижного состава. Показаны результаты модельных расчетов изменения показателей производительности тягового подвижного состава в грузовом движении от эксплуатации инновационных полувагонов за один технологический цикл.

Ключевые слова: тяговый подвижной состав, инновационный полувагон, масса состава поезда, среднесуточный пробег локомотива, производительности подвижного состава.

INCREASE THE ROLLING STOCK PRODUCTIVITY IN THE CARGO MOVEMENT FOR THE ACCOUNT OF USE THE INNOVATION CARS

The article consider the question of the innovation cars influence on the enlarged indicators of high-performance use of the cargo movement rolling stock. Created the complex systems of freight rolling stock efficiency indicators of the innovation cars providing aggregate multiplicative effect of increase in productivity. Presents the results of model calculations of the rolling stock productivity indicators change from operation for one production cycle of innovation cars in the cargo movement.

Keywords: rolling stock, innovation cars, train mass, locomotive average daily run, rolling stock productivity.

Возрастающая грузонапряженность как на отдельных направлениях, так и в целом на железнодорожных линиях ОАО «РЖД» приводит к неизбежному исчерпанию резервов их пропускной способности. Имеются два пути решения этой проблемы: первый – ресурсоемкое развитие сети железнодорожных линий; второй – повышение производительности грузового подвижного состава [1]. Каждое направление имеет свои достоинства и недостатки, сильные и слабые стороны, при этом они вполне логично и эффективно могут дополнять друг друга и реализовываться совместно.

Ключевым условием успешного осуществления второго пути является внедрение не просто новой железнодорожной техники, а именно инновационной, обеспечивающей значительный рост эффективности и производительности тягового и нетягового подвижного состава при соблюдении действующих ограничений существующей инфраструктуры [2, 3]. Примером такого высокоэффективного решения, которое позволит в относительно небольшие сроки существенно повысить производительность железных дорог, может считаться применение инновационных грузовых вагонов [4]. Активное внедрение и широкая эксплуатация инновационных вагонов дает возможность производительного использования локомотивного и вагонного парков в грузовом движении при полной реализации всех потенциальных возможностей, предоставляемых инфраструктурой [5, 6].

Корпоративной системой стандартизации ОАО «РЖД» в стандарте «Вагоны грузовые инновационные. Правила оценки экономической эффективности» установлен перечень критериев отнесения грузовых вагонов к инновационным, который должен быть подтвержден в процессе эксплуатации [5, 6]. С позиции

данного стандарта инновационный вагон представляется носителем совокупности измеримых количественных и качественных показателей в абсолютном или относительном выражении (рис. 1).

С технической точки зрения, инновационный грузовой вагон – это грузовой вагон, позволяющие реализовать при массовом внедрении определенный технико-экономический эффект для всех участников технологического процесса перевозок в сравнении с массовым вагоном-аналогом, с учетом применения технических решений, отвечающих достигнутому уровню техники [5, 6].

Решение задачи повышения производительности подвижного состава за счет инновационных вагонов заключается в мультипликативном эффекте от снижения массы тары вагонов, увеличения вместимости кузова, расширения диапазонов допустимых осевых нагрузок и скоростей движения [7].



Рис. 1. Критерии инновационных грузовых вагонов

Кроме этого, увеличиваются межремонтные пробеги как вагонов в целом, так и их отдельного технологического оборудования, сокращаются отказы в эксплуатации, совершенствуются способы погрузки-выгрузки с соответствующим расширением номенклатуры перевозимых грузов. Масса тара снижается применением новых высокопрочных сталей, повышение вместимости достигается оригинальными конструктивными схемами с полным использованием габаритных возможностей, увеличение допускаемых осевых нагрузок и скоростей обеспечивается инновационными тележками [5, 6], эксплуатационная надежность закладывается современным научно-техническим обеспечением процессов создания и производства вагонных конструкций (рис. 2).



Рис. 2. Конструкционные преимущества инновационных вагонов

Увеличение фактической нормы загрузки инновационных вагонов, за счет увеличения объема кузова, позволяет повысить коэффициент использования вместимости и, как следствие, обеспечить рост статической нагрузки. Сниженная масса тара и оптимальная удельная грузоподъемность вагона формируют средний состав поезда [5].

Таким образом, увеличение массы состава грузового поезда образуется комплексной системой показателей эффективности инновационных вагонов [8, 9]:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_{\rightarrow min}^{\Pi} = \frac{V_{\Pi const}}{V_{\Pi \rightarrow max}^H}; \\ k_{\rightarrow max}^T = \frac{T_{const}}{T_{\rightarrow min}^H}; \\ p_o = \frac{P^H + T^H}{n} \leq p_o^{доп}; \\ q = \frac{P^H + T^H}{2L} \leq q^{доп}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где $k_{\rightarrow min}^{\Pi}$ – коэффициент соотношения использования вместимости инновационного вагона и вагона-аналога; $k_{\rightarrow max}^T$ – коэффициент соотношения массы тары инновационного вагона и вагона-аналога; $V_{\Pi const}$, $V_{\Pi \rightarrow max}^H$ – удельный погрузочный объем вагона-аналога и инновационного вагона

соответственно, $\text{м}^3/\text{т}$; T_{const} , $T_{\rightarrow min}^H$ – 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^H – 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 (1), направлен на обеспечение высокопроизводительной перевозки различных родов грузов в заданных объемах без высокзатратной и низкорентабельной модернизации существующей сети. Оптимизируемыми параметрами при этом выступают средний состав поезда и средняя статическая нагрузка, что обуславливается увеличением использования инновационного грузового вагона по мощности и грузоподъемности. С учетом роста осевых и погонных нагрузок, в пределах допустимых инфраструктурой значений, это может дать суммарный эффект в увеличении провозной способности от 6,5 % и выше [5, 6].

В результате получаем, что при заданной длине состава, например, до 1000 м можно набрать из инновационных вагонов поезд большего веса, чем из вагонов-аналогов [7]. При этом следует отметить, что инновационные вагоны имеют коэффициенты динамики до 1,5 раз меньше чем у вагонов-аналогов. В этом случае возможно одновременно увеличить и провозную способность, а следовательно и производительность локомотивов, и сохранить верхнее строение пути.

Ключевым фактором, оказывающим влияние на среднесуточный пробег локомотива является участковая скорость движения [8, 9].

На сегодняшний день средняя участковая скорость составляет 37,1 км/ч, в то время как техническая скорость – 46,3 км/ч [7]. Большая часть технических возможностей роста участковой скорости теряется из-за простоев и задержек поездов на станциях и перегонах, а также потерь времени от низкопроизводительных погрузочно-разгрузочных работ.

Сокращение производственного цикла инновационных вагонов в выражении (2) достигается за счет сокращения эксплуатационных отказов и связанных с ними задержек и простоев на станциях и перегонах, а также ускорением выполнения погрузочно-разгрузочных работ.

Вероятность эксплуатационного отказа или попадания инновационного вагона в ремонт, значительно снижается, соответственно снижаются вагоночасы простоев и задержек на перегонах. Более того, рост надежности влечет обоснованное увеличение гарантийного пробега и, как следствие, сокращение простоя на технических станциях [5, 6].

Ведущими научно-исследовательскими организациями, выполняющими разработки по созданию инновационных вагонных конструкций, создан значительный задел по ускорению выполнения операций погрузки и выгрузки [7]. Такие конструктивные решения, как подпружиненные запоры механизмов усиленных крышек люков, усиленные торцевые стены и верхняя обвязка боковых стен, гладкая обшивка повышенной прочности, промежуточные стойки переменной высоты сечения и продольные сплошные гофры увеличивают ресурс и обеспечивают лучшую и ускоренную погрузку-выгрузку различных родов грузов. Совокупный эффект в снижении вагоночасов простоя может достигать от 2,9 % и выше [5, 6].

В результате, увеличение участковой скорости образуется следующей комплексной системой показателей эффективности от использования инновационных вагонов [8, 9]:

$$\begin{cases} k_{\rightarrow max}^{\Delta V_y} = k_{\rightarrow I}^{V_y} \frac{V_T}{V_{доп}} \left(1 - \frac{V_{доп}}{V_{доп}^H} \right); \\ k_{\rightarrow I}^{V_y} = \frac{V_{y \rightarrow max}^H}{V_T}; \\ t_{гр}^H \leq t_{гр}; \\ p(t)^H \rightarrow 0,98, \end{cases} \quad (2)$$

где $k_{\rightarrow max}^{\Delta V_y}$ – коэффициент изменения участковой скорости; $k_{\rightarrow I}^{V_y}$ – коэффициент участковой скорости; $V_{y \rightarrow max}^H$, V_T – участковая и техническая скорость движения соответственно, км/ч; $V_{доп}$, $V_{доп}^H$ – допустимая скорость движения грузового поезда с вагонами-аналогами и инновационными вагонами соответственно, км/ч; $t_{гр}$, $t_{гр}^H$ – 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.

В результате действия систем комплексных показателей (1) и (2) повышается среднесуточная производительность тягового подвижного состава. Первая система (1) показывает эксплуатационный эффект от повышения веса поезда брутто, вторая (2) – от повышения среднесуточного пробега локомотива.

Модельные расчеты мультипликативного эффекта от эксплуатации инновационных полувагонов в грузовом движении за один технологический цикл представлены на рис. 3 [8, 9].

Таким образом, эксплуатация инновационных грузовых вагоны оказывает интенсивное влияние на формирование показателей производительной работы подвижного состава в грузовом движении в условиях существующей инфраструктуры. Фиксируемый модельными расчетами положительный эффект обеспечивается совокупным ростом массы состава поезда и увеличением среднесуточного пробега при совместным действием комплексных систем показателей эффективности инновационных вагонов, приведенных в выражениях (1) и (2). Итогом служит высокопроизводительное использование вагонного и локомотивного парков с сопутствующим ростом резервов провозной и пропускной способности сети железнодорожных линий ОАО «РЖД».

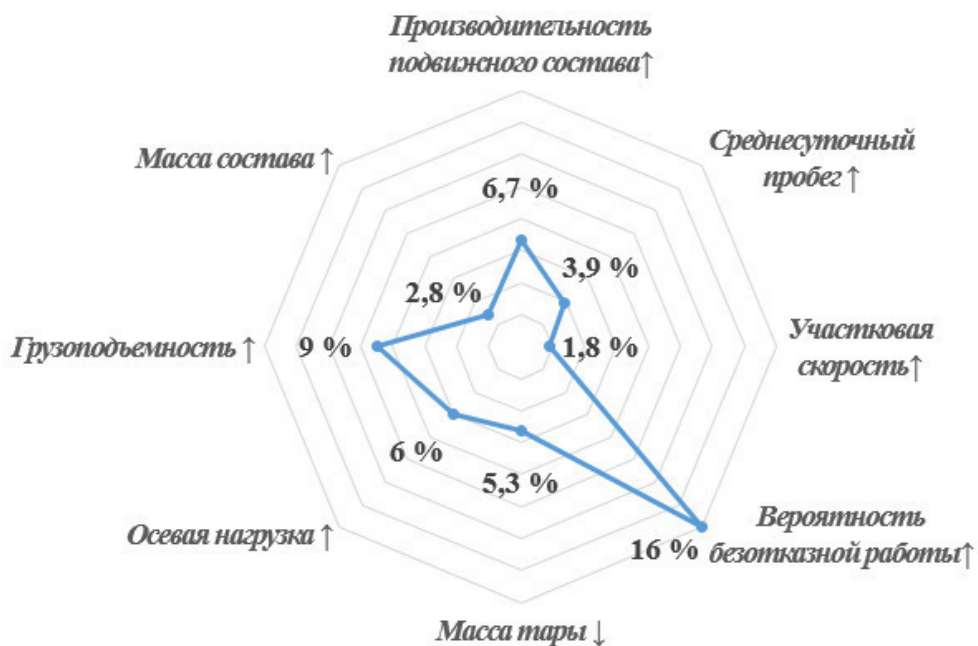


Рис. 3. Изменение показателей производительности подвижного состава

Список литературы

1. Лapidус, Б. М. Стратегические тренды развития железнодорожного транспорта [Текст] / Б.М. Лapidус // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2015. – № 6. – С. 2 – 9.
2. Коссов, В. С. Инновационное развитие подвижного состава в рамках реализации Стратегии холдинга «РЖД» [Текст] / В. С. Коссов // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2014. – № 5. – С. 53 – 60.
3. Гапанович, В. А. Инновационная деятельность Российских железных дорог [Текст] / В. А. Гапанович // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2014. – № 5. – С. 4 – 16.
4. Лapidус, Б. М. Повышение производительности и эффективности железнодорожного транспорта на инновационной основе [Текст] / Б. М. Лapidус // Вестник ВНИИЖТ. – 2012. – № 5. – С. 3 – 6.
5. Соколов, А. М. Научные основы создания и оценки эффективности внедрения инновационных вагонов [Текст] / А. М. Соколов // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2015. – № 2. – С. 1 – 12.
6. Лapidус, Б. М. Отраслевая технологическая платформа «высокопроизводительный грузовой подвижной состав» – путь к использованию резервов провозной способности железных дорог [Текст] / Б. М. Лapidус, А. М. Соколов // Вестник ВНИИЖТ. – 2011. – № 4. – С. 3 – 8.
7. Параметры инновационных вагонов и некоторые проблемы их реализации [Текст] / В. Н. Филиппов, А. В. Смольянинов, и др. // Транспорт Урала. – 2017. – Т. 52. – № 1. – С. 25 – 31.
8. Михеев, В. А. Влияние инновационных вагонов на производительность подвижного состава в грузовом движении [Текст] / В. А. Михеев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22. – № 7 (138). – С. 223 – 233.
9. Михеев, В. А. Инновационные вагоны в задаче повышения производительности подвижного состава в грузовом движении [Текст] / В. А. Михеев, П. Б. Сергеев, О. С. Томилова // Инновационные проекты и технологии в образовании и на транспорте: Материалы науч. конф. Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, – 2018. – С. 96 – 102.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Михеев Владислав Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

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

Тел.: (3812) 31-06-72.

E-mail: Micheev_V_A@mail.ru

Томилова Ольга Сергеевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

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

Тел.: (3812) 31-06-72.

E-mail: Motovilova@yandex.ru

Сергеев Павел Борисович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

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

Тел.: (3812) 31-06-72.

E-mail: Sergeevpb78@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mikheyev Vladislav Aleksandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the department «Cars and carriage economy» OSTU.

Tel.: (3812) 31-06-72.

E-mail: Micheev_V_A@mail.ru

Tomilova Olga Sergeyevna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the department «Cars and carriage economy» OSTU.

Tel.: (3812) 31-06-72.

E-mail: Motovilova@yandex.ru

Sergeyev Pavel Borisovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the department «Cars and carriage economy» OSTU.

Tel.: (3812) 31-06-72.

E-mail: Sergeevpb78@mail.ru

В. В. Шилер, А. В. Шилер

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

РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ С НЕЗАВИСИМЫМ ВРАЩЕНИЕМ КОЛЕС КОЛЕСНОЙ ПАРЫ

В статье представлено описание конструкции колесной пары, особенностью которой является независимое вращение всех поверхностей катания колес, контактирующих с рельсом. Приведены результаты статических и тормозных испытаний и опытных поездок по тракционным путям на испытательном кольце в Щербинке г. Москва.

Ключевые слова: независимое вращение, колесная пара, прочность, натурные испытания.

Valery V. Shiler, Alexander.V. Shiler

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

RESULTS OF NATURAL TESTS OF WHEELED PAIR WITH INDEPENDENT ROTATION OF WHEELS WHEELS

The article presents a description of the design of the wheel pair, which is characterized by the independent rotation of all the rolling surfaces of the wheels in contact with the rail. The results of static and brake tests and experimental trips along traction paths on a test ring in Shcherbinka, Moscow are given.

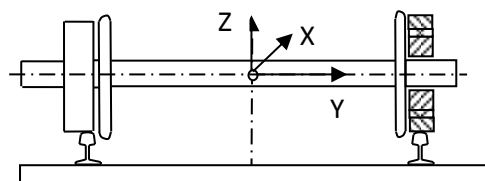
Keywords: independent rotation, wheel pair, strength, field tests.

Во всех известных конструкциях колесных пар внешняя опорная поверхность каждого из колес имеет многопрофильную конфигурацию в виде гребня и поверхности катания. Гребень и поверхность катания колеса являются поверхностями одной детали, но при этом диаметры окружностей вращения, образуемые их точками контактов с рельсом, имеют разные значения. Поэтому при контакте гребня с рельсом обе поверхности катятся по рельсу, которое сопровождается «паразитным» проскальзыванием.

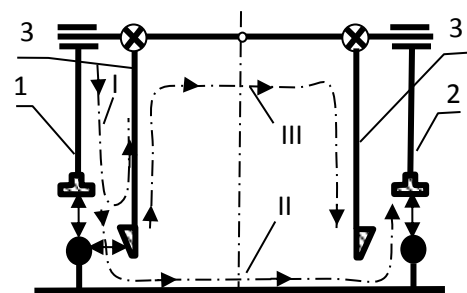
Авторами предложено новое конструктивное решение колесной пары, особенностью которой является независимое вращение всех поверхностей колес, контактирующих с рельсом. Результаты макетных и имитационных исследований предложенной конструкции подробно изложены [1, 2]. В данной работе конструкция опорного колеса выполнено цельнокатанным. На рис. 1 приведена кинематическая схема механических связей по координате вращения

между элементами колесной пары с независимым вращением колес. В системе «новая колесная пара – путь», как и в системе «стандартная колесная пара – путь», существуют три механических контура, основные размеры и масса элементов которых одинаковы. В системе «новая колесная пара – путь» первый (I) и второй (II) механические контуры являются разомкнутыми (рис. 1б) за счет установки опорных колес 2 на подшипниках (рис. 1а). Третий контур (III) образуют два гребневых диска 3 (рис. 1б), жестко посаженные на ось колесной пары по индикаторной диаграмме. Поскольку между рельсовой и колесной колеями предусмотрен гарантированный открытый зазор, то в контакте с рельсом может находиться только один из двух гребневых дисков, поэтому при любом положении колесной пары в рельсовой колее в системе «новая колесная пара – путь» все механические контуры (I, II и III) являются разомкнутыми (рис. 1б и 1в).

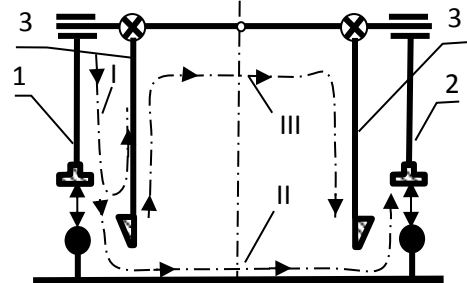
Применение такого технического решения позволило устранить механические связи в конструкции «новая колесная пара – путь», формирующие механизм автономной системы, который формировал извилистое движение колесной пары. Соответственно, устранены и сопутствующие этому движению процессы, например: влияние разности диаметров колес на положение колесной пары в рельсовой колее, «паразитное» проскальзывание колес по рельсам в процессе поступательного движения, как в прямых, так и в кривых участках пути, скольжение гребней по боковой поверхности рельсов. Все это позволило существенно снизить уровень контактных напряжений в системе «новое колесо – рельс», сопротивление движению, износ поверхностей катания колеса и рельсов, а также контактно-усталостные повреждения.



а – кинематическая схема конструкции колесной пары.



б – механические контуры при контактировании гребневого диска с рельсом.



в – механические контуры при отсутствии контактирования гребневого диска с рельсом.

Рис. 1. Схемы механических контуров системы «колесной пары – рельсовая колеея» с независимым вращением колес.

В 2016 – 2017 годах на Экспериментальном кольце ст. Щербинка были проведены натурные испытания новой конструкции колесной пары в тележке грузового вагона. Для натурных испытаний были изготовлены три экземпляра новой колесной пары с жесткой конструкцией опорного колеса – цельнокатанное колесо.

В соответствии со стандартной программой испытаний опытных конструкций колесных пар новая колесная пара была оборудована сертифицированными тензорезисторами типа ТКБ0-10-200(12), соединенными в измерительные схемы. На рис. 2 показана БКП № 3 на испытательном стенде. Вертикальная нагрузка к шейке оси прикладывалась ступенями в диапазоне от 30 до 200 кН, а горизонтальные силы к гребню направляющего колеса – в диапазоне 20-73кН. Время действия каждой ступени нагружения составляло 3-5 с. После приложения нагрузок производилось измерение расстояния между внутренними боковыми поверхностями направляющих колес.

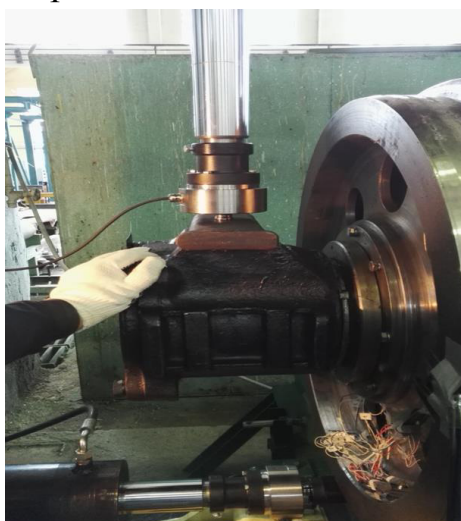


Рис. 2. Нагружение новой колесной пары на стенде испытательными нагрузками

Результаты измерений показывают, что расстояния между внутренними боковыми поверхностями направляющих колес не превышали 1,5 мм при допускаемом предельном значении 2,1 мм [2]. Остаточные деформации в конструкции отсутствовали. Напряжения в наиболее нагруженных зонах колес и оси составили 70-90 мПа при допускаемых 290 мПа. Прочностные характеристики представленных новых колесных пар соответствуют действующим в ОАО «РЖД» нормативам и позволяют установить их в тележке грузового вагона для проведения комплекса испытаний.

Стационарные тормозные испытания проведены на полувагоне, в первой тележке которого были установлены блочные колесные пары, вторая тележка оборудована стандартными колесными парами. Проверка действия

пневматического тормоза после полных служебных торможений с последующим отпуском проводилась на порожнем вагоне и с имитацией его полной загрузки. При этом определялись:

- время наполнения тормозного цилиндра до 95% и до максимальной создаваемой величины – $T_{0,95}$ и $T_{\max}$, соответственно;
- максимальные величины создаваемого давления в тормозном цилиндре – P ;
- выход штока тормозного цилиндра – $L_{\text{шт}}$;
- время отпуска тормозного цилиндра до 0,04 мПа – $T_{0,04}$;
- силы нажатия 4-х тормозных колодок на колеса с одной стороны вагона.

По результатам испытаний установлено, что измеренные действительные силы нажатия колодок на отдельной оси после обстукивания одинаковы. При давлении в тормозном цилиндре 0,13 мПа нажатие композиционной колодки на колесо составило 739 кгс. Расчетный коэффициент силы нажатия колодок порожнего вагона составил 0,2748 (при нормативном значении не менее 0,22). По результатам стационарных тормозных испытаний полувагон с первой тележкой с новыми колесными парами был допущен к ходовым испытаниям на путях Экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ».

Для оценки функциональных возможностей новой колесной пары по вписыванию в рельсовую колею в прямых и кривых участках и безопасности движения была выполнена их обкатки по тракционным путям. Две блочные колесные пары были установлены в тележке модели 18-2128 первой по ходу движения полувагона модели 12-296-01. Проведены регулировочные работы по установке колесных пар параллельно друг другу и измерения их геометрических параметров. Обкатка проведена с локомотивом ЧМЗ со скоростями до 20 км/ч. После обкатки признаки сдвига направляющих колес на оси отсутствовали. По результатам обкатки полувагон, в первой тележке которого установлены новые колесные пары, был допущен к дальнейшим испытаниям – поездкам по кольцевым путям со скоростями до 120 км/ч.

При подготовке к ходовым динамическим испытаниям производилась выкатка тележек, наклейка и сборка тензорезисторов в стандартные измерительные схемы с защитной их от влаги с сопротивлением изоляции не менее 50 МОм. Датчиками для измерений горизонтальных (рамных) сил и коэффициентов вертикальной динамики оборудовались боковые рамы обеих тележек.

Схемы для определения коэффициентов вертикальной динамики тарировались путем подъема кузова домкратами до полной обезгрузки тележек. Тарировка схемы для определения рамных сил осуществлялась путем приложения фиксированной горизонтальной нагрузки к боковинам рам тележек.

Выводы. Полученные результаты статических, тормозных и ходовых

испытаний на тракционных путях Экспериментального кольца ст. Щербинка АО «ВНИИЖТ» показали, что прочностные и тормозные показатели тележки опытного вагона с новыми колесными парами с жесткими опорными колесами, в порожнем и груженом режимах соответствуют требованиям «Норм расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм [3]» и РД 24.050.37 [4] и могут быть допущены для натурных динамических испытаний на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ».

Список литературы

1. Шилер, В. В. Новая конструкция колесной пары для рельсового транспорта / В. В. Шилер, А. В. Шилер // Журнал Техника железных дорог. М.: – 2012 – №4 (20) – С. 64 – 73.
2. Пат. 2207250 РФ. Колесо рельсового транспортного средства/ В. В. Шилер, А. В. Шилер, А. Н. Головаш, П. Н. Рубежанский. Опубл. в БИ. 2003. № 18.
3. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996 г. (с дополнениями и изменениями).
4. РД 24.050.37 95 «Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества» ГосНИИВ, 1995 г.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шилер Валерий Викторович

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. 8 913 626 87 53.
E-mail: shiler_val@inbox.ru

Шилер Александр Валерьевич

Омский государственный университет путей
сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Информационной
безопасности» ОмГУПС.
Тел. 8 913 969 90 99.
E-mail: shiler_alex@inbox.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Shiler Valery Viktorovich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian
Federation.
Candidate of Engineering Sciences, Associate
Professor of the department «The rolling stock
of the electric railroads» OSTU.
Тел. 8 913 626 87 53.
E-mail: shiler_val@inbox.ru

Shiler Alexander Valeryevich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian
Federation.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of department, Head of department «Information
security» OSTU.
Phone: 8 913 969 90 99.
E-mail: shiler_alex@inbox.ru

О. А Сидоров, В. В. Томилов, С. М. Утепбергенова

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

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЕВРОПОЛОЗОВ ТОКОПРИЕМНИКОВ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ТОКОСЪЕМА

В статье рассмотрены способы улучшения качества токосъема токоприемников высокоскоростного электроподвижного состава, эксплуатируемого на магистральных железных дорогах европейских стран. Определены принципы оценки качества работы токоприемников, определены аэродинамические характеристики европолоза SSS 87. Рассматриваются разносторонние способы улучшения тепловых и аэродинамических характеристик токоприемников.

Ключевые слова: токоприемник, полз, высокоскоростное движение, аэродинамические характеристики, токосъем.

Oleg A. Sidorov, Valery V. Tomilov, Sandugash M. Utepbergenova

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

RESEARCH OF THE DESIGN EUROPEAN PANTOGRAPH SLIDE ELECTRIC STOCK FOR IMPROVE THE QUALITY OF THE CURRENT COLLECTION

The article discusses ways to improve the quality of current collection of current collectors of high-speed electric rolling stock operated on the main European railways. The principles for assessing the quality of the work of current collectors are determined, the aerodynamic characteristics of the European pantograph slide SSS 87 are determined. Versatile ways of improving the thermal and aerodynamic characteristics of current collectors are considered.

Keywords: current collector, pantograph slide, high-speed running, aerodynamic characteristics, current collection.

Современная конструкция токоприёмника включает верхний узел (рис. 1) с алюминиевым каркасом, выполненным методом экструзии, и оснащенный вставкой типа Кашпировски. Вставка состоит из медной обоймы с запрессованным углеграфитом. Клиновидная накладка обеспечивает плавный переход с рога на вставку контактного провода, подхватываемого на воздушных стрелках. Стальная защитная накладка предохраняет алюминиевую конструкцию от пережогов. Такими европолозами постоянного тока оснащён высокоскоростной электроподвижной состав Сапсан.



Рис. 1. Конечно-элементная модель полоза токоприемника SSS 87, установленного на электропоезде Сапсан: 1 – медная обойма, 2 – импегнированный углеграфит, 3 – клиновидная накладка, 4 – защитная накладка, 5 – алюминиевый каркас, 6 – пластиковая заглушка

Алюминиевая конструкция полоза позволяет снизить его массу, обеспечить достаточную прочность и высокую проводимость. Конструкции современного европолоза приведены на рис. 2. Полая конструкция алюминиевой части состоит, как правило, из нескольких изолированных друг от друга полостей, закрытых по краям пластиковыми заглушками. Технологически данные полости не используются, за исключением специальных воздушных каналов, являющихся частью системы аварийного опускания токоприемника при срыве вставки или значительном повреждении полоза. В ряде случаев через центральную часть проходит болтовое крепление вставки, если последняя не приклеена технологически, как, например, вставка Кашпировски токоприемника SSS 87 Rus.

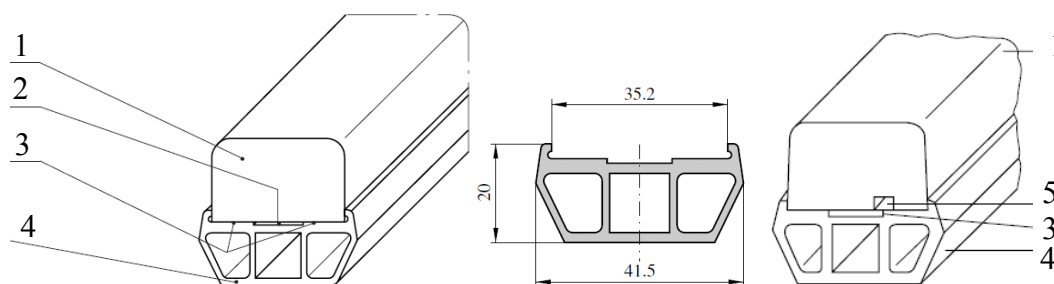


Рис. 2. Конструкции европолозов с противоаварийными каналами срыва вставки: 1 – вставка; 2 – электрическая контактная полоса; 3 – поверхность приклеивания; 4 – экструдированный полоз; 5 – воздушный канал

Скоростные электропоезда испытывают на себе воздействие аэродинамических сил, которые могут существенным образом влиять на технические характеристики электроподвижного состава (ЭПС) в целом и на работу его отдельных элементов, в том числе токоприемников, изменяя контактное нажатие между контактным проводом и ползцом токоприемника, что в большинстве случаев отрицательно сказывается на качестве токосъема.

Воздушные потоки являются естественной охлаждающей средой для нагреваемых частей токоприемника и в значительной степени его полза. Применение системы постоянного тягового тока приводит к значительному перегреву токосъемных и токопроводящих элементов. Предельные величины температуры нагрева материалов определяют максимальную величину тягового тока.

Для увеличения нагрузочной способности полза токоприемника возможно его охлаждение за счет применения дополнительных устройств.

Предлагаемые технические решения отличаются двумя подходами.

Первый – с применением оребрения (рис. 3), ребра во время движения полза токоприемника в воздушном потоке будут охлаждать полз. Распределение ребер (рис. 3а) возможно равномерное или дифференцированное (рис. 3б). При дифференцированном расположении ребер наиболее длинные ребра будут располагаться в центре полза, обеспечивая максимальный отвод тепла наиболее нагретой части через собственную поверхность пропорционально своей площади.

Второй подход предусматривает систему охлаждения воздуха через внутренние полости полза, к которым относятся вышеуказанные европейские полза профильной конструкции.

На рис. 4, представленный полз оснащен конфузуром и диффузором соответственно для приема и отвода воздушного потока. Преимуществом такой конструкции является то, что данный полз может двигаться в обе стороны соответственно обеспечивая одинаковое охлаждение.

На рис. 5 приведен полз с установкой конфузора по его центру. Преимуществом такой конструкции является то, что воздух подается в центральную часть, являющиеся наиболее нагретой, недостатком – отсутствие возможности работы в обоих направлениях.

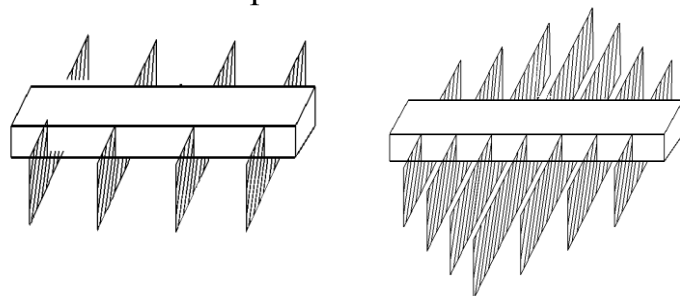


Рис. 3. Применение оребрения полза:
а – равномерное, б – дифференцированное

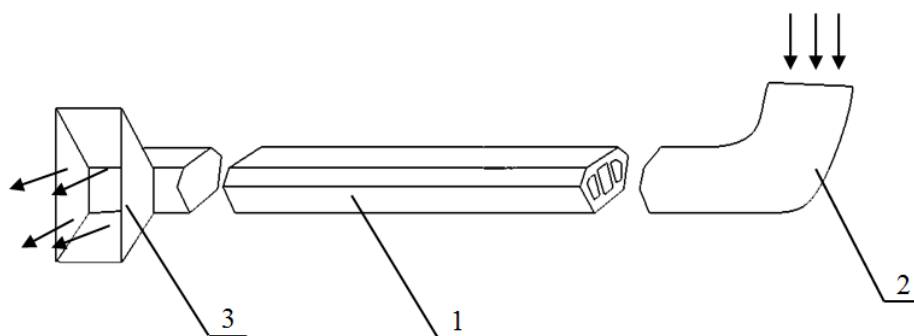


Рис. 4. Полоз (1) с конфузором (2) и диффузором (3)

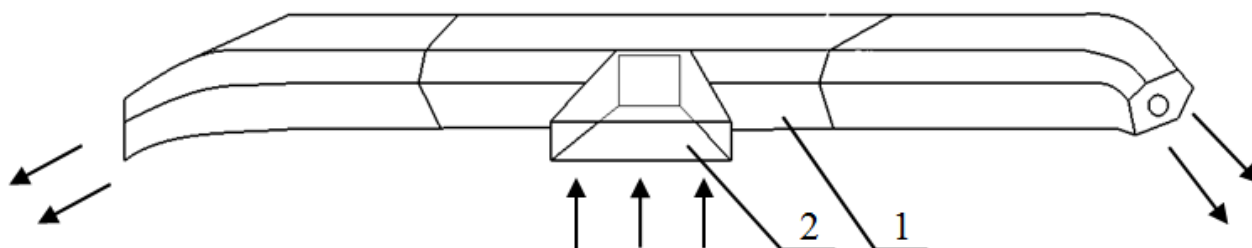


Рис. 5. Полоз (1) с установкой конфузора (2) в центральной части

Оценка работоспособности предлагаемых решений требует предварительного расчета. Необходимо отметить, устройства охлаждения увеличат массу полза, что скажется на инерционной составляющей динамической характеристики контактного нажатия. Геометрия такого полза, имеющего значительную несимметрию, изменит аэродинамические характеристики токоприемника и возможно потребует применение компенсирующих устройств.

В целях исследования тепловых и аэродинамических характеристик токоприемников широкое распространение получили технологии компьютерного моделирования, позволяющие моделировать и анализировать взаимодействие токоприемника ЭПС с контактным проводом (токопроводом) еще на этапе эскизного проектирования и не требующие значительных материальных затрат.

При проведении исследований применялась конечно-элементная модель европолза токоприемника SSS 87 (рис. 1), разработанная программным обеспечением SolidWorks. Результаты расчетов показывают, что применение конфузора является самым оптимальным вариантом охлаждения полза по сравнению с другими, отличающимися по конструкции типами ползов.

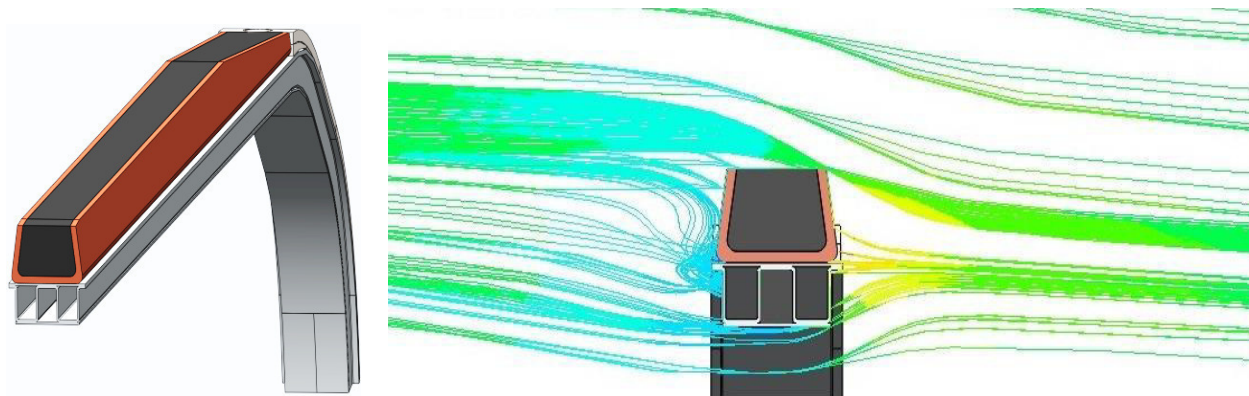


Рис. 6. Визуализация обтекания профиля полоза

На рис. 7 приведен спектр температуры типового полоза и с конфуззором при скорости 200 км/ч. Особенностью теплового расчета в SolidWorks является то, что источник тепла (полоз токоприемника) имеет бесконечную мощность. Снижения температуры полоза при расчетах не наблюдается. Однако для оценки эффективности систем охлаждения возможно использовать разницу температур в конкретных геометрических точках.

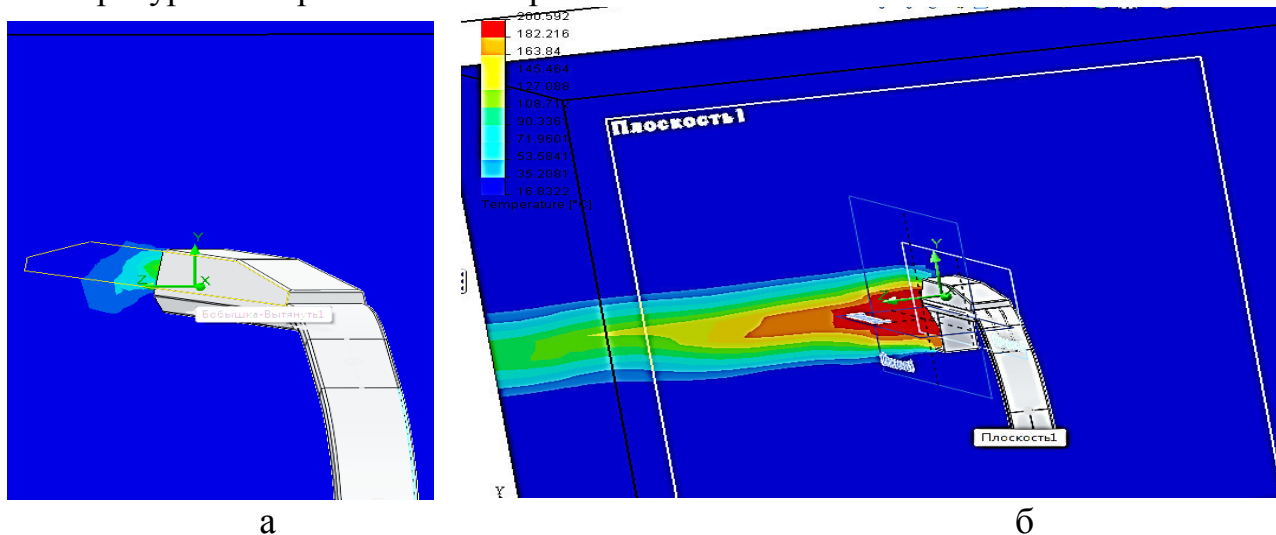


Рис. 7. Спектры температуры типового (а) и полоза с конфуззором (б) при скорости 200 км/ч

График зависимости разницы температур от скорости ветра для каждой конструкции полоза, приведенный на рис. 8, показывает, что полз с конфуззором превышает, по теплоотдаче, типовой полз на 65,5 %, а полз с ребром – на 42,7%. Конструкция с ребром на 22,8 % превышает по теплоотдаче типовой полз.

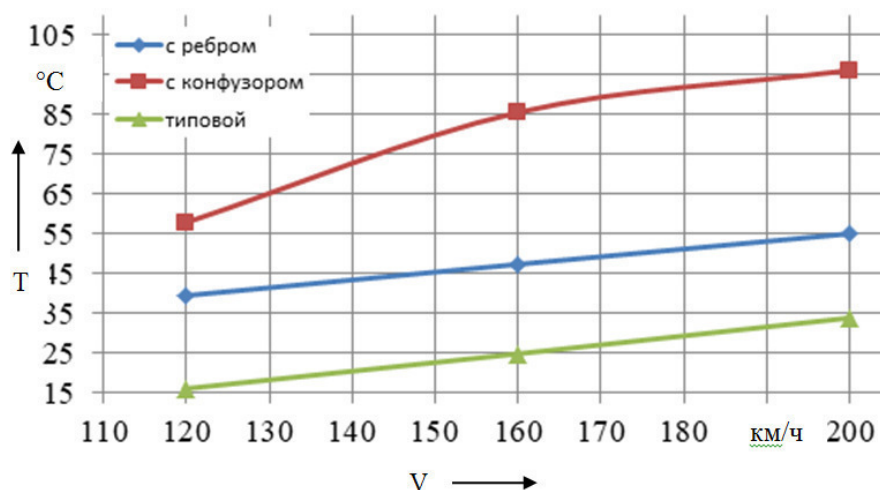


Рис. 8. График зависимости температуры от скорости ЭПС

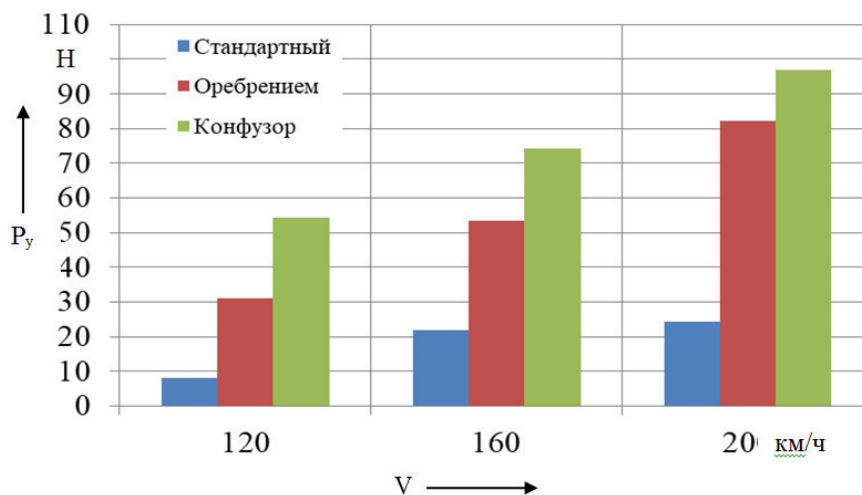


Рис. 9. График зависимости силы от скорости

Анализ полученных результатов зависимости силы сопротивления (F) от скорости движения ЭПС (V) показывает, что конфузор оказывает существенное сопротивление и увеличивает его по сравнению с типовой конструкцией на 74,97 %. Полоз с оперением превышает по сопротивлению типовой полз на 59,77 %.

Результаты расчетов требуют экспериментального подтверждения и возможно корректировки математических моделей. Необходимо оценить полученную зависимость между эффективностью системы охлаждения и ее влиянием на аэродинамическую характеристику токоприемника.

Список литературы

1. Сидоров, О. А. Особенности конструкции универсального измерительного токоприемника электроподвижного состава для исследования систем токосъема [Текст] / О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, М. В. Емельянов// Инновационный транспорт. – 2013. – № 2 (8). – С. 47-50.

2. Сидоров, О. А. Исследование температуры нагрева полоза токоприемника и способы ее снижения [Текст] / О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, В. В. Томилов: Научно-технический журнал // Известия Транссиба. – ОмГУПС. – Омск. – 2017. – № 4 (32). – С. 25 – 34.

3. Чепурко, А. Е. Моделирование аэродинамических воздействий на полоз токоприемников скоростного электрического транспорта [Текст] / А. Е. Чепурко, С. М. Утепбергенова // Интеллектуальная энергетика на транспорте и в промышленности: Материалы всероссийской молодежной научно-практической конференции с международным участием. – Омск: ОмГУПС, 2018. – С.113 – 119

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сидоров Олег Алексеевич

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

Томилов Валерий Викторович

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

Утепбергенова Сандугаш Мырзабековна

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

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Sidorov Oleg Alekseevich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.
Doctor of Technical Sciences, professor, head of the department «Power supply of railway transport» OSTU.
Phone: +7 (3812) 31-34-46
E-mail: egt@omgups.ru

Tomilov Valery Viktorovich

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

Utepbergenova Sandugash Myrzabekovna

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

А. В. Никонов, Е. К. Хусаинов

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

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РЕГУЛИРУЕМЫХ УСТРОЙСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА РАБОТУ ФАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЗАЩИТ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В последнее время на постах секционирования участков железных дорог электрифицированных на переменном токе напряжением 27,5 кВ широкое распространение нашли регулируемые устройства компенсации реактивной мощности. Некоторые из них являются инновационными и используются на сети дорог впервые. В связи с этим оценка влияния их работы на защиты тяговой сети ранее не рассматривалась. В статье представлен анализ влияния указанных выше устройств на работу фазочувствительных защит контактной сети. Обоснована необходимость выполнения оценки влияния именно СТАТКОМ на эти защиты. Представлены результаты расчета модуля и вектора суммарного сопротивления тяговой сети от места установки защит до точки короткого замыкания при включенном и отключенном СТАТКОМ. Расчеты выполнены в программном комплексе «КОРТЭС» для межподстанционной зоны Плотинная – Сузун с установленным на посту секционирования Тараданово СТАТКОМ. По результатам расчета сделаны выводы о целесообразности корректировки уставок при внедрении на постах секционирования регулируемых устройств компенсации реактивной мощности.

Ключевые слова: фазочувствительные защиты, направленная дистанционная защита, статический генератор реактивной мощности.

Andrew V. Nikonov, Yermek K. Khusainov

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

ESTIMATION OF THE EFFECT OF ADJUSTABLE DEVICES TO COMPENSATION OF REACTIVE POWER ON OPERATION OF PHASE SENSITIVE PROTECTION OF AC CONTACT NETWORK

Recently, adjustable posts for compensating reactive power have found widespread use at sections of sections of sections of railways electrified with alternating current of 27.5 kV. Some of them are innovative and used on the road network for the first time. In connection with this assessment of the impact of their work on the protection of the traction network has not previously been considered. The article presents an analysis of the effect of the above devices on the operation of phase-sensitive protection of the contact network. The necessity of an assessment of the impact of exactly STATCOM on these protections is substantiated. The results of the calculation of the module and the vector of the total resistance of the traction network from the place of installation of protection to the point of short circuit with the STATCOM on and off are presented. The calculations were carried out in the KORTES software complex for the Plotinnaya-Suzun interstation station zone with the STATCOM installed at the Taradanovo post. According to the results of the calculation, conclusions were drawn on the advisability of adjusting the settings when introducing adjustable devices for reactive power compensation at the partitioning posts.

Keywords: phase-sensitive protection, directional distance protection, static reactive power generator.

В последнее время на участках, электрифицированных на переменном токе, на постах секционирования (ПС) широкое распространение получили устройства поперечной компенсации реактивной мощности (КУ). Так в 2016, 2017 годах на Западно-Сибирской дороге внедрено пять устройств компенсации. Из них два статических тиристорных компенсатора СТК и три статических генератора реактивной мощности на базе преобразователя напряжения СТАТКОМ или static synchronous compensator (STATCOM). Основное назначение устройств повышение уровня напряжения в точке подключения с целью обеспечения тяжеловесного движения на участке Иртышское – Артышта II. Кроме этого устройства компенсируют реактивный ток и являются фильтрами высших гармонических составляющих тяговой нагрузки.

Все устройства имеют конструктивные и схемные особенности, а, следовательно, преимущества и недостатки. Так СТК выполнен на базе конденсаторных батарей. Его основным недостатком является значительное снижение мощности при глубокой просадке напряжения. То есть когда тяговая нагрузка возрастает – увеличивается необходимость в повышении уровня напряжения, однако, в такие моменты мощность устройства снижается пропорционально квадрату напряжения. В связи с этим в аварийных режимах при коротких замыканиях мощность СТК стремиться к нулю, следовательно, влияние на работу защит контактной сети будет незначительным.

СТАТКОМ является устройством на основе современной силовой электроники на базе биполярных IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors) транзисторов. Его ток может изменяться независимо от напряжения сети и регулироваться посредством широтно-импульсной модуляции. Более подробное описание принципов и алгоритма работы СТАТКОМ и СТК приведены в [2-5]. В отличие от СТК при глубоких просадках напряжения ток СТАТКОМ стабилизируется, и его мощность снижается значительно в меньшей степени. Таким образом, необходимо оценить его влияние при аварийных режимах работы тяговой сети.

Далее в статье рассматривается влияние СТАТКОМ на работу фазочувствительных защит контактной сети. Расчеты и выбор уставок выполняются в программном комплексе КОРТЭС.

Как известно функционально в КОРТЭС электрические расчеты выполняется только для нерегулируемых устройств компенсации реактивной мощности. Таким образом, чтобы учесть особенность СТАТКОМ номинальная мощность пересчитывается таким образом, чтобы в аварийном режиме его ток был близок к номинальному.

Формула для пересчета номинальной мощности СТАТКОМ представлена ниже, квар:

$$Q_{np} = \frac{U_n^2 \cdot Q_n}{U_{\min.kz}^2},$$

где U_n – номинальное напряжение в контактной сети, В;

$U_{\min.kz}$ – минимальное напряжение в точке включения СТАТКОМ при коротком замыкании в контактной сети в конце зоны, В;

Q_n – номинальная мощность СТАТКОМ, квар.

Обычно на тяговых подстанциях (ТПС) в качестве фазочувствительных защит присоединений питающих главные пути контактной сети используют дистанционные защиты I, II, III ступеней. На ПС – I, II. Основным регламентирующим документом при выборе уставок защит тяговой сети является Методика [1].

Наиболее чувствительной является III ступень дистанционной защиты и при отсутствии влияния СТАТКОМ на нее необходимость в рассмотрении влияния на другие ступени защит исчезнет. Наибольшее влияние на фазовый сдвиг при коротком замыкании работа СТАТКОМ окажет на III ступень защиты присоединения, питающего контактную сеть главного пути на ТПС при коротком замыкании вблизи смежной подстанции (см. рис. 1). Ниже выполнена оценка влияния СТАТКОМ на работу III ступени направленных дистанционных защит присоединений, питающих кантатную сеть главных путей перегона, на ТПС, для межподстанционной зоны Плотинная – Сузун Каменской дистанции электроснабжения с установленным на ПС Тараданово СТАТКОМ номинальной мощностью 10 Мвар.

Расчетная схема представлена на рис. 1. Расстояние между точкой включения реле и местом аварии 55,2 км. Участок двухпутный, схема питания узловая, тип подвески обоих путей ПБСМ-70+МФ-100, тип рельсов – Р65. На подстанциях установлены силовые трансформаторы типа ТДТНЖ-40000/220/35/27,5, напряжение на шинах ТПС 28,5 кВ.

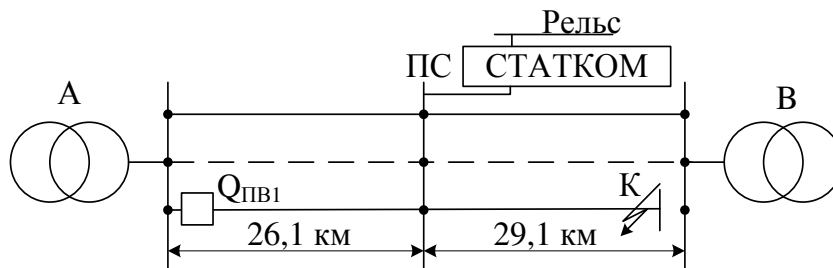


Рис. 1. Расчетная схема

Результаты расчета, а именно модули и векторы суммарного сопротивления тяговой сети от места установки реле до точки короткого замыкания для расчетной схемы для защит всех присоединений, питающих контактную сеть главных путей ТПС Сузун и Плотинная сведены в табл. 1.

В соответствии с [1] угловая характеристика на комплексной плоскости сопротивлений для третьей ступени защиты должна иметь форму сектора, как показано на рис. 2. Правый радиус должен быть под углом φ относительно оси активного сопротивления от 45 до 53 градусов, а левый устанавливается под углом от 110 до 120 градусов.

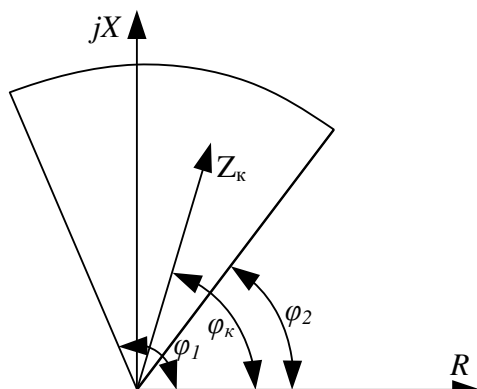


Рис. 2. Угловая характеристика третьей ступени дистанционной направленной защиты на комплексной плоскости

Таблица 1

Результаты расчета модуля и вектора суммарного сопротивления тяговой сети при включенном и отключенном СТАТКОМ

ЭЧЭ	№ присоединения	СТАТКОМ откл.		СТАТКОМ вкл.	
		Z_k , Ом	φ_k , град	Z_k , Ом	φ_k , град
Сузун	Ф1	45,9	66,4	48,3	63,7
	Ф2	45,1	66,4	50,4	63,4
Плотинная	Ф4	69,1	68,9	86,3	60,9
	Ф5	67,1	68,8	82,7	61,3

Работа СТАТКОМ приводит к уменьшению индуктивной составляющей суммарного сопротивления тяговой сети, в связи с этим его вектор отклоняется в сторону оси активного сопротивления, что подтверждается расчетами. По результатам анализа наибольшее отклонение вектора суммарного сопротивления тяговой сети на присоединении Ф4 ТПС Плотинная, оно составляет 11,6 %. Однако вектор сопротивления остается в границах сектора угловой характеристики представленной на рис. 2.

Выводы. Из результатов анализа следует, что СТАТКОМ также как и КУ, выполненные на базе конденсаторных батарей, не оказывает значительного влияния на работу третьей ступени направленной дистанционной защиты присоединений, питающих контактную сеть главных путей. Вектор суммарного сопротивления тяговой сети от места установки реле до точки короткого замыкания не выходит за границы сектора угловой характеристики представленной на рис. 2, необходимость рассматривать влияние СТАТКОМ на работу I и II ступеней направленной дистанционной защиты контактной сети исчезает.

Список литературы

1. СТО РЖД 07.021.4-2015 «Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки. Часть 4. Методика выбора уставок защит в системе тягового электроснабжения переменного тока».
2. Никонов, А. В. Эффективность регулируемых устройств поперечной компенсации реактивной мощности электрифицированных железных дорог / А. В. Никонов // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте: Материалы второй всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2016. – С. 241 – 248.
3. Черемисин, В. Т. Сравнение энергетических показателей регулируемых устройств поперечной компенсации реактивной мощности в условиях эксплуатации на постах секционирования / В. Т. Черемисин, А. В. Никонов // Транспорт Урала. – 2018. – №1. – С. 98 – 104.
4. Никонов, А. В. Оценка энергоэффективности статического тиристорного компенсатора / А. В. Никонов // Повышение энергетической эффективности наземных транспортных систем: Материалы научной конференции / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2016. – С. 98 – 104.
5. X.Y Zhou, H.F Wang, R.K Aggarwal, P. Beaumont. The impact of STATCOM on distance relay//Power Systems Computation Conference. – 2005. – С. 1-7.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Никонов Андрей 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.: +7-929-364-42-44.
E-mail: AndrewNikonov671@ gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikonov Andrey Viktorovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian
Federation.
Postgraduate of the department «Rolling Stock
of Electric Railways», OSTU.
Phone: +7-929-364-42-44.
E-mail: AndrewNikonov671@ gmail.com

Хусаинов Ермек Кенжебулатович
Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Аспирант кафедры «Электроснабжение
железнодорожного транспорта», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 44-27-61.
E-mail: husainov0908@rambler.ru

Khusainov Yermek Kenzhebulatovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian
Federation.
Postgraduate of the department «Electricity
supply of railway transport» OSTU.
Tel .: (3812) 44-27-61.
E-mail: husainov0908@rambler.ru

УДК 629.4.072.2

С. С. Саркенов

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

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ПИТАНИЯ МЕЖПОДСТАНЦИОННЫХ ЗОН НА ТЯГОВОЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕ В УСЛОВИЯХ ИНТЕРВАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ

В статье рассмотрены вопросы влияния режимов питания систем тягового электроснабжения на потери и расход электроэнергии на тягу поездов при пакетном графике движения. Так же рассмотрены частные случаи переключения межподстанционных зон.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, электроподвижной состав, график движения поездов, отдельный режим, консольный режим.

Sovetkhan S. Sarkenov

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

THE INFLUENCE OF DIETARY IPODSTATION ZONES IN THE TRACTION ELECTRICITY CONSUMPTION IN TERMS OF INTERSCALE ORGANIZATION OF MOVEMENT OF TRAINS

The article considers the issues of the influence of the power supply modes of the traction power supply systems on losses and power consumption for train traction in a batch schedule. Also considered are special cases of interstation switching zones.

Key words: traction power supply system, electric rolling stock, train schedule, separate mode, cantilever mode.

Электрифицированные железные дороги занимают особое место среди потребителей электроэнергии. Эта специфика определяется конфигурацией электрической сети, сооружаемой для электрификации железных дорог (географически протяженный потребитель с близкими значениями нагрузок тяговых подстанций, расположенных примерно на равных расстояниях одна от другой), и высокими требованиями к надежности электроснабжения [1]. По степени бесперебойности электроснабжения электрический транспорт относится к потребителям I категории, а потому схемы внешнего и внутреннего электроснабжения должны выбираться с учетом этого обстоятельства и отличаться довольно высокой надежностью [2]. Правильно выбранные схемы питания и секционирования контактной сети повышают ее надежность.

Расход и потери электроэнергии на тягу поездов напрямую зависят от схемы питания тяговой сети. При неизменных параметрах поезда и графика движения определим эту зависимость. В программном комплексе «КОРТЭС» были выбраны три схемы переключения систем тягового электроснабжения (нормальная, раздельная и консольная).

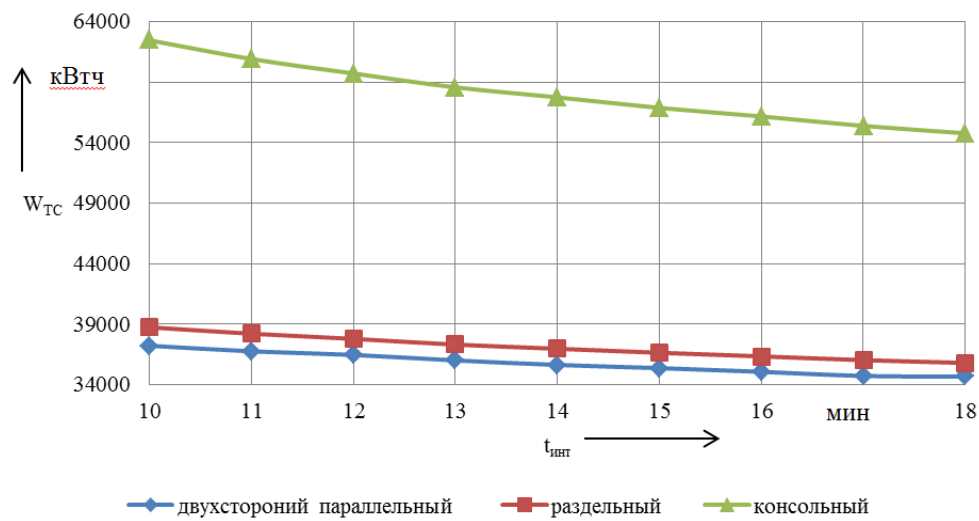
Раздельная схема питания обеспечивает питание каждого пути независимо друг от друга. В связи с этим уменьшается общее сечение контактной подвески, что приводит к увеличению потерь электрической энергии. В то же время надежность данной схемы питания выше по сравнению с другими схемами.

Консольная схема обеспечивает питание каждого пути отдельно от разных подстанций. При консольной схеме участок питается от одной подстанции с одной стороны. При повреждении питание снимается со всего участка [3].

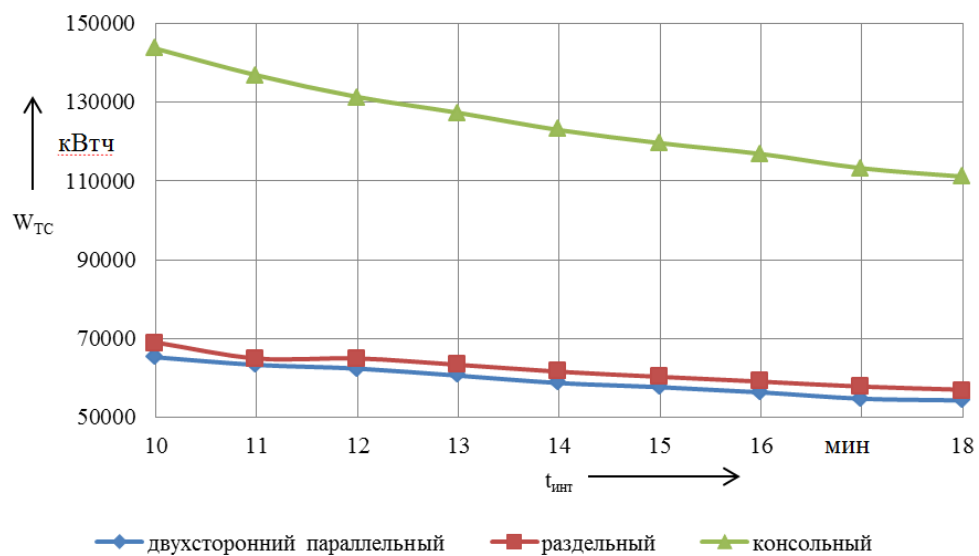
Электрические расчеты показали, что при консольной схеме питания идет большой нагрев контактной сети, и данная схема не позволяет провести поезда массами более 3000 тонн. Поэтому были рассмотрены массы в диапазоне от 1000 до 2000 тонн и нагрузка на ось в диапазоне от 5 до 20 т/ось. Потери электроэнергии в тяговой сети при массе 1000 тонн, нагрузке на ось 5 т/ось и количестве поездов в пакете равном трем для разных режимов питания тяговой сети представлены на рис. 1.а. На рис. 1.б. представлен расчет потерь при массе 2000 тонн и нагрузке 5 т/ось.

Контактная сеть электрического транспорта секционируется по своей длине, т.е. разделяется на ряд изолированных участков (секций) с помощью специальных

секционирующих устройств, которые обеспечивают беспрепятственный проход токоприемника ЭПС. Секционирование сети позволяет отключать в аварийных режимах и при проведении ремонтных работ только небольшой участок контактной сети, не нарушая электроснабжения всего пути[4].



а)



б)

Рис. 1. Потери электроэнергии в тяговой сети:
а) масса состава 1000 т; б) масса состава 2000 т

Выразим отношение потерь коэффициентом k .

$$k = \frac{W_i}{W_n}, \quad (1)$$

где W_i – потери при определенном режиме питания,
 W_n – потери при нормальном режиме питания.

При раздельном режиме $k = 1,03$, при консольном режиме $k = 1,69$. Анализ графиков показывает: при раздельном режиме потери в тяговой сети вырастают на 4 – 6%; при консольном режиме на 60 – 80% рис. 1.а. На рис. 1.б. потери при консольном режиме выше на 90 – 100 %.

Так как в условиях работы тягового электроснабжения необходимо отключение или переключения режимов питания одной или нескольких секций [5]. Целесообразно рассмотреть такие варианты режимов питания. На рис. 2 представлены фрагменты схем питания.

На выбранной межподстанциооной зоне проведем ряд переключений схемы и проведем электрический расчет на этой зоне и на всем участке. Полученные результаты потерь в тяговой сети при разных схемах соотнесем, между собой и выразим через коэффициент k табл.1.

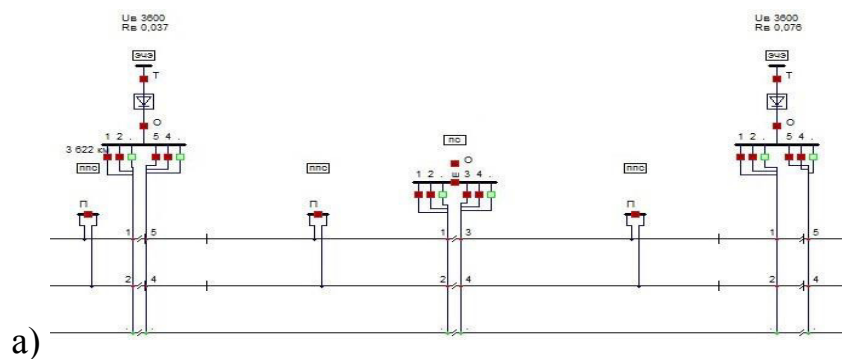
Таблица 1

Изменение коэффициента в зависимости от режима питания

Режим питания СТЭ	Масса состава 1000 т	Масса состава 2000 т
Раздельный	1,02 – 1,04	1,04 – 1,06
Консольный	1,67 – 1,84	1,96 – 2,01

При консольном режиме питания потери в тяговой сети значительно выше, в отличие от других режимов питания. Это обуславливается особенностью схемы. Так же при расчетах, в отдельных случаях, замечен значительный нагрев контактной сети, превышение ограничивающего тока в выпрямителях и минимальное напряжение в контактной сети [6].

Обратное отношение потерь показывает удельный вес данного межподстанционной зоны ко всему участку. Таким образом, зная потери на межподстанционной зоне и его удельный вес участке, можно прогнозировать потери на всем участке при переключении n -го количества межподстанционных зон.



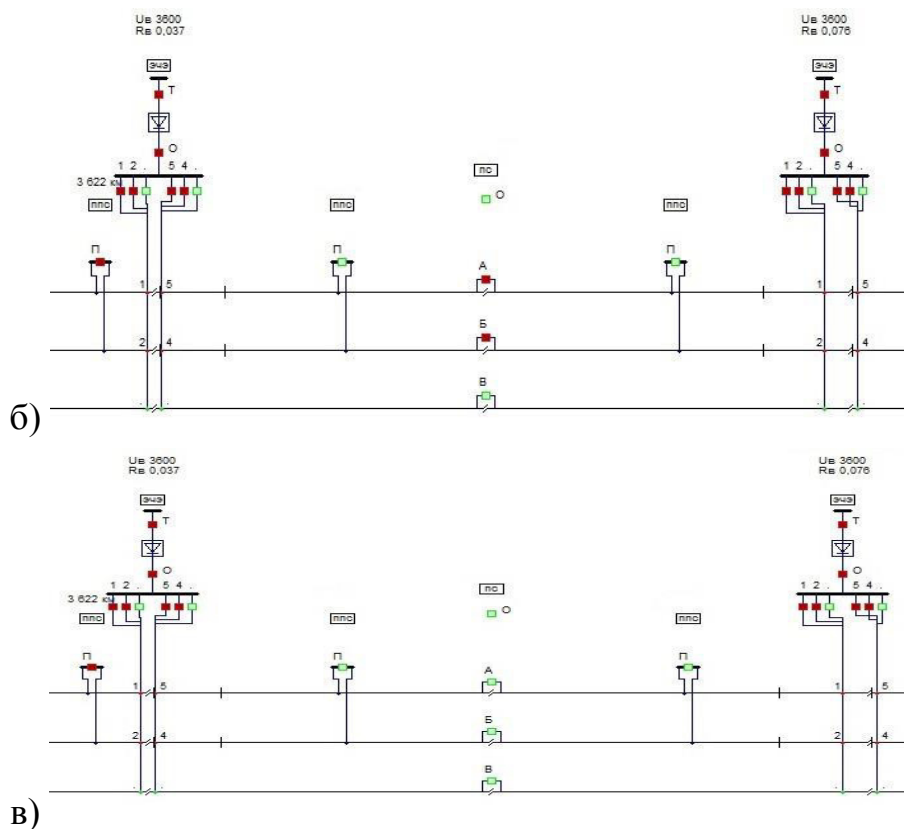


Рис. 2. Схема питания:

а) двухсторонняя параллельная; б) раздельная; в) консольная

По результатам расчета можно сделать следующие выводы:

при раздельной режиме питания систем тягового электроснабжения потери растут не более, чем на 2 – 6%;

при консольном режиме питания систем тягового электроснабжения потери растут на 60 – 80% при массе состава 1000 т;

при консольном режиме питания систем тягового электроснабжения потери растут на 90 – 100% при массе состава 2000 т;

при консольном режиме СТЭ идет значительный нагрев контактной сети, а так же превышение ограничивающего тока в выпрямителях и минимальное напряжение в контактной сети;

при консольном режиме СТЭ нет возможности проведения поездов массами более 3000 тонн;

в аварийных ситуациях и при проведении ремонтных работ на СТЭ возможны переключения межподстанционных зон, зная коэффициент отношения и удельный вес, можем прогнозировать потери при смешанных режимах.

Список литературы

1. ГОСТ 32895–2014 Электрификация и электроснабжение железных дорог. Термины и определения // Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2014. – 83 с.
2. Lilien J. L. Transport et Distribution de l'Energie Electrique / J. L. Lilien / Cours donné à l'Institut d'Electricité Montefiore Université de Liège [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tdee.ulg.ac.be/userfiles/file/intro.pdf>.
3. Clifford F Bonnett. Practical railway engineering. 2nd Edition. Imperial College Press – 2005. – 189 с.
4. Аржанников, Б. А. Усиление системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ при пропуске тяжеловесных поездов / Б. А. Аржанников, И. О. Набойченко // Транспорт Урала. – 2015. – № 2 (45). – С. 13 – 17.
5. Черемисин, В. Т. Методология оценки энергетической эффективности применения рекуперативного торможения и использования энергии рекуперации / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм // Известия Транссиба/Омский гос. ун-т путей сообщения. – 2016. – № 1 (25). – С. 60 – 70.
6. Вильгельм А. С., Незевак В. Л. Совершенствование способа определения энергетических показателей движения поезда и системы тягового электроснабжения // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. – 2016. – Т. 16. – № 3. – С. 32 – 40.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Саркенов Советхан Сатжанович
Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Аспирант кафедры «Подвижной состав
электрических железных дорог» ОмГУПС.
Тел.: +7 (923) 684-84-51.
E-mail: sovet201@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Sarkenov Sovetkhan Satzhanovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian
Federation.
Postgraduate of the department «Rolling stock
of electric railway» OSTU.
Phone: +7 (923) 684-84-51.
E-mail: sovet201@mail.ru

Д. В. Полевых

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

СНИЖЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ РЕАКТОРОВ В СОСТАВЕ СГЛАЖИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

В статье обоснована необходимость рассмотрения снижения индуктивности реакторов сглаживающих устройств тяговых подстанций. Проведен анализ схем сглаживающих устройств, эксплуатируемых на Западно-Сибирской железной дороге. Представлен расчет снижения потерь электроэнергии при переходе от трехблочной конструкции реактора к двухблочной.

Ключевые слова: сглаживающее устройство, реактор, потери, тяговые подстанции, высшие гармонические составляющие.

Dmitriy V. Polevykh

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

REDUCTION OF THE INDUCTIVITY OF REACTORS IN THE COMPOSITION OF SMOOTHING DEVICES OF TRACTION SUBSTATIONS

The article substantiates the need to consider reducing the inductance of reactors of smoothing devices of traction substations. The analysis of the smoothing devices operated on the West-Siberian railway has been carried out. The paper presents a calculation of the reduction of electric energy losses during the transition from a three-block reactor to a two-unit design.

Keywords: smoothing device, reactor, loss, traction substation, higher harmonic components.

Западно-Сибирская железная дорога электрифицирована преимущественно по системе тягового электроснабжения постоянного тока 3,3 кВ. Как известно, данная система является источником электромагнитного влияния и воздействует на смежные коммуникации, проложенные вдоль железнодорожных путей, вызывая появление в них опасных и мешающих напряжений.

Гармонический состав выпрямленного напряжения зависит от типа выпрямителя тяговой подстанции, нагрузочного режима и параметров питающей сети. Одним из основных инструментов, применяемых для снижения влияния тяговой сети постоянного тока на смежные устройства, являются сглаживающие устройства (СУ). СУ устанавливаются на тяговых подстанциях с целью снижения величины гармоник в кривой выпрямленного напряжения на выходе выпрямителей.

По сети железных дорог применяются однозвенные и двухзвенные СУ с различными наборами схем резонансных контуров. Один из вариантов схем СУ представлен на рис. 1. Схема включает в себя: реактор, представляющий собой катушку большой индуктивности, конденсаторную батарею и резонансные

контура, настроенные на гармоники 300, 600, 900 и 1200 Гц, оказывающие наибольшее влияние на смежные устройства системы тягового электроснабжения (рис. 1).

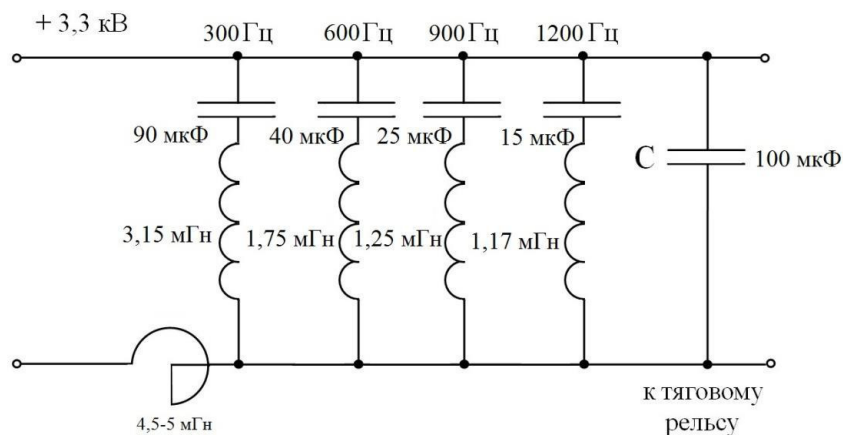


Рис. 1. Схема однозвенного СУ с резонансными контурами 300, 600, 900 и 1200 Гц.

Необходимо отметить, что реактор СУ также облегчает работу быстродействующих выключателей фидеров 3,3 кВ, ограничивая скорость нарастания тока короткого замыкания, протекающего в тяговой сети при аварийных режимах, что обеспечивает более надежную работу системы тягового электроснабжения.

В настоящее время на большинстве тяговых подстанций в эксплуатации находятся реакторы типа РБФА-У-3,3-6500/3250, представляющие собой 3 блока с параллельным соединением обмоток, общей индуктивностью 5 мГн и сопротивлением 6 мОм.

Такая величина индуктивности на момент электрификации (1940-1950г.) была обоснована необходимостью снижения влияния на воздушные линии связи и ограничением аварийных токов из-за низкой коммутационной способности быстродействующих выключателей того времени ВАБ-2, АБ-2/3, АБ-2/4. Современные быстродействующие выключатели, внедряемые сегодня на сети дорог, такие как ВАБ-206, способны отключать безындуктивные цепи с токами до 25 кА.

В связи с переходом на кабельные и волоконно-оптические линии связи изменились и требования к мешающему психофизическому напряжению ($U_{2пс}$). Если для воздушных линий связи допустимое значение психофизического напряжения не должно превышать 4 В, то для кабельных линий связи данное значение составляет 20 В. Кроме того, происходит перевод кодовой автоблокировки с несущей частотой 50 Гц на частоту 25 Гц, внедряется автоблокировка тональной частоты.

Помимо снижения индуктивности реактора, ещё одной возможностью оптимизировать схему СУ является исключение ряда резонансных контуров, ввиду того, что на многих участках шестипульсовые выпрямители заменены на двенадцатипульсовые, генерирующие меньший спектр высших гармоник.

Рассмотрим самый простой вариант перехода на пониженную индуктивность 3 мГн путём демонтажа одного блока реактора РБФА-У-3,3-6500/3250. Для этого воспользуемся данными автоматизированной системы коммерческого учета электроэнергии «Энергия-Альфа», выгрузив из неё значения токовых нагрузок тяговой подстанции Углерод, Новокузнецкой дистанции электроснабжения. Для данной подстанции характерны резкопеременные значения нагрузок, что видно из графика (рис. 2).

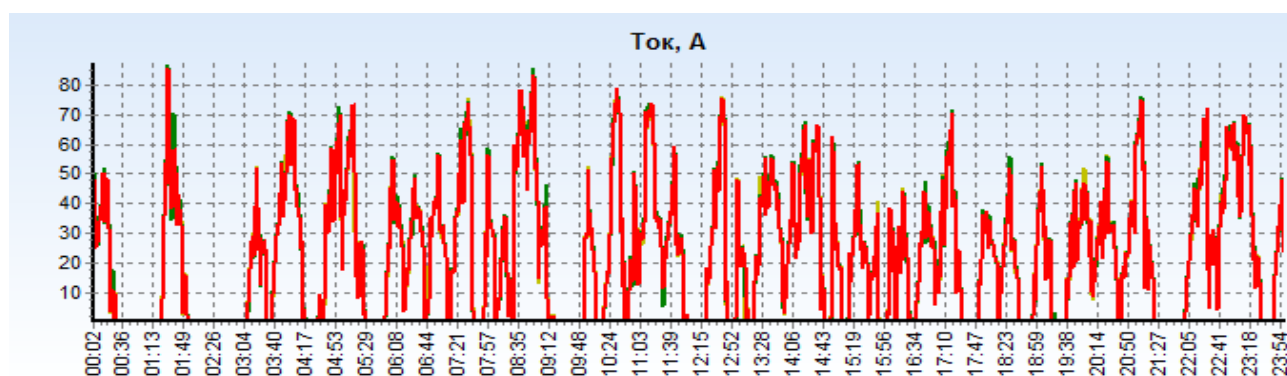


Рис. 2. Кривая тягового тока ТПС Углерод

Рассчитаем снижение потерь мощности от преобразования реактора:

$$\Delta P = I_{\text{ср}}^2 \cdot k_{\text{ф}}^2 (R_3 - R_2) = 818,6^2 \cdot 1,364^2 \cdot (0,006 - 0,004) = 3,04 \text{ кВт}$$

где ΔP – разница потерь мощности;

$I_{\text{ср}}$ – среднее значение тока взятое из АСКУЭ «Энергия-Альфа»;

R_3 и R_2 – сопротивление реактора с тремя и двумя блоками соответственно;

$k_{\text{ф}}$ – коэффициент формы тока (рассчитывается из данных АСКУЭ «Энергия-Альфа»;

Следовательно, снижение годовых потерь электроэнергии составит:

$$\Delta W_{\text{год}} = \Delta P \cdot T_{\text{г}} = 3,04 \cdot 8760 = 26\,630 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

где $T_{\text{г}}$ – количество часов в году.

Таким образом, при приблизительной стоимости электроэнергии 3 рубля за 1 кВт*ч для железнодорожного транспорта, годовые потери в денежном выражении при таком техническом решении снизятся на 80 тыс. руб. для одной подстанции.

Современные реакторы, предлагаемые рынком, имеют ещё более низкие значения сопротивлений и если рассматривать вариант полной замены

реакторов РБФА-У-3,3-6500/3250 на новые образцы, то потери электроэнергии снизятся в несколько раз.

Все перечисленные выше факты значительно меняют представления о принятом ранее значении индуктивности реактора. Очевидно, что в настоящее время индуктивность может быть значительно ниже 5 мГн, а схемы СУ – проще. Поэтому, следует провести комплексное исследование необходимой величины индуктивности реактора по сети железных дорог. С большой вероятностью мы получим более низкое и экономически целесообразное значение индуктивности, что позволит существенно снизить массогабаритные показатели реакторов, габариты помещений, и как следствие, капитальные затраты. А так как активное сопротивление реактора прямо пропорционально зависит от величины его индуктивности, то пропорционально снизятся потери электроэнергии и влияние поля рассеяния на соседнее оборудование, а также уменьшится величина накопленной энергии, которая оказывает негативное влияние при аварийных режимах работы системы 3,3 кВ. Помимо этого, упрощение схем СУ приведёт к дополнительному снижению потерь и затрат на их обслуживание.

Список литературы

1. Давыдова, И. К. Справочник по эксплуатации тяговых подстанций и постов секционирования / И. К. Давыдова, Б. И. Попов, В. М. Эрлих. – М.: Транспорт, 1978. – 416 с.
2. Трейвас, М. Д. Высшие гармонические выпрямленного напряжения и их снижение на тяговых подстанциях постоянного тока: Учебное пособие / М. Д. Трейвас. – М.: Транспорт, 1963. – 99 с.
3. Барковский, Б. С. Теория выпрямления тока на тяговых подстанциях: Методические указания / Б. С. Барковский. – Омский ин-т инж. ж. д. транспорта. – Омск, 1981. – 50 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Полевых Дмитрий Валерьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Аспирант кафедры «Подвижной состав
электрических железных дорог» ОмГУПС.
Тел.: +7-913-632-01-43.
E-mail: dima199100@ mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Polevykh Dmitriy Valeryevich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian
Federation.
Postgraduate of the department «Rolling Stock
of Electric Railways» OSTU.
Phone: +7-929-364-42-44.
E-mail: dima199100@ mail.ru

О. С. Аблялимов

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ТашИИТ),
г. Ташкент, Республика Узбекистан

ОЦЕНКА ТЯГОВОГО КАЧЕСТВА ПРОФИЛЯ ПУТИ УЧАСТКА КАТТАКУРГАН – НАВОИ ПРИ ДИЗЕЛЬНОЙ ТЯГЕ

Представлены результаты исследований по обоснованию тягового качества профиля пути перегонов холмисто - горного участка железной дороги в виде табличных данных и графических зависимостей, которые были получены при движении грузовых поездов без остановок и с остановками на промежуточных станциях, разъездах и отдельных пунктах.

Ключевые слова: исследование, грузовой поезд, тепловоз, железнодорожный путь, участок пути, эксплуатация, разъезд, тяговые качества, холмисто-горный, профиль пути. evaluation.

Oleg S. Ablyalimov

Tashkent institute of railway transport engineering (TashIET), Tashkent, the Republik of Uzbekistan

EVALUATION OF THE PROFILE TRACK OF TRACTIVE QUALITIES OF KATTAKURGAN – NAVOI DISTRICT BY DIESEL TRACTION

Introduced the results of the investigation of the justification of the tractive quality profile track stages on a hilly-mountainous direction of railway as in the form of tabular dates and graphic arts dependences, which have received by of the movement freight trains without stopping and with stopping on through stations, passing-tracks and division points.

Keywords: investigation, the freight train, the diesel locomotive, railway track, road section, exploitation, the stage, tractive qualities, hilly-mountainous, profile track.

Повышение эффективности использования магистрального (поездного) тягового дизельного подвижного состава в различных условиях эксплуатации на разных по трудности участках узбекских железных дорог является актуальной задачей АО «Ўзбекистон темир йўллари».

Увеличение с каждым годом интенсивности электрификации неэлектрифицированных участков узбекских железных дорог никак не ограничивает повышенной потребности в использовании локомотивов дизельной тяги для реализации железнодорожных перевозках грузов.

Согласно [1], железнодорожные участки пути классифицируются исходя из различного сочетания крутизны, протяжённости и последовательности расположения уклонов элементов профиля с учётом кривых и, в этой связи, разделяются на четыре разных типа: равнинный, холмистый, холмисто – горный и горный.

Данные исследования направлены на обоснование тяговых качеств и сложности профиля пути перегонов одного из реальных железнодорожных участков АО «Ўзбекистон темир йўллари», опираясь на кинематические и топливно – теплотехнические параметры основных показателей перевозочной работы магистральных (поездных) грузовых локомотивов.

Объектом исследования являются трёхсекционные магистральные (поездные) грузовые тепловозы серии *UzTE16M3* и спрямлённый профиль пути участка Каттакурган – Навои холмисто – горного направления Самарканд – Бухара АО «Ўзбекистон темир йўллари».

Предмет исследования составляют кинематические параметры движения грузового поезда минимальной массы состава и параметры показателей топливно - энергетической эффективности исследуемых тепловозов *UzTE16M3* на заданном участке Каттакурган – Навои Узбекской железной дороги.

Опираясь на [2] и результаты работ [3,4], методика исследования предусматривала анализ и оценку различных тяговых качеств (свойств) профиля пути по каждому перегону исследуемого участка Каттакурган - Навои при движении грузовых поездов без остановок и с остановками на промежуточных станциях, разъездах и отдельных пунктах.

Аналогично [5], за критерий такого анализа и оценки приняты приведённые значения общего (полного) и удельного расхода натурального дизельного топлива на тягу поездов, которые характеризуются распределённым на единицу времени работы силовых энергетических установок локомотива в режиме тяги количеством израсходованного натурального дизельного топлива тепловоза в реальных условиях эксплуатации.

В табл. 1 и табл. 2 приведены кинематические параметры движения грузового поезда с минимальной массой состава $Q=2500$ т (число осей $m=200$ осей) и расходы натурального дизельного топлива магистральными (поездными) грузовыми тепловозами *UzTE16M3* по каждому перегону заданного (принятого) холмисто – горного участка Каттакурган - Навои АО «Ўзбекистон темир йўллари».

Таблица 1

Кинематические параметры движения грузового поезда
по перегонам участка Каттакурган – Навои, движение без остановок

№ п/п	Перегоны	Техни- ческая скорость движения $V_{т}$, км/ч	Время хода поезда, мин		
			по перего- ну	в режиме	
				тяги	холостого хода и торможения
1	Каттакурган – Рзд. № 28	63,19	10,70	3,60	7,10
2	Рзд. № 28 - Зирабулак	71,52	14,80	8,30	6,50
3	Зирабулак - Зиёвуддин	82,24	19,50	5,90	13,60
4	Зиёвуддин - Навои	84,12	16,90	5,25	11,65
5	Каттакурган – Навои	76,90	61,90	23,05	38,85

Таблица 2

Расход натурального дизельного топлива тепловозами $U_zTE16M3$
при движении грузового поезда по участку Каттакурган – Навои

№ п/п	Перегоны	Общий по перегонам и участку E , кг Удельный по перегонам и участку e , кг/10 ⁴ ткм	
		без остановок	с остановками
1	Каттакурган – Рзд. № 28	86,44 / 30,68	113,41 / 40,26
2	Рзд. № 28 - Зирабулак	192,48 / 43,64	189,40 / 42,95
3	Зирабулак - Зиёвуддин	143,02 / 21,40	155,79 / 23,31
4	Зиёвуддин - Навои	126,95 / 21,43	177,88 / 30,03
5	Каттакурган – Навои	548,89 / 27,67	636,48 / 32,09

Распределение общего и удельного расхода натурального дизельного топлива магистральными (поездными) грузовыми тепловозами $U_zTE16M3$ по каждому из перегонов участка Каттакурган - Навои при движении грузовых поездов без остановок и с остановками на промежуточных станциях, разъездах и отдельных пунктах и показателя сложности (трудности) профиля пути этого участка показаны на рис. 1 и рис. 2. По оси ординат отложены следующие значения расхода натурального дизельного топлива: E , e – соответственно, общий

(полный) и удельный, а E^* , e^* – соответственно, приведённые общий (полный) и удельный. На рис. 1 и рис. 2 значения критерия оценки тягового качества и свойства профиля пути E^* и e^* по каждому перегону профиля пути увеличены, соответственно, в двенадцать и тридцать пять раз.

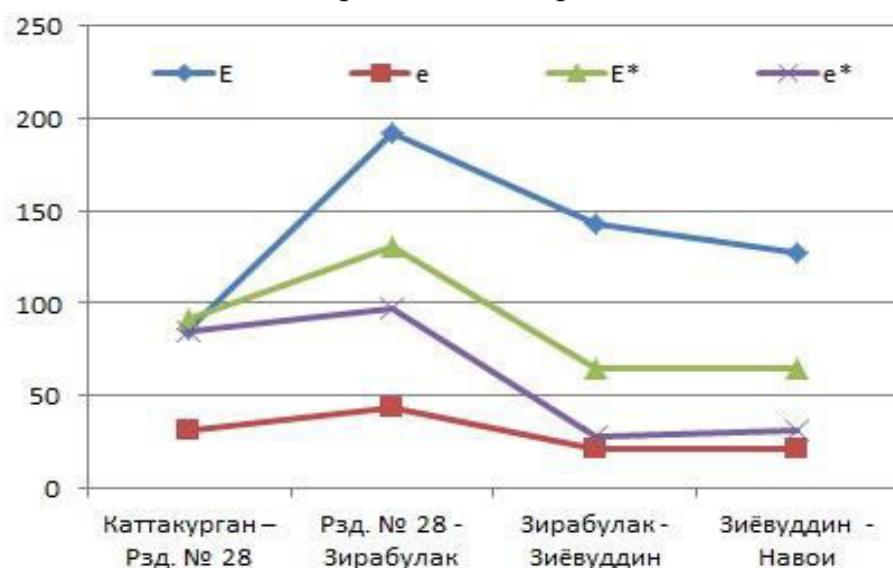


Рис. 1. Динамика расхода натурального дизельного топлива тепловозами $UzTE16M3$ на участке Каттакурган - Навои, движение без остановок

Анализ значений табл. 1 и результата исследований [3,4] свидетельствует о том, что движение грузовых поездов на упомянутом участке Каттакурган - Навои, организованное без остановок на промежуточных станциях, разъездах и раздельных пунктах обеспечивает:

- уменьшение времени хода поезда на 7,6 мин и увеличение технической скорости движения на 8,41 км/ч при среднем расчётном времени на одну остановку приблизительно в 1,90 минуты;
- доли движения на режимах тяги в 37,24 процента, а холостого хода и торможения в 62,76 процента;
- уменьшение доли движения в режиме тяги и её увеличение в режиме холостого хода и торможения на 1,32 процента по сравнению с движением грузового поезда с остановками на промежуточных станциях и разъездах.

Исходя из результата проведённых исследований и данных по работам [3,4] можно сделать следующие обобщающие выводы.

1. Обоснованы значения основных показателей перевозочной работы упомянутых тепловозов $UzTE16M3$ на участке Каттакурган - Навои:

- среднее расчётное время хода грузового поезда по перегонам с остановками по промежуточным станциям, раздельным пунктам и разъездам и

на разгон – замедление составляет, соответственно, приблизительно 17,37 мин, 1,25 и 1,67 минуты;

- среднее расчётное время хода грузового поезда по перегонам без остановок на промежуточных станциях, раздельных пунктах и разъездах составляет приблизительно 15,47 минуты;

- движение грузовых поездов без остановок на промежуточных станциях, разъездах и раздельных пунктах по сравнению с движением их с остановками на них способствует снижению общего (полного) и удельного расходов натурального дизельного топлива, соответственно, на 13,76 и 13,77 процента;

- расход натурального дизельного топлива для одной остановки на промежуточной станции и разъездах составляет 21,90 кг, а на один разгон - замедление этот расход, в среднем, соответствует 29,46 кг/ост.

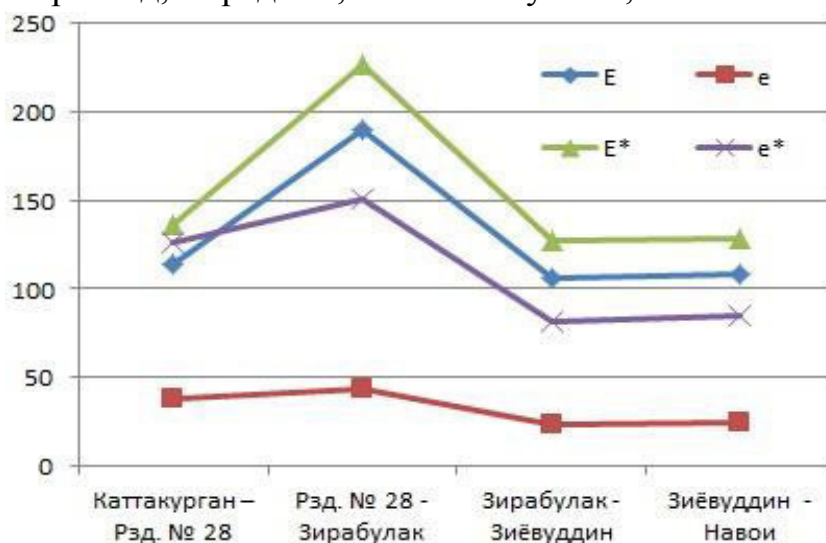


Рис. 2. Динамика расхода натурального дизельного топлива тепловозами $UzTE16M3$ на участке Каттакурган - Навои, движение с остановками

2. Определена величина приведённого расхода натурального дизельного топлива общего (E^* , кг/км) и удельного (e^* , кг/10⁴ткм брутто: км) по каждому из перегонов холмисто – горного участка Каттакурган – Навои, а именно:

- на перегоне Разъезд № 28 – Зирабулак - 10,911 / 2,760 единиц – движение без остановок и 18,94 / 4,295 единиц – движение с остановками на промежуточных станциях, разъездах и раздельных пунктах;

- по перегону Каттакурган - Разъезд № 28 – это 7,671 / 2,436 и 11,340 / 3,597 единиц, соответственно, при движении без остановок и с остановками на промежуточных станциях, разъездах и промежуточных пунктах;

- на перегонах Зирабулак - Зиёвуддин и Зиёвуддин - Навои, соответственно, от 5,351 / 0,801 до 5,108 / 0,904 единиц – движение без

остановок и от 10,579 / 2,331 до 10,705 / 2,431 единиц - движение с остановками на промежуточных станциях, разъездах и отдельных пунктах.

Следовательно, по железнодорожному профилю пути участка Каттакурган - Навои холмисто – горного направления Самарканд – Навои – Бухара перегон Разъезд № 28 - Зирабулак является самым трудным, перегон Каттакурган - Разъезд № 28 – средний по трудности, а два перегона Зирабулак - Зиёвуддин и Зиёвуддин - Навои – условно лёгкие.

Результаты проведённых исследований рекомендуются машинистам – инструкторам и сотрудникам цеха эксплуатации локомотивного депо Бухара АО «Ўзбекистон темир йўллари», чья производственная и профессиональная деятельности напрямую сопряжены с обоснованием расхода топливно – энергетических ресурсов на тягу поездов и оценкой тягового качества профиля пути и трассы железнодорожной линии (направления) Самарканд – Навои - Бухара.

Список литературы

1. Абляимов О. С. Основы управления локомотивов: Учебник для профессиональных колледжей железнодорожного транспорта [Текст] / О. С. Абляимов, Э. С. Ушаков. – Ташкент: «Davr», 2012. – 392 с.

2. Абляимов О. С. Оценка эффективности использования дизельного тягового подвижного состава на холмисто – горном участке железной дороги [Текст] / О. С. Абляимов // Научный журнал «Транспорт Азиатско – Тихоокеанского региона» / Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения. – Хабаровск. – 2017. – № 3 (12). – С. 6 – 11.

3. Абляимов, О. С. Исследование эксплуатации тепловозов *UzTE16M3* на холмисто – горном участке АО «Ўзбекистон темир йўллари» [Текст] / О. С. Абляимов // Научно – технический журнал «Вестник транспорта Поволжья» / Самарский гос. ун-т путей сообщения. – Самара. – 2016. – № 3 (57). – С. 17 – 24.

4. Абляимов, О. С. К вопросу эксплуатации тепловозов *UzTE16M3* на участке Мароканд – Навои АО «Ўзбекистон темир йўллари» [Текст] / О. С. Абляимов // Международный информационно-аналитический журнал «Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык» / Иркутский филиал Московского гос. тех. ун-та гражданской авиации. – Иркутск. – 2017. – № 3. – С. 27 – 34.

5. Абляимов, О. С. Исследование эффективности использования локомотивов дизельной тяги на холмисто – горном участке АО «Ўзбекистон темир йўллари» [Текст] / О. С. Абляимов // Научно – технический журнал

«Вестник транспорта Поволжья» / Самарский гос. ун-т путей сообщения. – Самара. – 2016. – № 5 (59). – С. 17 – 24.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Аблялимов Олег Сергеевич

Ташкентский институт инженеров
железнодорожного транспорта (ТашИИТ).
ул. Элтузар, д. 25, г. Ташкент, 100167,
Республика Узбекистан.

Кандидат технических наук, старший
научный сотрудник, доцент кафедры
«Локомотивы и локомотивное хозяйство»
ТашИИТ.

Тел. +998371-254-52-16

E-mail: o.ablyalimov@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ablyalimov Oleg Sergeyevich

Tashkent institute of railway transport
engineering (TashIET).

25, Eltuzar str., Tashkent, 100167, the Republik
of Uzbekistan.

Candidate of Engineering Sciences, chief
scientific worker, associate professor of the
chair «Locomotives and locomotive, economy»
TashIET.

Phone. +998371-254-52-16

E-mail: o.ablyalimov@gmail.com

УДК 620.97, 629.42

И. А. Баринов, В. С. Иванов

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

О ПЕРСПЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ БОРТОВОГО ХРАНЕНИЯ РЕКУПЕРИРУЕМОЙ ЭНЕРГИИ НА РЕЛЬСОВОМ ТРАНСПОРТЕ

Рекуперативное торможение является наиболее экономичным и энергоэффективным электрическим тормозом, активно применяемым на рельсовом транспорте по всему миру. На российских железных дорогах рекуперативным тормозом оборудованы практически все современные серии электровагонов постоянного и переменного тока, обеспечивая регенерацию миллионов киловатт энергии ежегодно. Однако отечественная технология рекуперативного торможения предполагает возврат электроэнергии в контактную сеть. В связи с этим интерес представляет зарубежный опыт в альтернативном использовании рекуперированной энергии, в частности – принцип бортового хранения электроэнергии. Краткому обзору накопленного в этой области опыта посвящена данная статья.

Ключевые слова: рекуперативное торможение, преобразование энергии, энергетические показатели тягового подвижного состава, легкорельсовый транспорт

ON PROSPECTS OF RAIL TRANSPORT ON-BOARD REGENERATIVE ENERGY STORAGE SYSTEMS APPLICATION

Regenerative brake continues to be the most economical and energy efficient dynamic brake type, actively employed worldwide. Most of the Russian railways' electric rolling stock park, both DC and AC-fed, is equipped with a regenerative brake system that saves millions of kilowatts of energy annually. However, Russian-developed regenerative brake technology relies exclusively on feeding the regenerated energy back to the power grid. This means that foreign experience on alternative applications of regenerated energy, specifically the on-board energy storage technology, may be of interest. This article presents a short review of this experience.

Keywords: regenerative brake, energy conversion, traction rolling stock energy performance, light rail transport

Технология рекуперативного торможения занимает прочные позиции в современном мировом рельсовом транспорте. Представленный впервые ещё в 1880-х гг., принцип рекуперации электроэнергии, вырабатываемой тяговыми двигателями в генераторном режиме, до сих пор является наиболее экономичным видом электрического торможения.

Принципиальное достоинство рекуперации по сравнению с другими видами электрического тормоза – возможность частичного возврата затраченной на тягу энергии – становится тем более значимым на фоне глобального роста стоимости электроэнергии, истощения ископаемых видов топлива, обострения проблем экологии.

Рекуперация энергии в условиях железных дорог особенно эффективна по ряду причин: высокая мощность транспортного средства (и, как следствие, значительные объёмы рекуперированной энергии); наличие продолжительных уклонов профиля пути; частая потребность в плавном замедлении или поддержании скорости состава. Благодаря характерной для железных дорог предварительной известности плана и профиля трассы для предстоящей поездки открывается возможность автоматизации процесса рекуперации по мере развития систем автоматики и контрольно-измерительных приборов.

На отечественных железных дорогах рекуперативным торможением электровозы постоянного тока оборудовались ещё с 1930-х гг.; внедрение на

электровозах переменного тока началось в 1970-х гг., с началом использования тиристорных преобразователей. Опыт применения на электровозах рекуперативного тормоза свидетельствует о значительной (до 20 % и более) экономии потребляемой электроэнергии, росте безопасности движения, повышении технической скорости поездов и пропускной способности участка.

Однако отечественная технология рекуперативного торможения развивалась практически исключительно в направлении возврата рекуперируемой энергии в контактную сеть с немедленным потреблением другой тяговой единицей. Данный принцип, наряду с определёнными преимуществами (среди которых, в частности, его безальтернативность для тяжёлых грузовых и пассажирских поездов), налагает на рекуперацию энергии ряд ограничений.

Во-первых, использование рекуперации с возвратом энергии в сеть невозможно на автономном подвижном составе – тепловозах, дизель-поездах и т. д. Во-вторых, работоспособность такого электрического тормоза уязвима перед неисправностью любого ключевого элемента системы «тяговая подстанция – контактная сеть – электроподвижной состав», что снижает надёжность торможения, а значит, и безопасность движения. Наконец, работа тиристорных плеч преобразователей при инвертировании ими постоянного тока в переменный порождает значительные гармонические составляющие напряжения в контактной сети. Это, в свою очередь, приводит к сокращению срока службы изоляции электрических машин, к ухудшению работы устройств СЦБ, радиосвязи и др. [1].

В связи с перечисленным выше внимания, по мнению авторов, заслуживает принцип аккумуляции рекуперируемой энергии для последующего использования на самом подвижном составе, или бортового накопления энергии (англ. *on-board energy storage*). Практически не получив развития в России (если не считать опытных установок в Московском метрополитене), этот способ рекуперации успешно развивается в США, ряде стран Западной Европы и Восточной Азии, где продемонстрировал комплексный положительный эффект по целому ряду направлений.

В соответствии с типом используемых накопителей системы бортового накопления энергии принято подразделять на три семейства: на батареях, на суперконденсаторах и на кинетических накопителях (маховиках). Системы накопления с использованием топливных элементов и сверхпроводников до сих пор находятся на стадии исследования [2-4], а потому привлекают меньше внимания.

История первых проектов в области *on-board energy storage* свидетельствует об интересе специалистов ко всем трём типам накопителей.

Так, первые испытания суперконденсаторов в качестве накопителей были проведены в 2003 г. в Мангейме, где одна из тележек трамвая-прототипа была оборудована энергосберегающей системой *MITRAC Energy Saver* компании *Bombardier* [5, 6]. Энергосберегающая система включала расположенную на крыше ёмкость с суперконденсаторами массой 450 кг, а также двусторонний ключ на базе IGBT-транзисторов, установленный внутри силового инвертора; схематически вся система подключалась перед тяговым инвертором в цепь постоянного тока (рис. 1). Система производила запасание электроэнергии, рекуперированной двигателями тележки при торможении транспорта на остановках, после чего питала двигатели при последующем разгоне.

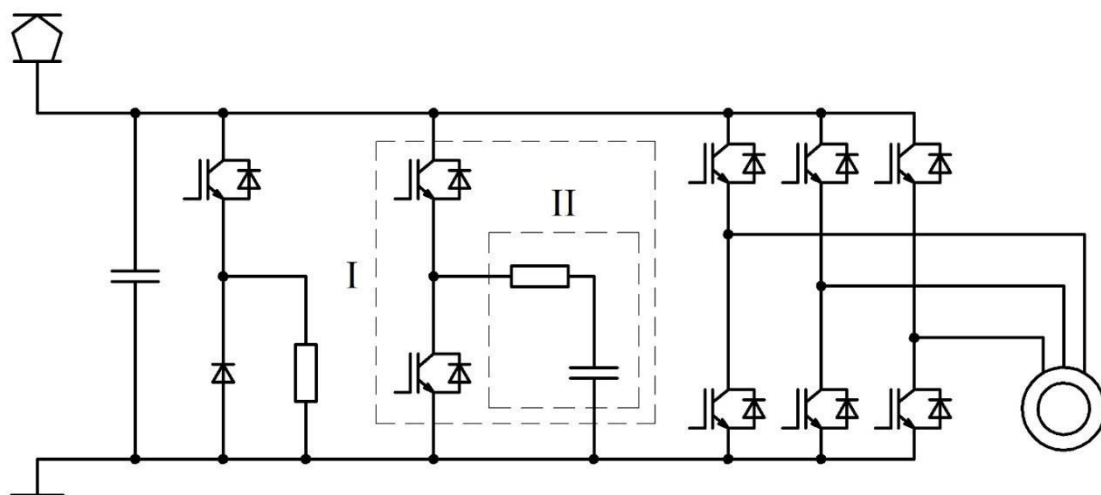


Рис. 1. Принципиальная силовая электрическая схема трамвая, оборудованного энергосберегающей системой *MITRAC Energy Saver*: группа I – элементы системы; группа II – контейнер с суперконденсаторами

По результатам испытаний возврат затраченной на тягу электроэнергии на модернизированной тележке составил порядка 30 %, с соответствующим снижением вредных выбросов в атмосферу. Кроме того, компьютерное моделирование участка трамвайной линии длиной 17,7 км с 27 станциями, по которому курсируют трамваи с суперконденсаторами, свидетельствует о возможности уменьшить число обслуживающих сеть тяговых подстанций (рис. 2). Наконец, результаты испытаний были экстраполированы на случай дизель-поезда, где помимо аналогичной экономии электроэнергии ожидается наличие «бустерного эффекта»: ускорения разгона поезда на этапе набора скорости [6].

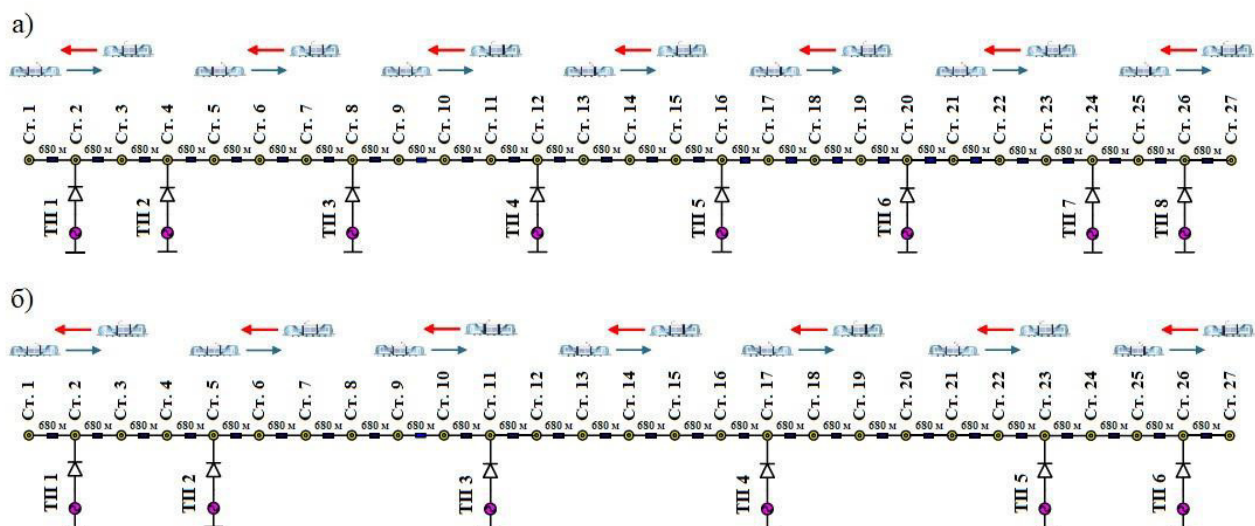


Рис. 2. Результат компьютерного моделирования энергоснабжения трамвайной линии с курсированием: а) типовых трамваев; б) трамваев с системой *MITRAC Energy Saver*, обеспечивающих избыточность двух тяговых подстанций

Аккумуляторы никель-металлгидридного типа впервые были применены на трамваях Ниццы в 2007 г., где линия через исторический центр города была введена в эксплуатацию с участками без контактной сети длиной около 400 м [6, 7]. Трамвай в этих зонах питается за счёт аккумуляторов, которые заряжает на сетевых участках. Выявленные этим и другими проектами недостатки NiMH-аккумуляторов (которые будут перечислены ниже), возможно, могут быть устранены применением более перспективных литий-ионных аккумуляторов.

Наконец, первый опыт маховиков в качестве бортовых накопителей был получен компанией *Alstom* в 2005 г. в Роттердаме, где требовалось решение проблемы пропуска трамваев по мосту Эразма, не оборудованному контактной подвеской. Для этого трамваи оснастили маховиками на основе материалов из углеродного волокна, которые при скорости порядка 12 тыс. об. в мин. обеспечивали транспортное средство энергией порядка 1,5...2 кВт·ч каждый. Результаты испытаний были признаны удовлетворительными [8], о чём свидетельствует и последующий интерес *Alstom* к применению маховиков: в 2013 г. компания заключила соглашение с фирмой *GKN Hybrid Power* о совместном проекте по оборудованию маховиками трамваев семейства *Citadis* (рис. 3).

Накопленный на сегодняшний день опыт в области бортового хранения энергии, разумеется, не сводится к перечисленным примерам и уже позволяет охарактеризовать основные типы накопителей.

В целом, большинство экспертных оценок сходится во мнении, что наиболее перспективным на рельсовом транспорте является применение суперконденсаторов [9]. Несмотря на их значительные габариты, размещение этих стационарных аккумуляторов энергии оказалось возможным как на крышах, так и под полом вагонов или секций рельсового транспорта. Суперконденсаторы выгодно отличаются большой мощностью, удовлетворительным сроком службы, высокой надёжностью. Испытания показали рекуперацию до 30 % электроэнергии на трамваях, снижение на 44 % потребления топлива на дизель-поездах [10]. Высок потенциал суперконденсаторов и в гибридных системах, сочетающих разные типы накопителей.



Рис. 3. Маховик фирмы *GKN Hybrid Power*

Маховики к настоящему времени также продемонстрировали ряд преимуществ, в числе которых значительный – до 100 тыс. циклов – срок службы, безопасность утилизации, малое время отклика. На легкорельсовом транспорте использование маховиков позволяет сократить расход энергии от 10 до 30 %; положительные результаты наблюдались даже в случае тяжёлых грузовых поездов. Недостатками маховиков считаются их габариты и стоимость технического обслуживания. Существует также определённое недоверие к вращающимся инерционным массам на борту, страх перед их потенциальным разрывом и последующими жертвами.

Наконец, химические аккумуляторы по мнению большинства специалистов являются наименее перспективными для рельсового транспорта.

Малое количество установленных циклов службы, а также длительное время зарядки делает применение аккумуляторов для работы в режимах частых и мощных циклов зарядки-разрядки нецелесообразным [9].

В табличном виде выводы по предпочтительности того или иного типа накопителей для различных видов рельсового транспорта представлены в табл. 1.

Таблица 1

Предпочтительность типа накопительного устройства в зависимости от вида рельсового транспорта

Тип накопителя	Трамвай	Поезд метро	Электropоезд	Дизель-поезд
	Предпочтительность			
Батареи	низкая (лимит циклов службы)	низкая (лимит циклов службы)	средняя (лимит мощности)	средняя (лимит мощности)
Маховики	средняя (лимит мощности, безопасность)	средняя (лимит мощности, безопасность)	средняя (лимит мощности, безопасность)	средняя (лимит мощности, безопасность)
Суперконденсаторы	высокая	высокая	средняя (лимит мощности)	средняя (лимит мощности)

Заключение. Рекуперация энергии является одним из главных средств достижения высокой энергоэффективности на рельсовом транспорте. На российских железных дорогах рекуперативным тормозом оборудованы практически все современные серии электропоездов постоянного и переменного тока, обеспечивая регенерацию миллионов киловатт энергии ежегодно. При этом интерес может представлять зарубежный опыт в альтернативном использовании рекуперированной энергии, в частности – принцип бортового хранения электроэнергии. Современный уровень развития силовой электроники предлагает целый перечень типов накопителей энергии для различных видов транспорта и условий работы, а опыт эксплуатации накопителей свидетельствует о высоком потенциале технологии бортового хранения электроэнергии, заслуживающем дальнейшего изучения и развития.

Список литературы

1. Власьевский, С. В. Свободные колебания напряжения в тяговой сети, вызванные процессами коммутации тиристорных преобразователей электровозов / С. В. Власьевский, В. Г. Скорик, О. В. Мельниченко // Электроника и электрооборудование транспорта. Научно-технический журнал. – 2007. – № 1. – С. 14-19.
2. Miller A. R. Fuelcell Hybrid Locomotives: Applications and Benefits / Arnold R. Miller, Jan Peters // Proceedings of the 2006 IEEE/ASME Joint Rail Conference. – 2006. – P. 287-293. DOI: 10.1109/RRCON.2006.215320.
3. Tsukahara K. A Study on Methods to Design and Select Energy Storage Devices for Fuel Cell Hybrid Powered Railway Vehicles / Kenta Tsukahara, Keiichiro Kondo // IECON 2013 – 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – 2013. – P. 4534-4539. DOI: 10.1109/IECON.2013.6699866.
4. Eastham A. R. An Assessment of Superconductive Energy Storage for Canadian Freight Railways / Anthony R. Eastham, Daniel M. Pringle, Robert P. Austin // Canadian Electrical Engineering Journal. – 1982. – Vol. 7, № 3. – P. 3-12. DOI: 10.1109/CEEJ.1982.6593970.
5. Steiner M. Energy Storage on Board of Railway Vehicles / Michael Steiner, Johannes Scholten // 2005 European Conference on Power Electronics and Applications. – 2005. – 7 p. DOI: 10.1109/EPE.2005.219410.
6. Steiner M. Energy Storage System with UltraCaps on Board of Railway Vehicles / Michael Steiner, Markus Klohr, Stanislaus Pagiela // 2007 European Conference on Power Electronics and Applications. – 2007. – 12 p. DOI: 10.1109/EPE.2007.4417400.
7. Steimel, A. Power-Electronics Issues of Modern Electric Railway Systems / Andreas Steimel // 10th International Conference on Development and Application Systems (DAS). – 2010. – P. 1-8.
8. Flywheel Energy Storage for Automotive Applications / Hedlund M. [et al] // Energies – Open Access Journal of Energy Research, Engineering and Policy. – 2015. – P. 10636-10663. DOI: 10.3390/EN81010636.
9. Review of Application of Energy Storage Devices in Railway Transportation / Ghaviha N. [et al] // The 8th International Conference on Applied Energy – ICAE2016. // Energy Procedia. – 2017. – Vol. 105. P. 4561-4568. 105 (2017)
10. Destraz B. Power Assistance for Diesel-Electric Locomotives With Supercapacitive Energy Storage / Blaise Destraz, Philippe Barrade, Alfred Rufer //

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Баринов Игорь Александрович

Иркутский государственный университет
путей сообщения (ИрГУПС).
Ул. Чернышевского, д. 15, Иркутск, 664074,
Российская Федерация.
Аспирант кафедры «Электроподвижной
состав», ИрГУПС.
Тел.: +7 914 907-37-20.
E-mail: ib4558@yahoo.com.

Иванов Владислав Сергеевич

Иркутский государственный университет
путей сообщения (ИрГУПС).
Ул. Чернышевского, д. 15, Иркутск, 664074,
Российская Федерация.
Аспирант кафедры «Электроподвижной
состав», ИрГУПС.
Тел.: +7 983 153-10-75.
E-mail: vladislav-sergeevich-irgups@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Barinov Igor Alexandrovich

Irkutsk State Transport University (ISTU).
15, Chernyshevsky str., 664074, Russian
Federation.
Postgraduate of the department «Electric
Rolling Stock» ISTU.
Phone: +7 914 907-37-20.
E-mail: ib4558@yahoo.com.

Ivanov Vladislav Sergeevich

Irkutsk State Transport University (ISTU).
15, Chernyshevsky str., 664074, Russian
Federation.
Postgraduate of the department «Electric
Rolling Stock» ISTU.
Phone: +7 983 153-10-75.
E-mail: vladislav-sergeevich-irgups@mail.ru.

УДК 537.8

М. Д. Глущенко, И. О. Горюнов

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

МЕТОДИКА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РАСЧЕТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА

Проектирование электрической машины — сложная многовариантная задача. При ее решении необходимо учитывать достаточно большое количество факторов. Главная задача перед инженерами при проектировании является получение готового продукта, который по своим характеристикам будет наиболее близким к заданному проекту. Кроме этого, на этап проектирования желательно затрачивать как можно меньше времени. Поэтому проектировщики в своей работе стараются использовать все новейшие достижения теории и практики электромашиностроения, методики и подходы к расчету и проектированию электрических машин.

Ключевые слова: уравнение Максвелла, магнитное поле, электродвигатель постоянного тока, критерий подобия.

MAGNETIC FIELD CALCULATION IMPROVEMENT METHOD BASED ON MAXWELL'S EQUATIONS

Designing an electrical machine is a complex task. The solution should take into account quite a number of factors. The main task for engineers during the design is to obtain the finished product, that will be with their characteristics most closely to a given project. In addition, the design phase is desirable to spend time short as possible. That is why engineers try to use all the latest design's achievements and new methods of engine's calculation.

Keywords: Maxwell's equation, magnetic field, DC electric motor, similarity criterion.

Большинство расчетных методик исходит из так называемой «машинной постоянной», определяемой из допустимых электромагнитных нагрузок.

Машинная постоянная Арнольда записывается в виде:

$$P_A = \frac{D^2 l_\delta \omega}{P'} = \frac{2}{\pi a_\delta k_B k_{OB} A B_\delta}, \quad (1)$$

где D — диаметр якоря или внутренний диаметр статора, м; l_δ — расчетная длина магнитопровода, м; ω — угловая скорость, рад/с; P' — расчетная мощность, Вт; A — линейная нагрузка, А/м; B_δ — индукция в воздушном зазоре, Тл; a_δ — коэффициент полюсного перекрытия; k_B — коэффициент формы кривой индукции, учитывающий изменение напряжения на выводах машины при холостом ходе и нагрузке; k_{OB} — обмоточный коэффициент.

Определив $P_A = f(P')$ для различных типов электрических машин, можно получить базу для их расчетов. Машинная постоянная не является константой и зависит от электромагнитных нагрузок, напряжения, типа изоляции, системы охлаждения, стоимости материалов, надежности работы машины, суммы капитальных и эксплуатационных затрат и других факторов.

Преобразование энергии в электрических машинах обусловлено электромагнитными процессами и поэтому представляет практический интерес зависимости постоянной Арнольда от параметров магнитного поля.

Применительно к электрическим машинам известны различные подходы и рекомендации определения характеристик магнитного поля. Наиболее распространён метод уравнений Кирхгофа, когда магнитный поток, создаваемый обмотками машины, замыкается через характерные участки машины,

образующие ее магнитную цепь. Например, у электрических машин постоянного тока основными участками магнитной цепи являются ярмо (станина), сердечники полюсов (включая полюсные башмаки, или наконечники), сердечник якоря, обмотка якоря, зубцы якоря и воздушный зазор между полюсными наконечниками и якорем. Указанные участки магнитной цепи характеризуются размерами и свойствами материалов, из которых они изготовлены.

Совершенствование этого метода позволило создать методы расчёта магнитного поля на основе уравнений Максвелла. При этом используют дифференциальное уравнение для векторного магнитного потенциала

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} = -\mu \delta(x, y, z), \quad (2)$$

где A – векторный потенциал; μ – магнитная проницаемость; δ – плотность тока; x, y, z – координаты.

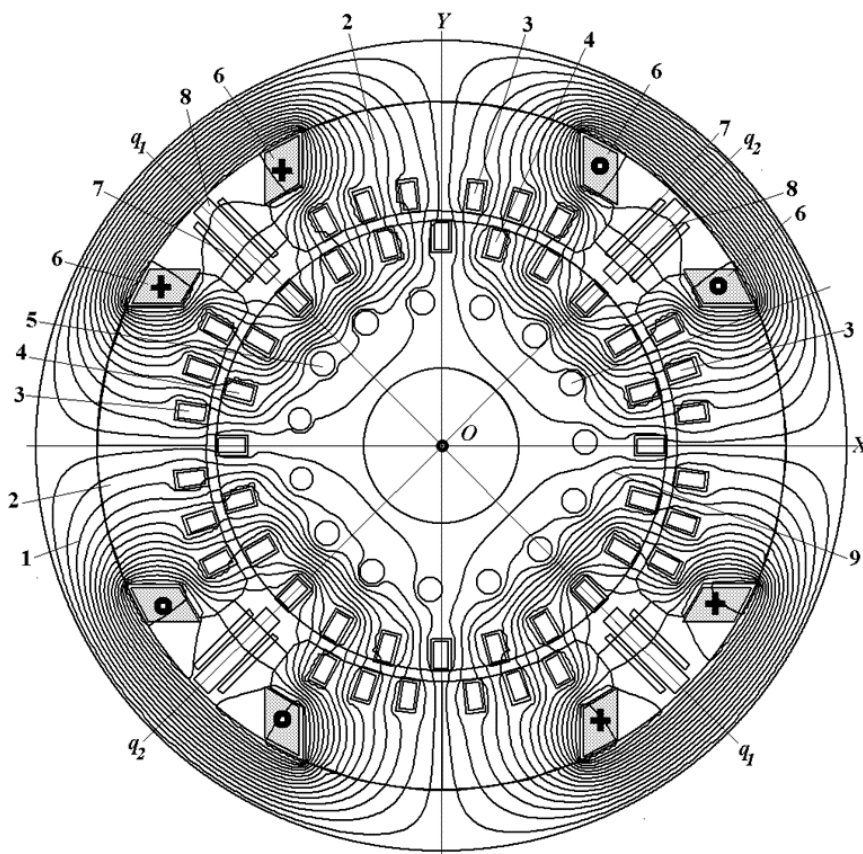


Рис. 1. Магнитное поле обмотки возбуждения

1-остов; 2 – сердечник главного полюса; 3 – компенсационная обмотка;
4 – обмотка якоря; 5 – продольный канал; 6 – катушка обмотки возбуждения;
7 – катушка добавочного полюса; 8 – сердечник добавочного полюса;
9 – сердечник якоря.

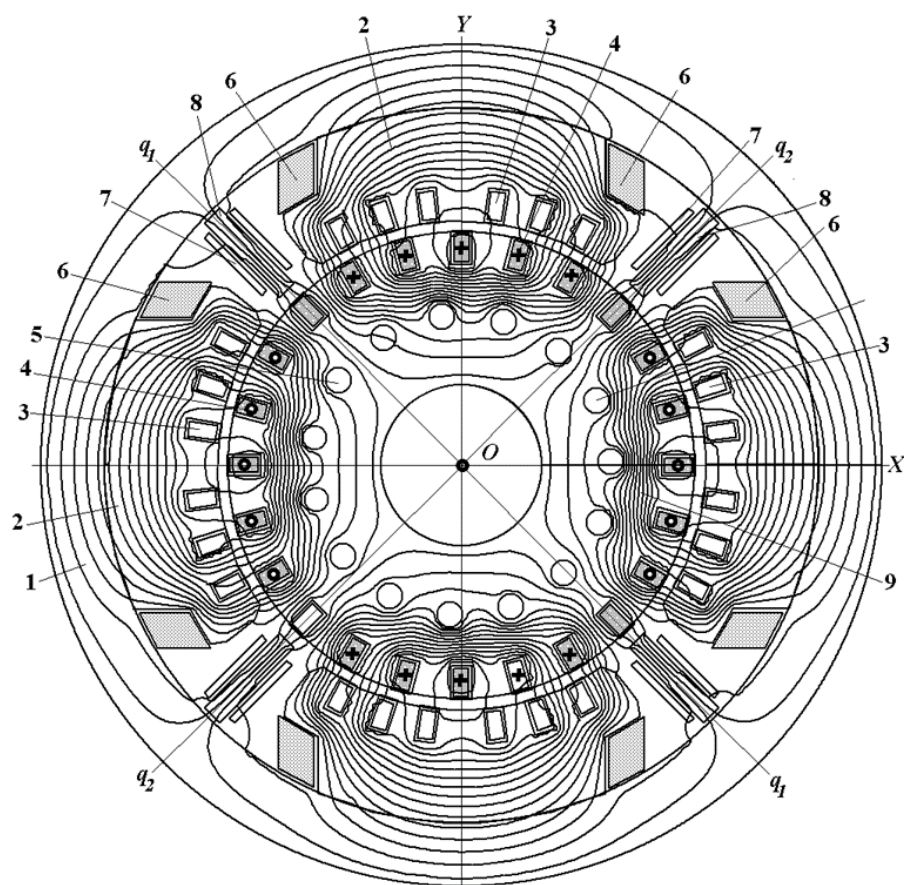


Рис. 2. Магнитное поле обмотки якоря

1 – остов; 2 – сердечник главного полюса; 3 – компенсационная обмотка;
 4 – обмотка якоря; 5 – продольный канал; 6 – катушка обмотки возбуждения;
 7 – катушка добавочного полюса; 8 – сердечник добавочного полюса;
 9 – сердечник якоря.

При решении уравнения (2) используют численные методы, в результате чего получают картину магнитного поля в виде распределения магнитных силовых линий. В качестве примера на рис 1, 2 представлено магнитное поле 4х полюсной электрической машины постоянного тока обусловленное токами обмотки возбуждения и обмотки якоря. Аналогично может быть представлено магнитное поле компенсационной обмотки и добавочных полюсов.

Представленные результаты позволяют считать, что магнитная индукция в каждой точке сечения электрической машины и, следовательно, параметры электрических машин определяются магнитным полем обмотки возбуждения, обмотки якоря, обмотки добавочных полюсов и компенсационной обмотки.

Поэтому целесообразно принять, что машинная постоянная Арнольда (1) является функцией множества параметров, и в том числе от соотношения

между магнитными полями вызванными обмотками. Во многих случаях для этого применяют критериальные уравнения, вид которых определяют методами теории подобия. Применительно к рассматриваемому случаю целесообразно учитывать следующее.

Любой рассматриваемый физический процесс и в том числе магнитное поле электрических машин может быть представлен в виде сложных дифференциальных уравнений, которые передают определенные знания о характере зависимостей между исследуемыми величинами. Однако на основе дифференциальных выражений невозможно сделать выводы о конкретных соотношениях между переменными, [1-5]. Следовательно, решением уравнений количественной задачи будет являться переход от уравнений к закономерностям, которые и определяют одни величины через другие. Кроме этого для решения сложных задач происходит неизбежное упрощение. Всё это приводит к приближенным результатам, которые имеют мало практической ценности и лишены оценочного характера. Основное значение получают численные методы решения [1-5], которые в настоящее время получили широкое распространение в связи увеличением мощностей вычислительной техники. Однако, несмотря на это, количественные данные, получаемые в результате численного решения при том, что дают конкретные соотношения, не способны выразить наглядные внутренние взаимосвязи и взаимозависимости. В технических расчетах применяются несколько методов расчетов: метод базовой точки, анализ размерностей и анализ уравнений. Здесь дальнейшее ход исследования будет проходить в соответствии со второй теоремой подобия (или П-теоремы). В ней делается предположение, что полное уравнение физического процесса может быть представлено в виде зависимости его отдельных критериев подобия. Полное физическое уравнение при этом имеет вид:

$$f(P_1, P_2, P_3, \dots, P_n) = 0, \quad (3)$$

где P_1, P_n критерии подобия физического объекта.

Применительно к рассматриваемой задаче перечень физических величин представлен в табл. 1. Критерии подобия, полученные с учётом изложенного выше представлены в табл. 2.

Таблица 1

Физические величины, характеризующие магнитное поле

Физическая величина	Обозначение	Формула размерности
Площадь под магнитопроводом	S	L^2
Магнитная индукция	B	$L^{-\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1} \mu^{\frac{1}{2}}$
МДС	F	$L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1} \mu^{-\frac{1}{2}}$
Воздушный зазор	δ	L
Магнитный поток	Φ	$L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1} \mu^{\frac{1}{2}}$
Напряженность магнитного поля	H	$L^{-\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1} \mu^{-\frac{1}{2}}$
Электродвижущая сила	E	$L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-2} \mu^{\frac{1}{2}}$
Диаметр якоря	D	L
Магнитный момент	M	$L^{\frac{5}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1} \mu^{\frac{1}{2}}$
Частота	n	T^{-1}

Таблица 2

Выведенные критерии подобия

	Критерии подобия					
	Π_1	Π_2	Π_3	Π_4	Π_5	Π_6
Выражение	$\frac{B \cdot S^{\frac{3}{2}}}{M}$	$\frac{\delta}{S^{\frac{1}{2}}}$	$\frac{\Phi \cdot S^{\frac{1}{2}}}{M}$	$\frac{H \cdot S^{\frac{1}{2}}}{F}$	$\frac{D}{S^{\frac{1}{2}}}$	$\frac{n \cdot M}{S^{\frac{1}{2}} \cdot E}$

Критериальное уравнение исследуемого процесса представляется в виде функциональной зависимости между критериями подобия.

$$f(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6) = 0. \quad (4)$$

При этом один из критериев подобия является функцией других критериев и поэтому выполняется при соблюдении независимых критериев подобия. В итоге критериальное уравнение имеет вид:

$$\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6). \quad (5)$$

Заключение

Была решена задача подобия магнитного поля электрических машин постоянного тока, для этого был проведен анализ магнитной цепи, получены шесть безразмерных комплексов, описывающих сложную систему. Из них было составлено критериальное уравнение. Анализ размерностей позволил найти безразмерные комплексы, которые описывают принципиальные отношения или зависимости в сложной системе. Критерий Π_1 выражает соотношение между магнитной индукцией, площадью под магнитным потоком и магнитным моментом; критерий Π_2 – соотношение между величиной воздушного зазора и площадью под магнитным потоком; Π_3 показывает соотношение между магнитным потоком, площадью и магнитным моментом; критерий Π_4 выражает соотношение между напряженностью магнитного поля, площадью и МДС; критерий Π_5 между площадью и диаметром якоря.

Список литературы

1. Гухман, А. А. О сущности теории подобия / А. А. Гухман, Е. А. Ермакова // Московский институт химического машиностроения. – М.: Типография МИХМ, 1959. – С. 8 – 13.
2. Гухман, А. А. Введение в теорию подобия / А. А. Гухман. – М.: Высшая школа, 1973. – С. 243 – 291.
3. Хантли, Г. Анализ размерностей / Г. Хантли, А. Ф. Ульянова – М.: Издательство Мир, 1970. – С. 171 – 174.
4. Веников, В. А. Теория подобия и моделирование / В. А. Веников, Г. В. Веников, изд. 4-е. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2014. – С. 209 – 227.
5. Машины постоянного тока. Теория и исследование / Э. Арнольд [и др.]. – М.: Государственное техническое издательство, 1931. – С. 88 – 125.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Глущенко Михаил Дмитриевич
Российский университет транспорта
(МИИТ).
ул Образцова, д 9, стр. 9, г. Москва, 127994,
Российская Федерация.
Доктор технических наук, доцент кафедры
«Электропоезда и локомотивы» (РУТ –
МИИТ).
Тел.: +7 (916) 4967185
E-mail: mr.gluschenko@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Gluschenko Mikhail Dmitrievich
Russian University of Transport (RUT -
MIIT).
9b9 Obrazcova st., Moscow, 127994, the
Russian Federation.
Doctor of Technical Science, Associate
Professor of the department «Electric trains
and locomotives» (RUT - MIIT)
Phone: +7 (916) 4967185.
E-mail: mr.gluschenko@mail.ru

Горюнов Иван Олегович
Российский университет транспорта
(МИИТ).
ул Образцова, д 9, стр. 9, г. Москва, 127994,
Российская Федерация.
Аспирант кафедры «Электропоезда и
локомотивы» (РУТ – МИИТ).
Тел.: +7 (905) 7980540
E-mail: ivan.goryunov@yandex.ru

Goryunov Ivan Olegovich
Russian University of Transport (RUT -
MIIT).
9b9 Obrazcova st., Moscow, 127994, the
Russian Federation.
Postgraduate of the department «Electric trains
and locomotives» (RUT - MIIT)
Phone: +7 (905) 7980540
E-mail: ivan.goryunov@yandex.ru

УДК 629.423

В. А. Баранов¹, А. А. Киселев², А. С. Мазнев²

¹Октябрьская дирекция управления движением, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация,

²Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

ОЦЕНКА ТЯГОВЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОВОЗОВ 2ЭС5К И ЗЭС5К С ДЛИННОСОСТАВНЫМИ ПОЕЗДАМИ ПОВЫШЕННОЙ МАССЫ НА УЧАСТКЕ ПЕРГУБА – НОВЫЙ ПОСЕЛОК

Приведены результаты тяговых расчетов для передвижения длинносоставных поездов массой 5200 и 6500 т электровозами 2ЭС5К и 3ЭС5К соответственно без использования вспомогательных локомотивов на участке Пергуба – Новый поселок.

Ключевые слова: тяговые расчеты, электровоз переменного тока, длинносоставный состав.

Valery A. Baranov¹, Aleksandr A. Kiselev², Aleksandr S. Maznev²

¹October Directorate of Traffic Management, Saint-Petersburg, the Russian Federation

²Petersburg State Transport University, Saint-Petersburg, the Russian Federation

ESTIMATION OF 2ES5K AND 3ES5K LOCOMOTIVES TRACTION OPPORTUNITIES WITH LONG-CONSTITUTED TRAINS OF THE INCREASED MASS ON THE TRACK SECTION PERGUBA – NOVY POSELOK

The results of traction calculations for the movement of long-haul trains of 5200 and 6500 tons by electric locomotives 2ES5K and 3ES5K without the use of auxiliary locomotives in the Perguba - Novy poselok track section are presented.

Keywords: grade computations, AC electric locomotive, long-haul train.

Введение

Перевозки грузов должны сопровождаться наименьшими затратами времени и энергоресурсов [1].

В Петрозаводском регионе Октябрьской железной дороги с участками сложного плана, профиля пути и значительным грузопотоком эксплуатируются электровагоны 2ЭС5К, 3ЭС5К и ВЛ80 всех индексов (в/и). На участке Пергуба – Новый поселок для длинносоставных поездов повышенной массы необходимо использовать подталкивающие локомотивы.

Задачей настоящего исследования является оценка тяговых свойств электровагонов данных серий и определение возможности эксплуатации их на данном участке без подталкивания или кратной тяги.

Исходные данные

1) Координаты участка Пергуба – Новый поселок: 544км 5пк – 501км 7пк.

2) Весовая норма длинносоставных поездов повышенной массы на исследуемом участке с электровагонами 2ЭС5К и 3ЭС5К установлена соответственно 5200 и 6500 т.

3) Определен наиболее трудный участок (531км 5пк – 525км 5пк) с подъемами до 17 ‰. В табл. 1 представлена выписка из приказа начальника дороги о допустимых скоростях движения на участке.

Таблица 1

Допустимые скорости поезда на элементах пути

Элемент пути	Допустимая скорость, км
Кяппесельга – Пергуба	80
кривые 525 км ПК 7 – 526 км ПК 3	80
кривые 526 км ПК 4 – 527 км ПК 2	80
кривые 527 км ПК 3 – 529 км ПК 10	80
кривая 530 км ПК 1	60
кривые 530 км ПК 2 – 531 км ПК 7	60
кривая 531 км ПК 8 – 533 км ПК 8	60
кривые 533 км ПК 9 – 534 км ПК 4	80
кривые 536 км ПК 6-10	80
кривая 537 км ПК 1-10	60

кривая 538 км пк 1-7	60
кривые 538 км пк 8 – 540 км пк 10	80
кривая 541 км пк 1 – 542 км пк 10	60
кривые 543 км пк 1-4	80
кривые 543 км пк 5 – 544 км пк 2	80

С учетом длины поезда (около 1 км), за начальную координату принята 530км 5пк. Следовательно, скорость в данной точке принята равной максимально допустимой (табл. 1) – 60 км/ч.

4) В расчетах использованы тяговые характеристики электровозов 2ЭС5К и 3ЭС5К [2]. Для определения основного сопротивления движению поезда по бесстыковому пути осевая нагрузка принята равной 22т/ось.

Тяговые расчеты

1. Расчет кривой скорости движения

Для оценки возможности следования электровозов 2ЭС5К с составом массой 5200т и 3ЭС5К с составом массой 6500 т выполнены тяговые расчеты с помощью пакета Simulink программной среды Matlab [3].

На рис. 1 представлены результаты моделирования движения поезда с электровозом 2ЭС5К на 4-й зоне регулирования выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП).

На рис. 1 первый блок (s, km) представляет собой зависимость пути от времени. За точку начала отсчета принята координата 530км 5пк, в которой скорость движения составляет 60 км/ч.

На следующем блоке приведена кривая скорости движения поезда ($v, kmph$) с указанием расчетной скорости ($v_{расч}$) на 4-й зоне ВИП.

Ниже приведен профиль пути (i). Профиль пути представлен ступенчатой функцией от времени.

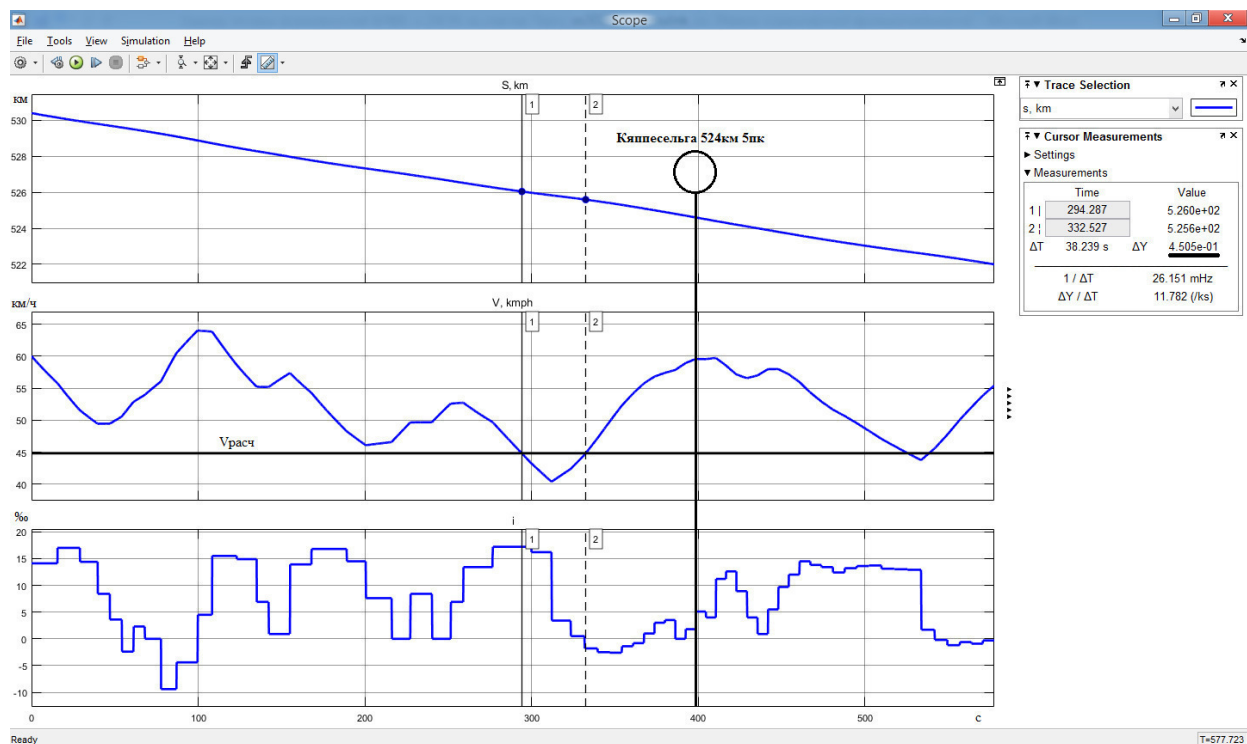


Рис. 1. Результаты расчета скорости движения при следовании 2ЭС5К на 4-й зоне регулирования напряжения.

Из рис. 1 видно, что протяженность участка пути, проходимого поездом с электровозом 2ЭС5К со скоростью ниже расчетной, составляет не более 500м. Протяженность участка определяется как разность координат точек А и Б, результат подчеркнут на рис. 1 черной линией.

Так как профиль пути после станции Кяппесельга усложняется (рис. 1), важно проследовать ее с максимально возможной скоростью. По результатам расчета эта скорость равна 60 км/ч.

На рис. 2 представлены результаты моделирования следования электровоза 3ЭС5К на 4-й зоне работы ВИП с составом массой 6500 т.

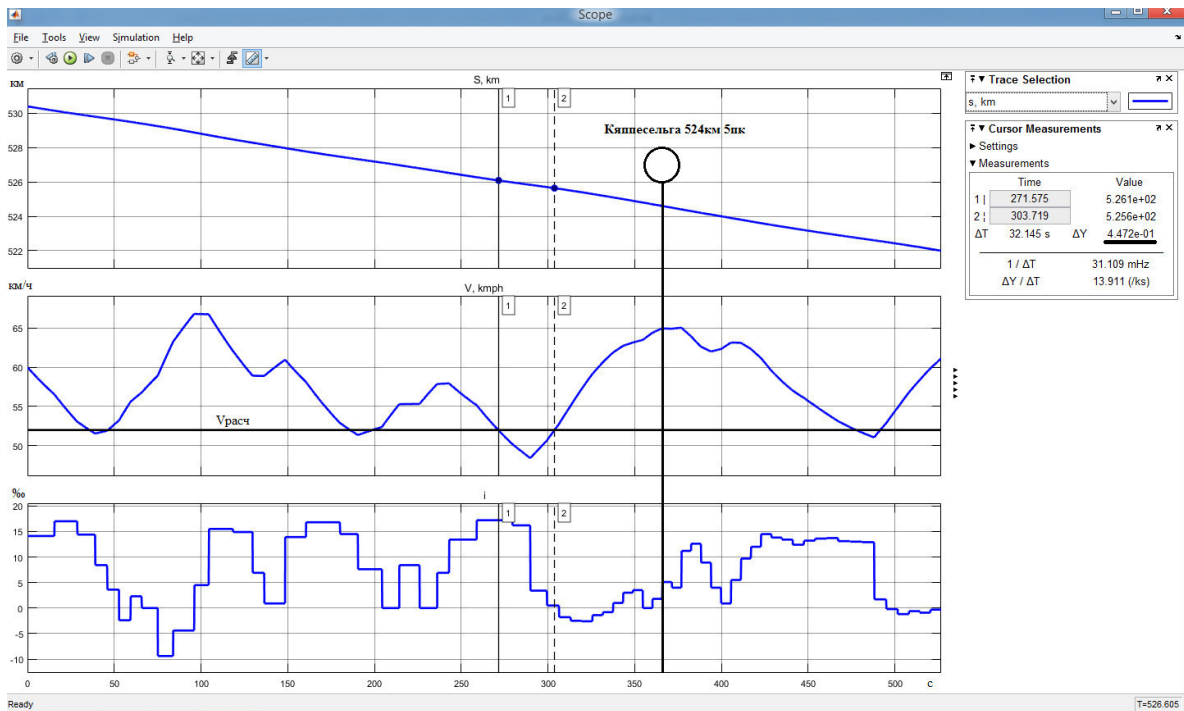


Рис. 2. Результаты расчета скорости движения при следовании 3ЭС5К на 4-й зоне регулирования напряжения.

Из рис. 2 следует, что протяженность участка пути, проходимая электровозом 3ЭС5К со скоростью ниже расчетной, составляет менее 500 м, и скорость проследования станции Кяппесельга составляет 60 км/ч.

2. Проверка тяговых двигателей на нагревание.

В основу расчета положено выражение [2]:

$$\tau = \tau_{\infty} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T}}) + \tau_0 \cdot e^{-\frac{t}{T}}, \quad (1)$$

где τ_{∞} – установившаяся температура, °С; T – постоянная времени нагревания, с; τ_0 – начальный нагрев обмоток двигателей, °С.

Определение установившейся температуры τ_{∞} и постоянной времени T осуществляется по тепловым характеристикам тягового двигателя НБ-514Б [2]. Ток задается по его токовым характеристикам $I_d(v)$. Начальный перегрев обмоток принят равным 20°С.

На рис. 3 и 4 представлены результаты моделирования нагрева тяговых двигателей электровозов 2ЭС5К и 3ЭС5К. Расчетная скорость ($v_{расч}$) и допустимая температура обмоток ($\tau_{доп}$) выделены на рисунках черной линией.

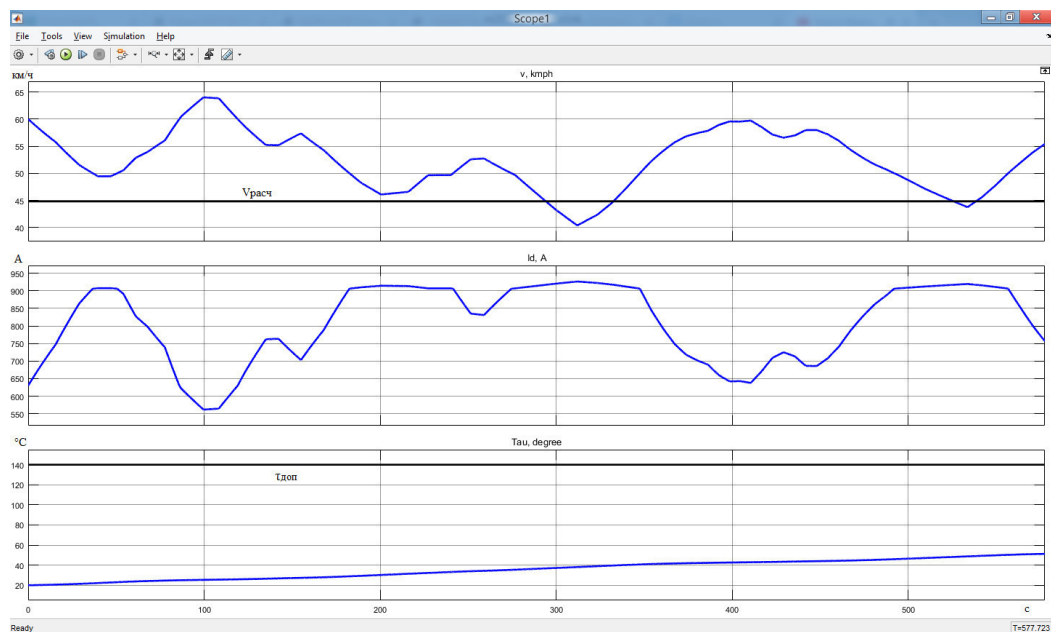


Рис. 3. Результаты расчета перегрева обмоток двигателя НБ-514Б электровоза 2ЭС5К на 4-й зоне регулирования напряжения.

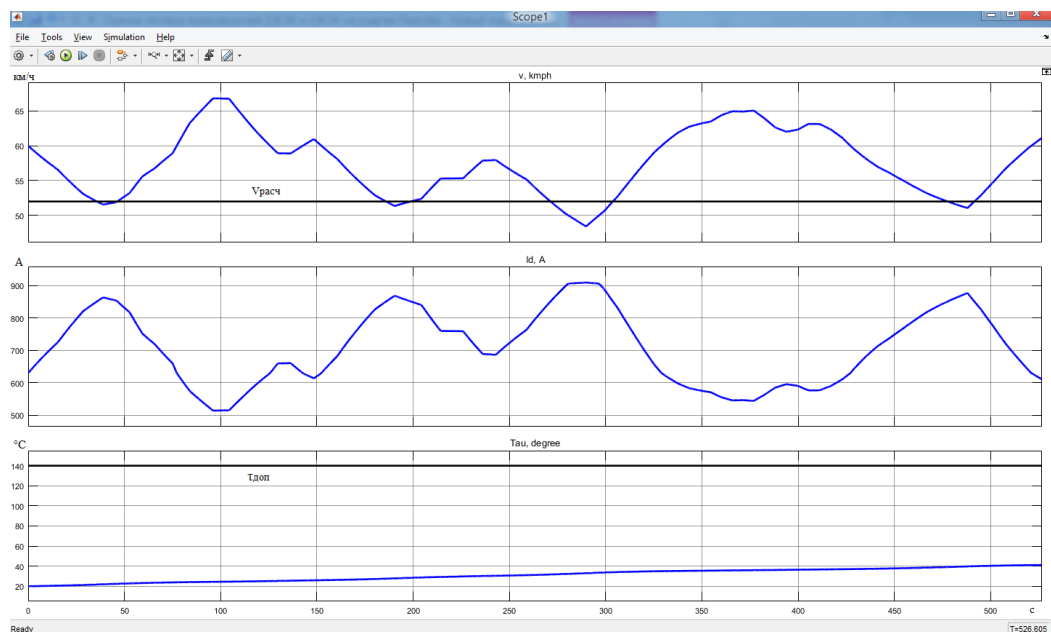


Рис. 4. Результаты расчета перегрева обмоток двигателя НБ-514Б электровоза 3ЭС5К на 4-й зоне регулирования напряжения.

Из рисунков следует, что перегрев обмоток двигателя электровозов не превышает допустимого. Максимальный перегрев для двигателя электровоза 2ЭС5К составляет $51,1^{\circ}\text{C}$, а для электровоза 3ЭС5К – $42,3^{\circ}\text{C}$ при допуске перегрева 140°C (класс изоляции F).

Результаты опытных поездок

Опытные поездки на электровозе 2ЭС5К выполнялись в период с 10 по 13 июня 2018 г с составами поездов весом 5100 – 5200 т и на электровозе 3ЭС5К с составами весом 6300 – 6500 т в период с 13 по 19 сентября 2018 г. При всех поездках в хвосте поезда следовал подталкивающий локомотив серии 2ЭС5К, не принимающий участия в тяге. Таким образом, фактическая масса поезда с учетом сопротивления движению от механической части подталкивающего локомотива была больше на 250 т.

Режим следования поезда выбирался таким образом, чтобы при нахождении головы поезда на 530 км скорость следования составляла 60 км/ч при полностью отпущенных тормозах. При дальнейшем следовании локомотив работал в режиме тяги на 29-й позиции КМ или 3-4-й зоне регулирования ВИП. Во всех случаях средняя скорость входа на станцию Кяппесельга была не менее 34 км/ч с дальнейшим ее увеличением до 55 км/ч при следовании по станции. При следовании по перегону Кяппесельга – Новый Поселок в конце подъема на 522 – 521 км скорость временно снижалась до 40 км/ч у электровоза 3ЭС5К и до 15 км/ч у электровоза 2ЭС5К.

Анализ времени хода по участку Пергуба – Новый Поселок показал, что среднее время хода поездов составило:

подталкивающим локомотивом – 43 мин.,

без подталкивающего локомотива с электровозом 2ЭС5К – 53 мин,

с подталкивающим локомотивом без участия в тяге – 43 мин.

Погодные условия при проведении всех опытных поездок были благоприятные: осадков и повышенной влажности не было. Рельсы чистые и сухие. Подача песка не осуществлялась.

Заключение

Выполненные тяговые расчеты показали, что на участке Пергуба – Новый поселок возможно использовать для цели тяги электровозы 2ЭС5К и 3ЭС5К с длинносоставными поездами массой 5200 и 6500 т соответственно без вспомогательных локомотивов со скоростью не ниже расчетной и допустимым перегревом двигателей.

Список литературы

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030 г. Утверждена Распоряжением Правительства РФ от 17.06.2008 №877-р.
2. Правила тяговых расчетов для поездной работы. Утверждены Распоряжением Старшего вице-президента ОАО «РЖД» В.А. Гапановича от 12.05.2016 № 867-р.
3. Герман-Галкин, С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0. / С. Г. Герман-Галкин. – СПб: Корона-принт, 2001.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Баранов Валерий Александрович

Санкт-Петербургский центр организации работы станций Октябрьской дирекции управления движением.
г. Санкт-Петербург, 191036, Невский пр., д. 85/5, Российская Федерация.
Кандидат технических наук, дежурный по станции Сосново.
тел. +7(921) 354-25-12.
Email: baranov-orw@yandex.ru

Киселев Александр Александрович

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I.
г. Санкт-Петербург, 190031, Московский пр., д. 9, Российская Федерация.
Аспирант кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС.
тел. +7(921) 411-53-06.
Email: akiselev1995@mail.ru

Мазнев Александр Александрович

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I.
г. Санкт-Петербург, 190031, Московский пр., д. 9, Российская Федерация.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС.
тел. +7(904) 339-12-61.
Email: maznev-as@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Baranov Valery Aleksandrovich

St. Petersburg Center for the Station Organization Traffic Control October Directorate.
85/5, Nevsky av., St. Petersburg, 191036, the Russian Federation.
Candidate of Engineering Sciences, station Sosnovo duty officer.
Phone. +7(921) 354-25-12.
Email: baranov-orw@yandex.ru

Kiselev Aleksandr Aleksandrovich

Petersburg State Transport University (PSTU).
9, Moscovsky av., St. Petersburg, 190031, the Russian Federation.
Postgraduate of the department «Electric traction» PSTU.
Phone. +7(921) 411-53-06.
Email: akiselev1995@mail.ru

Maznev Aleksandr Sergeevich

Petersburg State Transport University (PSTU).
9, Moscovsky av., St. Petersburg, 190031, the Russian Federation.
Doctor of Engineering Sciences, Professor of the department «Electric traction» PSTU.
Phone. +7(904) 339-12-61.
Email: maznev-as@mail.ru

О. С. Аблялимов

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ТашИИТ),
г. Ташкент, Республика Узбекистан

К ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОВОЗОВ 3ВЛ80^С НА УЧАСТКЕ КАТТАКУРГАН – НАВОИ АО «ЎЗБЕКИСТОН ТЕМИР ЙЎЛЛАРИ»

Представлены результаты исследований по оценке энергетической эффективности использования электровозов 3ВЛ80^С на холмисто – горном участке железнодорожного пути при движении грузовых поездов без остановок и с остановками на промежуточных станциях, разъездах и отдельных пунктах.

Ключевые слова: исследование, результат, грузовой поезд, электровоз, железнодорожный путь, участок пути, эксплуатация, разъезд, анализ, станция, холмисто-горный.

Oleg S Ablyalimov

Tashkent institute of railway transport engineering (TashIET),
Tashkent, the Republik of Uzbekistan

TO THE EFFICIENCY OF THE 3VL80^S ELECTRIC LOCOMOTIVES ON THE KATTAKURGAN – NAVOI DISTRICT OF «UZBEK RAILWAY» JSC

Introduced the results of the investigation of the energyly on evaluation of efficiency of the 3VL80^S electric locomotives on a hilly-mountainous road section of railway track by of the movement freight trains without and with stopping on through stations, passing-tracks and division points.

Keywords: investigation, result, the freight train, the electric locomotive, railway track, road section, exploitation, the stage, analyses, the station, hilly-mountainous.

Данные исследования являются продолжением работ [1,2] и посвящаются обоснованию эффективности использования трёхсекционных магистральных (поездных) электровозов 3ВЛ80^С на холмисто – горном участке Каттакурган – Навои Узбекской железной дороги.

Рассматривается движение грузовых поездов с унифицированной массой состава $Q = 3000$ т и постоянным числом осей в составе $m = 200$ осей, организованное упомянутыми электровозами 3ВЛ80^С без остановок и с остановками на промежуточных станциях, разъездах и отдельных пунктах.

Цель исследований реализуется выполнением тягового расчёта [3] для различных условий организации перевозочной работы исследуемого электровоза на номинальной позиции контроллера машиниста в сочетании с режимами холостого хода и торможения, опираясь на данные работ [1,4] и рекомендации [5] теории локомотивной тяги.

В табл. 1 и табл. 2 приведены значения кинематических параметров движения грузовых поездов по перегонам участка Каттакурган – Навои АО «Ўзбекистон темир йўллари». Вышеупомянутое движение реализовывалось трёхсекционными магистральными (поездными) грузовыми электровозами ЗВЛ80^С с учётом максимальных мощности их силовых энергетических систем, тягового качества и свойства локомотива, а также кинетической энергии поезда на каждом, конкретном элементе профиля пути.

Таблица 1

Время хода грузового поезда по перегонам на проход, а по разъездам промежуточным станциям, и раздельным пунктам на замедление – разгон

№ п/п	Промежуточные станции	Расстояние, км	Время хода, мин	Время на замедление/разгон, мин
1	Каттакурган	-	-	1,10/0,65
2	Разъезд № 28	11,25	9,20	1,05/0,80
3	Зирабулак	16,85	14,00	1,40/0,80
4	Зиёвуддин	27,15	18,80	1,30/1,50
5	Навои	23,50	16,40	1,20/-
6	Каттакурган - Навои	78,75	58,40	1,21/0,94

Данные табл. 1 и табл. 2 с учётом работы [1] свидетельствуют, что движение грузовых поездов на участке Каттакурган – Навои, организованное без остановок на промежуточных станциях, разъездах и раздельных пунктах по отношению к движению с остановками на них, обеспечивает:

- уменьшение общего времени хода поезда на 7,45 мин и увеличение технической скорости движения на 8,86 км/ч при среднем расчётном времени на одну остановку в 1,86 минуты;
- значениям долей движения на режимах тяги в 27,40 процента, а холостого хода и торможения в 72,60 процента;
- уменьшению доли движения в режиме тяги и её увеличению в режиме холостого хода и торможения, приблизительно, на 3,66 процента.

Таблица 2

Время хода грузового поезда при движении электровозов 3ВЛ80^С
по перегонам участка Каттакурган – Навои Узбекской железной дороги

№ п/п	Перегоны	Движение с остановками, мин		
		по перегону	в режиме	
			тяги	холостого хода и торможения
1	Каттакурган – Рзд. № 28	10,80	3,55	7,25
2	Рзд. № 28 - Зирабулак	15,20	5,80	9,40
3	Зирабулак - Зиёвуддин	20,90	5,10	15,80
4	Зиёвуддин - Навои	18,95	6,00	12,95
5	Каттакурган - Навои	65,85	20,45	45,40

В табл. 3 приведены значения общего (полного) и удельного расхода электрической энергии, вычисленные по известным формулам [3] для трёхсекционных магистральных (поездных) грузовых электровозов 3ВЛ80^С при организации железнодорожных перевозок грузов различных по типу, виду и структуре с остановками на участке Каттакурган – Навои Узбекской железной дороги.

Таблица 3

Расход электрической энергии электровозами 3ВЛ80^С при передвижении
грузового поезда по участку Каттакурган – Навои с остановками

№ п/п	Перегоны	<u>Общий по перегонам и участку А, кВт-ч</u>
		Удельный по перегонам и участку а, Вт-ч/ткм брутто
1	Каттакурган – Разъезд №28	566,82 / 17,30
2	Разъезд №28 - Зирабулак	908,04 / 21,30
3	Зирабулак - Зиёвуддин	792,43 / 9,74
4	Зиёвуддин - Навои	1003,30 / 9,74
5	Каттакурган - Навои	3270,59 / 14,30

На рис. 1 и рис. 2. показано, соответственно, распределение времени хода грузового поезда, общего (полного) и удельного расхода электрической энергии, потребляемой трёхсекционными магистральными (поездными) грузовыми электровозами 3ВЛ80^С за поездку по перегонам участка Каттакурган – Навои АО «Ўзбекистон темир йўллари» на разных режимах работы их силовых энергетических систем.

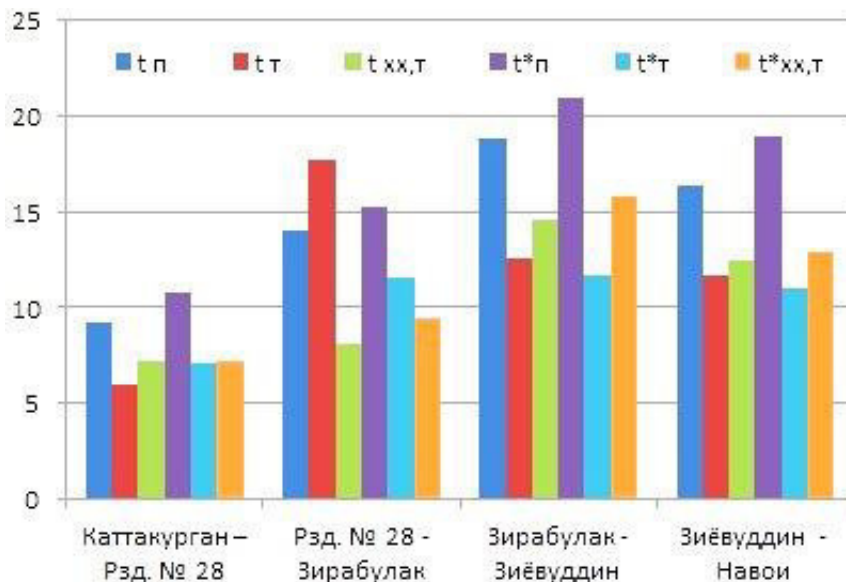


Рис. 1. Динамика изменения времени движения грузового поезда по перегонам холмисто – горного участка Каттакурган – Навои

На рис. 1 приняты такие обозначения: время хода поезда без остановок и с остановками, соответственно, общее по перегонам участка $t_{\text{п}}$, $t^*_{\text{п}}$, в режиме тяги $t_{\text{т}}$, $t^*_{\text{т}}$, а в режиме холостого хода и торможения $t_{\text{xx,т}}$, $t^*_{\text{xx,т}}$. а на рис. 2 обозначено: расход электрической энергии за поездку без остановок и с остановками на промежуточных станциях, разъездах и отдельных пунктах, соответственно, общий (полный) A , A^* и удельный a , a^* .

На рис. 1 значения времени хода грузового поезда в режиме тяги $t_{\text{т}}$ и $t^*_{\text{т}}$ увеличены, соответственно, в три и два раза, а на рис. 2 значения расхода электрической энергии A^* и a^* увеличены в тридцать раз.

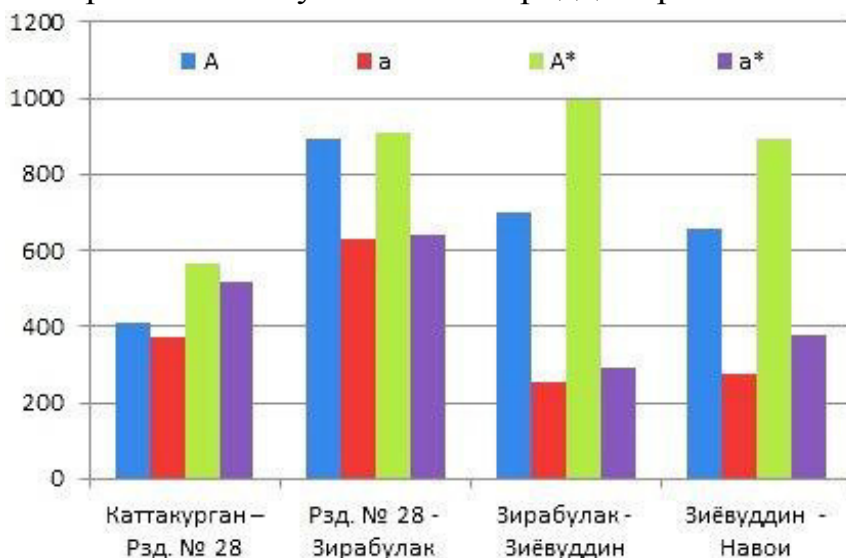


Рис. 2. Динамика расхода электрической энергии электровозами 3ВЛ80^С по перегонам участка Каттакурган – Навои АО «Ўзбекистон темир йўллари»

Ниже приводим значения параметров некоторых основных показателей перевозочной работы трёхсекционных магистральных (поездных) электровозов 3ВЛ80^С на участке Каттакурган – Навои Узбекской железной дороги:

- усреднённое расчётное чистое время хода грузового поезда по перегонам и суммарное на разгон-замедление по промежуточным станциям, разъездам и раздельным пунктам, соответственно, составляет приблизительно 14,60 и 2,15 минуты;

- движение грузовых поездов без остановок на промежуточных станциях, разъездах и раздельных пунктах, по сравнению с аналогичным движением с остановками на последних, обеспечивает снижение расхода электрической энергии, в среднем, приблизительно на 18,65 процента;

- расход электроэнергии для одной остановки на промежуточных станциях, разъездах и раздельных пунктах составляет, приблизительно, 152,51 кВт - ч;

- удельный расход электрической энергии на одну остановку составляет приблизительно 0,662 Вт - ч / т км брутто;

- усреднённая величина общего (полного) и удельного расходов электрической энергии для каждого перегона участка, соответственно, составляет 665,13 кВт - ч и 2,907 Вт-ч/т км брутто – движение без остановок на промежуточных станциях, разъездах и раздельных пунктах, а также 817,65 кВт - ч и 3,570 Вт-ч/т км брутто – движение с остановками на последних;

- среднее значение усреднённой величины общего (полного) и удельного расходов электрической энергии для обоих видов движения на каждом перегоне участка, соответственно, составляет приблизительно 741,39 кВт - ч и 3,238 Вт-ч/т км брутто.

Кинематические параметры движения грузового поезда и значения расхода электрической энергии, которая магистральными (поездными) грузовыми трёхсекционными электровозами 3ВЛ80^С тратится при реализации железнодорожных перевозок грузов различных по структуре и содержанию на холмисто – горном участке Каттакурган – Навои, рекомендуются машинистам – инструкторам по теплотехнике локомотивного депо Бухара АО «Ўзбекистон темир йўллари».

Кроме этого, их можно использовать в практике работы специалистов локомотивного хозяйства, профессиональная деятельность которых связана с вопросами разработки режимных карт вождения грузовых поездов, анализа и оценки тягового качества перегонов профиля пути на реальных холмисто – горных и других, идентичных им, виртуальных участках железных дорог.

Показатели энергоёмкости исследуемых электровозов в количественном и денежном (здесь не определялись) исчислении позволят инженерно – техническому персоналу локомотивного комплекса разрабатывать реальные

корректные практические рекомендации и мероприятия по экономии электрической энергии на тягу поездов.

Список литературы

1. Абляимов, О. С. Исследование перевозочной работы электровозов ЗВЛ80^С на холмисто – горном участке АО «Ўзбекистон темир йўллари» [Текст] / О. С. Абляимов // Научно – технический журнал «Вестник транспорта Поволжья» / Самарский гос. ун-т путей сообщения. – Самара. – 2016. – № 5 (59) – С. 16 – 22.

2. Абляимов, О. С. Оценка эффективности перевозочной работы электрического тягового подвижного состава на холмисто – горном участке железной дороги [Текст] / О. С. Абляимов // Международный информационно – аналитический журнал «Crede experto: транспорт, общество, образование, язык» / Филиал Московского гос. техн. ун-та гражданской авиации. – Иркутск. – 2017. – № 4 – С. 54 – 69.

3. Абляимов, О. С. К эффективности использования электровозов ЗВЛ80^С на холмисто – горном участке железной дороги [Текст] / О. С. Абляимов, З. З. Ергашев, Т. М. Турсунов // Вторая международная научно-практическая конференция «Повышение энергетической эффективности наземных транспортных систем» / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2016. – С. 105 – 111.

4. Абляимов, О. С. Исследование эффективности использования электрического тягового подвижного состава на холмисто – горном участке железной дороги [Текст] / О. С. Абляимов // Научный журнал «Транспорт Азиатско – Тихоокеанского региона» / Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения. – Хабаровск. – 2017. – № 2 (11). – С. 6 – 10.

5. Абляимов, О. С. Основы управления локомотивов: Учебник для профессиональных колледжей железнодорожного транспорта [Текст] / О. С. Абляимов, Э. С. Ушаков. – Ташкент: «Davr», 2012. – 392 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Абляимов Олег Сергеевич

Ташкентский институт инженеров
железнодорожного транспорта (ТашИИТ).
ул. Элтузар, д. 25, г. Ташкент, 100167,
Республика Узбекистан.
Кандидат технических наук, старший
научный сотрудник, доцент кафедры
«Локомотивы и локомотивное хозяйство»
ТашИИТ.
Тел. +998371-254-52-16
E-mail: o.ablyalimov@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ablyalimov Oleg Sergeyevich

Tashkent institute of railway transport
engineering (TashIET).
25, Eltuzar str., Tashkent, 100167, the Republik
of Uzbekistan.
Candidate of Engineering Sciences, chief
scientific worker, associate professor of the
chair «Locomotives and locomotive, economy»
TashIET.
Phone. +998371-254-52-16
E-mail: o.ablyalimov@gmail.com

А. В. Плаксин¹, С. В. Швецов², Е. С. Кульневич²

¹Западно-Сибирская железная дорога – филиал ОАО «РЖД»,
г. Новосибирск, Российская Федерация,

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

О СНИЖЕНИИ РАСХОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПАССАЖИРСКИХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ НА РАВНИННЫХ УЧАСТКАХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Расход электроэнергии на тягу зависит от большого числа эксплуатационных показателей, в том числе и от использования мощности электроподвижного состава. Цель работы - оценить энергетические показатели электровозов при вождении пассажирских поездов на равнинных участках пути и рассмотреть возможные пути повышения их энергетической эффективности.

На основании проведенного исследования было определено, что электровозы ЭП2К на равнинных участках железных дорог большой протяженности работают в неэкономичных режимах, в связи с их избыточной мощностью, которую невозможно реализовать. В связи с этим был сделан вывод о резервах экономии электроэнергии на тех участках железных дорог, где по условиям эксплуатации наблюдается явное недоиспользование мощности электровозов, предложен способ повышения эффективности их использования за счет применения ступенчатого регулирования мощности, и произведена сравнительная оценка работы электровозов ЭП2К на всех и части тяговых двигателей.

Ключевые слова: энергетическая эффективность, тяга поездов, пассажирский электровоз, постоянный ток, энергетические показатели, регулирование мощности.

Alexey V. Plaksin¹, Semen V. Shvetsov², Evgeny. S. Kulnevich²

¹The West Siberian railway – branch of JSC "Russian Railways", Novosibirsk, Russian Federation

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

ON REDUCING THE CONSUMPTION OF ELECTRICAL ENERGY IN THE OPERATION OF PASSENGER ELECTRIC LOCOMOTIVES ON THE FLAT SECTIONS OF RAILWAYS

Electricity consumption for traction depends on a number of operational parameters, including the use of power of electric rolling stock. The purpose of this study was to evaluate the energy performance of the electric locomotives for driving passenger trains on flat terrain and the possible ways to increase their energy efficiency.

On the basis of the conducted research it was determined that the EP2K electric locomotives in the plains of the Railways a large extent operate in inefficient modes, due to their excess capacity, which is impossible to implement. In this regard, it was concluded that reserves of energy saving in those areas of Railways, where the operating conditions there is a clear underutilization of the capacity of the locomotives, a method of increasing the efficiency of their use through the use of a stepped power control and comparative evaluation of EP2K electric locomotives on all parts and traction motors.

Key words: energy efficiency, pull trains, passenger electric locomotives, direct current, energy performance, the power regulation.

Снижение расхода электроэнергии на тягу поездов является одной из важнейших задач на железнодорожном транспорте, и данному вопросу уделяется повышенное внимание со стороны работников железных дорог, а также ученых и специалистов. За последние годы в этой области сделано многое, однако не все резервы еще использованы.

Произведем оценку энергетических показателей электровозов ЭП2К при вождении пассажирских поездов на участке от Новосибирска до Омска, протяженность которого составляет более 600 километров.

Для этой цели по данным автоматизированной системы централизованной обработки маршрутов машинистов (АС ЦОММ) была осуществлена выборка средних скоростей движения и масс пассажирских поездов на участках Новосибирск-Барабинск и Барабинск-Омск за 2013-2015 годы, которая показала, что за период с 2013 по 2015 годы средние массы пассажирских поездов на участке от Новосибирска до Омска находились в пределах от 667 до 784 тонн, а средние технические скорости движения по участкам – 79,0 - 86,1 км/ч. При этом средняя масса поездов за данный период времени составила 748 тонн, а средняя техническая скорость – 81,4 км/ч [1].

Для оценки экономичности режимов работы электровозов ЭП2К при вождении пассажирских поездов на равнинных участках железной дороги для различных значений масс поездов и скоростей движения были определены значения мощности, необходимой для преодоления равнинного участка пути, коэффициент использования мощности K_p и степень использования КПД $C_{кпд}$ [1]. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения мощности, необходимой для преодоления сил сопротивления движению поезда, коэффициента использования мощности и степени использования КПД электровозов ЭП2К

Масса поезда, тонн	Скорость движения, км/ч																	
	70			80			90			100			120			140		
	Р _к	К _р	С _{кпд}	Р _к	К _р	С _{кпд}	Р _к	К _р	С _{кпд}	Р _к	К _р	С _{кпд}	Р _к	К _р	С _{кпд}	Р _к	К _р	С _{кпд}
1350	1165	26,6	93,6	1392	31,8	95,9	1658	37,9	97,7	1968	44,9	98,9	2736	62,5	100,0	3727	85,1	99,9
1200	1046	23,9	92,0	1251	28,6	94,5	1491	34,0	96,6	1771	40,4	98,2	2464	56,3	99,8	3358	76,7	100,0
1000	888	20,3	89,5	1062	24,3	92,2	1268	29,0	94,7	1508	34,4	96,8	2101	48,0	99,3	2866	65,4	100,0
800	729	16,6	86,3	874	20,0	89,2	1045	23,9	92,0	1244	28,4	94,5	1738	39,7	98,1	2375	54,2	99,7
700	650	14,8	84,4	780	17,8	87,4	934	21,3	90,3	1113	25,4	92,9	1556	35,5	97,1	2129	48,6	99,3
600	571	13,0	82,4	686	15,7	85,3	822	18,8	88,2	981	22,4	91,0	1375	31,4	95,7	1883	43,0	98,7
400	412	9,4	77,6	498	11,4	80,3	600	13,7	83,2	718	16,4	86,1	1011	23,1	91,5	1391	31,8	95,9

По результатам табл. 1 можно сделать вывод, что электровозам ЭП2К при вождении поездов массами от 600 до 870 тонн со скоростями движения 77 – 86 км/ч для преодоления равнинного профиля пути требуется развить мощность не более 1000 кВт, а среднее значение развиваемой локомотивом мощности в этих диапазонах масс и скоростей составляет 850 кВт. В связи с чем электровозы на равнинных участках пути используют свою мощность менее чем на 20 % от их номинального (часового) значения и работают в неоптимальных по энергетике режимах со степенью использования КПД менее 95 %, то есть режим их работы характеризуется дополнительными энергетическими затратами.

Основным путем повышения энергетических показателей электровозов ЭП2К при вождении пассажирских поездов на равнинных участках, на наш взгляд, является применение ступенчатого регулирования мощности за счет отключения отдельных тяговых двигателей (ТД) и увеличения суммарного КПД локомотивов.

В связи с чем представляется целесообразным оценить экономическую эффективность работы электровозов ЭП2К на всех и части ТД по разности расхода электроэнергии, которую можно получить по характеристикам электровозов.

Расчет характеристик электровоза для всех ступеней регулирования скорости был выполнен по данным протокола испытаний ТД ЭД153У1 пассажирских электровозов ЭП2К [2] в соответствии с методикой [3] и рекомендациями ГОСТ 2582-81. Результаты представлены на рис. 1.

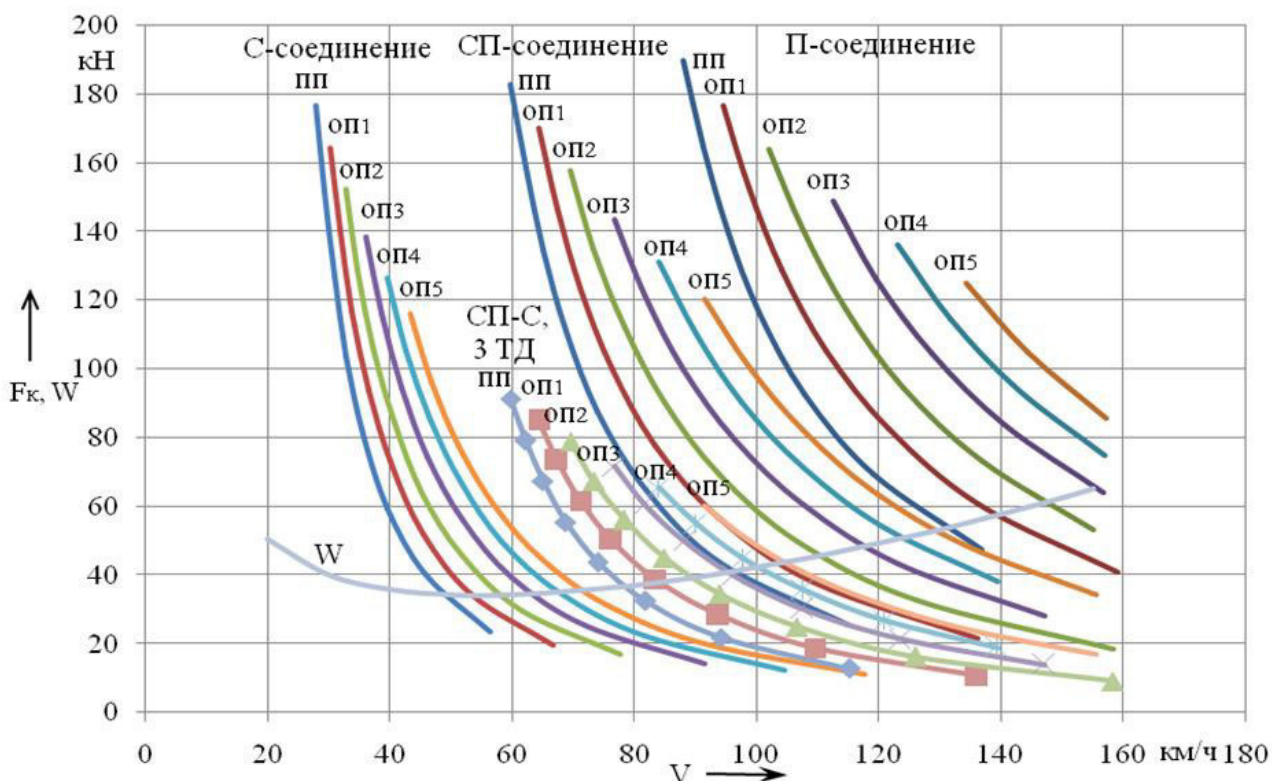


Рис. 1. Тяговые и дополнительные характеристики электровоза ЭП2К и сопротивление движению поезда массой 748 тонн на равнинном участке пути.

Полученные тяговые характеристики показали, что у электровозов ЭП2К существует область тяговых характеристик, где отсутствуют естественные характеристики и которая при вождении поездов массой 748 тонн находится в пределах 75-95 км/ч, что соответствует средним скоростям движения данных электровозов на рассматриваемых участках. Отсутствие естественных характеристик приводит к тому, что для поддержания заданной скорости в данном диапазоне скоростей движения машинисты чередуют движение на высшем соединении ТД с избыточным значением силы тяги – серийно-параллельном (СП) соединении полным полем (ПП) с движением на низшем соединении ТД с недостаточным значением силы тяги – серийном (С) соединении 5 ступени ослабления возбуждения (ОП5).

Заполнить не перекрытую область естественных характеристик и получить дополнительные характеристики можно путем отключения 3 ТД (одной ветки) на СП-соединении электровоза. На рис. 1 также приведены дополнительные характеристики при работе электровоза на 3 ТД на СП-соединении, которые были получены как $F_{3д} = F_{6д} / 2$.

По полученным характеристикам было проведено сравнение экономичности работы электровозов на всех и на 3 ТД на СП-соединении. Результаты сравнения приведены в табл. 2.

Таблица 2

Анализ работы электровозов ЭП2К на всех и части ТД

Средняя скорость движения (V), км/ч	Масса вагонов (M _в), т	Соединение тяговых двигателей / величина ослабления поля (%)	Ток одного ТД (I _{тд.1}), А	Сила тяги одного колесно-моторного блока (КМБ) (F _{к.о.1}), кН	Число рабочих ТД (N _т)	Путь, проходимый электровозом при ΔV=1 км/ч (ΔS ₁), км	Время работы электровоза (Δt ₁), мин	Удельный расход электроэнергии электровоза (а), Втч/ткм	Процент снижения расхода электроэнергии (Δа*), %
99,158	780	СП-ОП1 / 80 % СП-ПП / 100 %	254,0 204,39	7,922 6,157	6 6	9,395 5,582	5,685 3,377	15,574	4,276
99,158	780	СП-ОП5 / 40 % СП-ОП4 / 46 %	504,515 442,06	16,553 14,476	3 3	6,931 42,129	4,194 25,492	14,909	
96,04	720	СП-ПП / 100 % С-ОП5 / 40 %	214 215	6,708 2,989	6 6	86,915 1,531	54,3 0,956	15,502	5,374
96,04	720	СП-ОП1 / 85 % СП-ПП / 100 %	462,5 397,19	15,65 13,369	3 3	5,251 74,056	3,28 46,264	14,669	
92,551	780	СП-ПП / 100 % С-ОП5 / 40 %	226,0 224,07	7,416 3,256	6 6	12,042 1,568	7,806 1,016	15,082	5,197
92,551	780	СП-ОП3 / 54 % СП-ОП2 / 66 %	419,21 346,2	14,674 11,978	3 3	20,034 5,44	12,988 3,527	14,298	
80,495	780	СП-ПП / 100 % С-ОП-5 / 40 %	282,5 262,145	10,99 4,493	6 6	1,101 2,584	0,821 1,926	14,364	6,31
80,495	780	СП-ОП1 / 85 % СП-ПП / 100 %	349,68 282,5	13,905 10,99	3 3	11,991 4,829	8,938 3,60	13,457	
75,368	840	СП-ПП / 100 % С-ОП5 / 40 %	318,2 282,5	13,386 5,228	6 6	0,746 3,454	0,594 2,749	14,10	6,865
75,368	840	СП-ОП1 / 85 % СП-ПП / 100 %	392,94 318,2	16,804 13,386	3 3	3,072 63,06	2,445 50,202	13,132	

Из анализа результатов табл. 2 можно сделать вывод, что при вождении электровозами ЭП2К пассажирских поездов массой 720-840 тонн (12-14 вагонов) со скоростями движения от 75 до 100 км/ч при отключении 3 ТД расход электроэнергии может быть снижен на 4 – 6,5 %. Отключение ТД рекомендуется производить при движении электровоза на СП-соединении (отключать 3 ТД), что позволит осуществлять движение в области отсутствия естественных характеристик электровоза. При отключении части ТД на данном

соединении, для поддержания заданной скорости движения в пределах 75-96 км/ч машинисту не нужно будет переходить с высшего соединения (СП-ПП) на низшее (С-ОП5), что также позволит снизить колебания тяговой нагрузки, которые приводят к увеличению потерь в контактной сети и уменьшить число коммутаций в цепи электровоза [4]. Кроме этого, при отключении 3 ТД на СП-соединении появляется возможность чередования работы электровоза по группам ТД участвующих в тяговом режиме (при соответствующих преобразованиях в цепях можно эксплуатировать электровоз сначала на одной, а затем на другой группе ТД), а также избежать излишнего (ненужного) переключения контакторов при сбросе и наборе позиций при переходе с СП-соединения ПП на С-соединение ОП5 [5].

Существует мнение, что отключение отдельных ТД может привести оставшиеся в работе движущие оси к нагрузкам, предельным по сцеплению. На самом деле это не так. Расчетами было установлено, что режим отключения 3 ТД электровоза осуществляется с силами тяги колесно-моторных блоков значительно меньшими, чем сила тяги по сцеплению и составляют величину равную примерно 35 % от сил, предельных по сцеплению при эксплуатации электровоза на равнинном участке пути.

Проведенная оценка снижения расхода электроэнергии позволяет сделать вывод об имеющихся резервах повышения энергетической эффективности электровозов ЭП2К при эксплуатации на равнинных участках пути. Небольшие изменения силовой схемы и схемы цепей управления позволяют без серьезных затрат провести эксперимент по отключению части ТД.

Список литературы

1. Плаксин, А. В. Пути снижения расхода электроэнергии при эксплуатации пассажирских электровозов на равнинных участках пути [Текст] / А. В. Плаксин, С. В. Швецов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. № 1 (29). – С. 35 – 47.
2. Протокол предварительных испытаний электродвигателя тягового постоянного тока ЭД153У1 для пассажирского электровоза ЭП2К. ТХ.218.1022, Государственное предприятие завод «Электротяжмаш», Харьков, 2007 – 36 с.
3. Курбасов, А.С. Проектирование тяговых электродвигателей. Учебник [Текст] /А. С. Курбасов, В. И. Седов, Л. Н. Сорин. – М.: Транспорт, 1987 – 536 с.

4. Бабич, В. М. Оптимальное регулирование мощности многоосного сцепа в тяге / В. М. Бабич, А. Н. Крыгин // Тезисы докладов «Состояние и перспективы развития электровозостроения в стране». – Новочеркасск, 1991. – С. 12 – 13.

5. Саблин, О. И. Снижение избыточной мощности тягового средства в процессе движения [Текст] / О. И. Саблин, В. В. Артемчук // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харьков. – 2012. – № 6/8. – С. 34 – 38.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Плаксин Алексей Владимирович

Западно-Сибирская железная дорога – филиал ОАО «РЖД».
Вокзальная магистраль, д. 12, г. Новосибирск, 630004, Российская Федерация.
Ведущий инженер дорожного топливно-энергетического центра.
Телефон +7-913-746-38-71.
E-mail: Plaksin.av@mail.ru

Швецов Семен Васильевич

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: 89040708125@yandex.ru

Кульневич Евгений Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Студент электромеханического факультета ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-19.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Plaksin Alexey Vladimirovich

The West Siberian railway – branch of JSC «RZD».
12, Vokzalnaya Magistral, Novosibirsk, 630004, the Russian Federation.
Leading engineer of road fuel and energy centre.
Phone: +7-913-746-38-71.
E-mail: Plaksin.av@mail.ru

Shvetsov Semen Vasilyevich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.
Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the department «Rolling stock of electric railways» OSTU.
Phone: +7 (3812) 31-34-19
E-mail: 89040708125@yandex.ru

Kulnevich Eugeny Sergeyevich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.
Student of the Electromechanical faculty of the OSTU.
Phone: (3812) 31-34-19.

А. С. Анисимов

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

РАБОТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК, ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АВТОНОМНЫХ ЛОКОМОТИВОВ

В статье представлены результаты математического моделирования действительных циклов тепловозных дизелей, работающих как на традиционном дизельном топливе, так и на альтернативном – смеси дизельного топлива и природного газа. Представлены математические модели равновесных концентраций продуктов сгорания углеводородного топлива, взаимовлияния дизеля и агрегатов системы наддува, которые могут быть встроены в бортовые системы контроля параметров работы тепловозов с целью расширения их функциональных возможностей для принятия управляющих решений по повышению эффективности работы локомотивов.

Ключевые слова: тепловозный дизель, математическое моделирование, закон сгорания, продукты сгорания топлива, система наддува.

Alexandr S. Anisimov

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

WORK POWER PLANT, AUXILIARY SYSTEMS AND AUTONOMOUS EFFICIENCY OF LOCOMOTIVES

The article presents the results of mathematical modeling of real cycles diesel locomotive engines, working both on traditional diesel fuel and alternative-a mixture of diesel fuel and natural gas. Presents the mathematical models of the equilibrium concentrations of the products of combustion of hydrocarbon fuel, diesel engine and the interferences of supercharging system units that can be built into the side of the control system parameters of diesel locomotives, with a view to extend their functionality for making control solutions to enhance the efficiency of the locomotives.

Keywords: diesel, mathematical modeling, the act of combustion, products of combustion of fuel, pressurization.

Современный локомотив является достаточно сложной системой, в состав которой входят силовая энергетическая установка, тяговые электрические

машины и аппараты, экипажная часть, а также множество вспомогательных систем, обеспечивающих продолжительную непрерывную работу локомотива, контроль параметров и сбор данных о работе узлов и систем.

За последние годы промышленностью выпущен ряд новых серий магистральных и маневровых тепловозов – 2(3)ТЭ25КМ(А, АМ), ТЭП70БС, ТЭМ18ДМ, ТЭМ14, оснащенных новыми или глубоко модифицированными, более экономичными и экологичными дизельными двигателями, тяговыми электрическими машинами и аппаратами и системами микропроцессорного управления их работой.

Серьезный шаг сделан в части оснащения локомотивов бортовыми системами регистрации параметров работы – «БОРТ», «РПРТ», «РПДА-Т», «АСК-ВИС», направленными в первую очередь, на недопущение несанкционированного слива топлива из бака тепловоза.

Созданы локомотивы ГТ-1, ГТ-1h, ТЭМ19, силовые установки которых работают на альтернативном дизельному топливе – природном газе, что позволит после постановки их на серийное производство значительно сократить потребление углеводородного топлива и существенно снизить количество вредных выбросов в окружающую среду. Очевидно, что внедрение всего выше сказанного позволяет повысить эффективность эксплуатации, экономичность и экологичность автономного тягового подвижного состава.

Сегодня в эксплуатации находится около 20 тысяч секций тепловозов. Заменить такое количество локомотивов на новые, на газотурбовозы и газотепловозы выльется в долговременный и достаточно затратный процесс. Что касается оснащения тепловозов бортовыми системами контроля – это тоже дорогое удовольствие ценой в 300 – 400 и более тысяч рублей. К тому же порой в таких системах практически отсутствуют механизмы обработки информации, получаемой при контроле параметров работы – нет управляющих решений после проведения контроля.

Частично первую проблему можно было бы решить конвертированием дизелей эксплуатируемых сегодня магистральных и маневровых тепловозов в двухтопливный двигатель с комбинированным смесеобразованием с высокой степенью сжатия и воспламенением от запальной дозы жидкого (дизельного) топлива. Снижение же стоимости бортовых систем контроля возможно за счет

оптимизации контролируемых параметров, а соответственно и уменьшением количества датчиков первичных сигналов.

Нужно отметить, что создание тепловозов с дизелями, конвертированными в двухтопливный двигатель не нова. Еще в конце 80-х годов прошлого столетия Луганским тепловозостроительным заводом были построены опытные магистральные тепловозы: два 2ТЭ10Г и один – 2ТЭ116Г [1]. В 1998 году на Брянском машиностроительном заводе были построены два маневровых газотепловоза ТЭМ18Г. Имеется опыт перевода дизеля тепловоза ЧМЭЗГ на работу на природном газе. Опыт эксплуатации этих локомотивов привел к тому, что в 2003 году по указанию МПС был разработан проект комплексной программы, включающей в себя мероприятия по переоборудованию тепловозов для работы на природном газе, газоснабжению и развитию деповского хозяйства. Были выбраны участки 12 железных дорог, определены 73 депо с эксплуатационным парком 1504 единицы магистральных тепловозов и 2089 единиц маневровых тепловозов, которые с учетом имеющихся технических решений могут быть переведены на газомоторное топливо. К сожалению, программа так и не была реализована.

Также было установлено, что применение природного газа для дизелей тепловозов вызывает значительные трудности организации их рабочего цикла, связанные в первую очередь с неудовлетворительной самовоспламеняемостью, а также по выбору процентного соотношения замещения дизельного топлива альтернативным (природным газом).

Решением поставленных проблем является широкое внедрение математических моделей, как для исследования влияния многочисленных эксплуатационных и конструктивных факторов на технико-экономические показатели работы тепловозного дизеля конвертированного в двухтопливный двигатель, так и для обработки поступающей информации от бортовых систем контроля с выработкой решений по дальнейшей эксплуатации локомотива. Причем математические модели должны быть реализованы на минимально необходимом, но в достаточном объеме информационном сопровождении.

Математическое моделирование рабочего цикла дизеля тепловоза конвертированного в двухтопливный двигатель заключается в определении термодинамических параметров, позволяющих сформировать виртуальную индикаторную диаграмму с целью определения средних индикаторного и

эффективного давлений для всех возможных эксплуатационных режимов работы тепловоза.

В такой математической модели расчет процесса сгорания топлива ведется с использованием закона сгорания, тем самым удастся рассчитать значения давления газов в цилиндре дизеля для каждого угла поворота коленчатого вала двигателя и получить индикаторную работу цикла. В качестве закона сгорания был выбран закон сгорания Вибе [2], представляющий собой полуэмпирическое уравнение, содержащее два формальных параметра: продолжительность и показатель характера сгорания. Проверка закона сгорания Вибе на пригодность его применения для тепловозных дизелей была выполнена на основе опытных индикаторных диаграмм дизелей ПД1М и 2А-5Д49, из которых были взяты экспериментальные данные по скоростям выделения теплоты (рис. 1), и показала, что процесс сгорания хорошо подчиняется закономерности, выраженной уравнением выгорания топлива Вибе.

Кроме этого, в математическую модель был включен расчет теплоотдачи в камере сгорания, в котором передача теплоты от газов в систему охлаждения дизеля определяется на основе уравнения Вошни, а коэффициент эффективности сгорания топлива рассчитывается, как и давление газов, для каждого угла поворота коленчатого вала в процессе сгорания, а не принимается постоянной величиной.

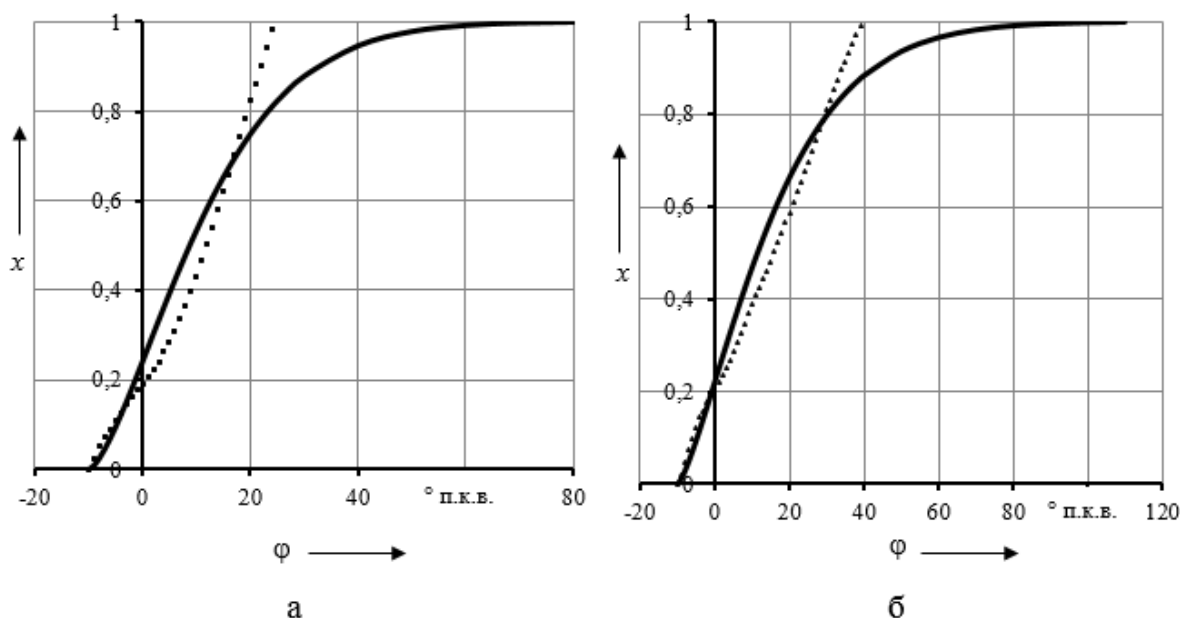


Рис. 1. Опытные и теоретические характеристики выгорания топлива в цилиндре дизеля: а – 2А-5Д49, б – ПД1М

Учитывается в математической модели и влияние на теплоемкость газов не только температуры, но коэффициента избытка воздуха, доли альтернативной добавки к дизельному топливу и доли, выгоревшего к данному моменту времени, топлива.

С целью установления возможных интервалов изменения формальных параметров закона сгорания Вибе была выполнена оценка степени влияния их на параметры рабочего цикла, для чего были рассчитан ряд рабочих циклов тепловозного дизеля (рис. 2).

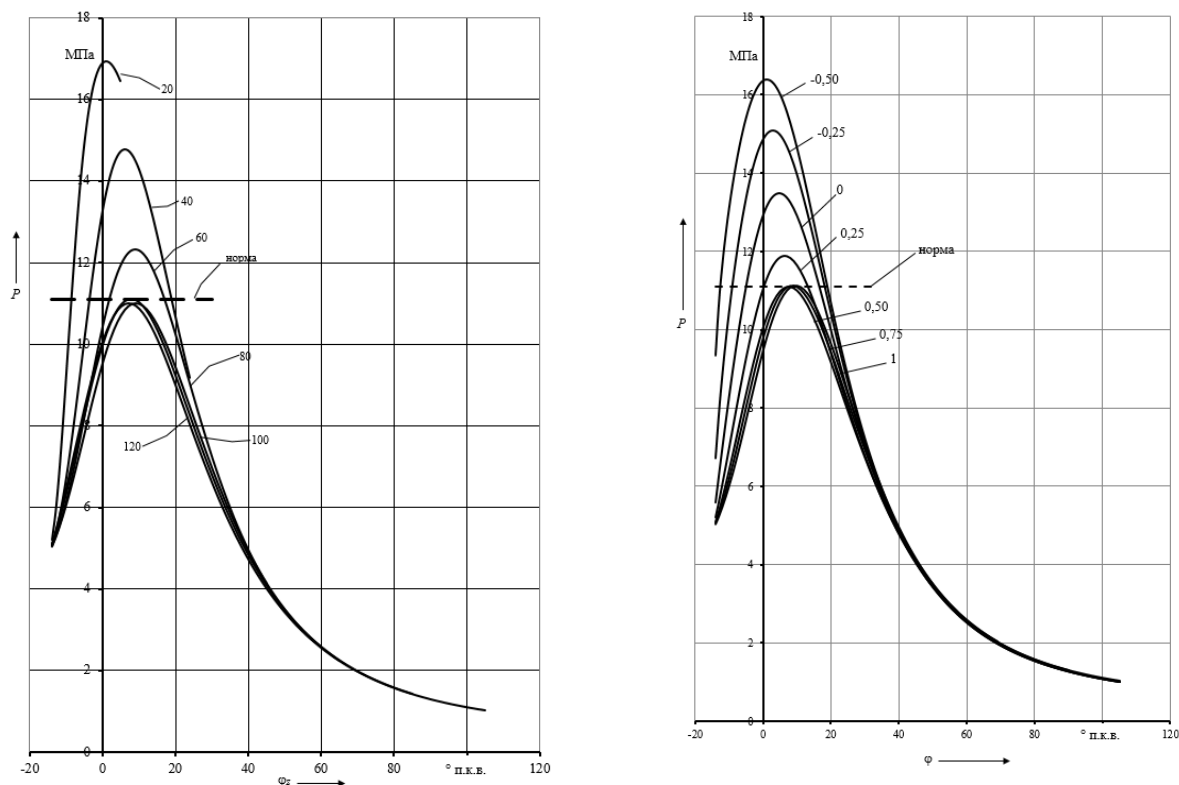


Рис. 2. Диаграммы изменения давления газов в цилиндре дизеля в зависимости от значений формальных параметров закона Вибе

Так как, для воспламенения природного газа в двухтопливном двигателе необходима порция запального (дизельного) топлива, то в математической модели предусмотрен учет изменения периода задержки воспламенения топлива. Для этого в модель введено уравнение [3], связывающее задержку воспламенения с давлением и температурой в момент впрыскивания порции запального (дизельного) топлива в камеру сгорания.

Алгоритм реализации математической модели основан на сравнении значения среднего эффективного давления, полученного из виртуальной

индикаторной диаграммы, со значением среднего эффективного давления, определенного по энергетическим и конструктивным параметра двигателя (эффективной мощности и частоты вращения вала дизеля, рабочего объема и числа цилиндров, тактности двигателя).

Для подтверждения адекватности результатов моделирования было проведено их сопоставление с данными, полученными из опытных индикаторных диаграмм при проведении стендовых испытаний дизелей типа 2А-5Д49 и реостатных испытаний дизелей ПД1М и 10Д100 для различных режимов их нагружения. На диаграммах (рис. 3) видно хорошее совпадение опытных и расчетных значений давления газов в процессе сгорания.

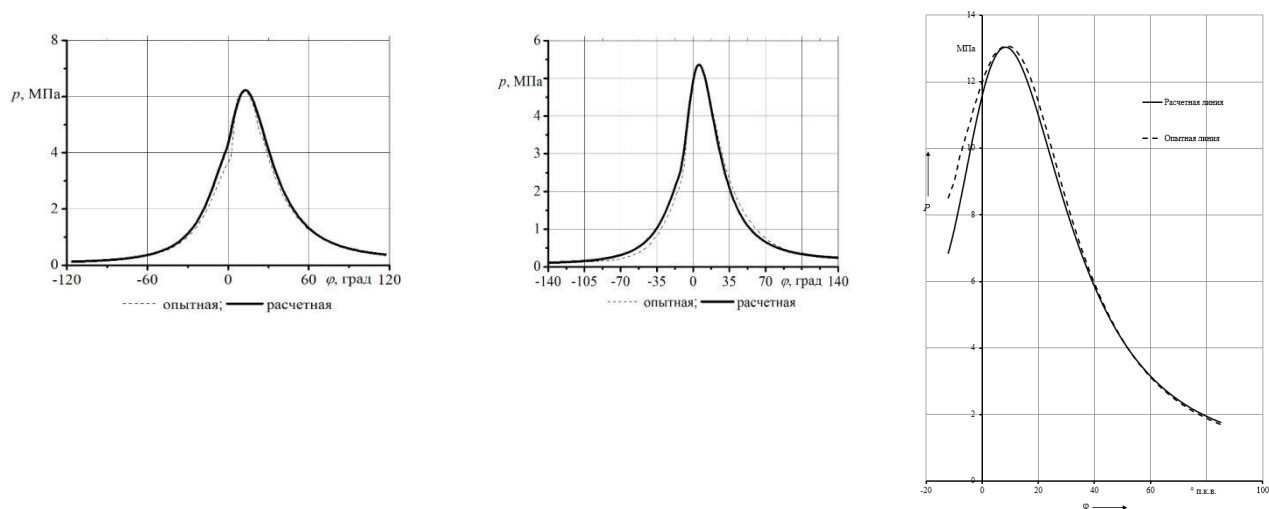


Рис. 3. Сравнение опытных и расчетных индикаторных диаграмм

Математическое моделирование позволило установить влияние доли природного газа в смеси с дизельным топливом, угла опережения подачи и задержки воспламенения топлива на формальные параметры законы сгорания Вибе, получить значения скорости и вид закона сгорания смесового топлива. В целом можно считать, что конвертирование тепловозного дизеля в двухтопливный двигатель не приведет с существенным конструктивным переделкам, а основные термодинамические параметры при использовании природного газа в качестве добавки к дизельному топливу практически не отличаются от параметров работы двигателя по дизельному циклу. Экономичность двухтопливного двигателя будет выше за счет применения более калорийного газового топлива.

Для оценки сгорания топлива в цилиндрах тепловозного дизеля разработана математическая модель, позволяющая определить состав отработавших газов. В основу модели положен расчет равновесных концентраций продуктов сгорания углеводородного топлива [4], которые, как известно, зависят от температуры и давления реагирующих веществ.

В этом случае, исходные данные берутся из полученной ранее индикаторной диаграммы, и рассчитанной в зависимости от давления газов температуры. На состав продуктов сгорания, кроме этого, будут оказывать влияние вид углеводородного топлива, тип и параметры настройки двигателя и условия эксплуатации локомотивов. Математическая модель включает в себя уравнения химического равновесия, уравнения материального баланса и уравнение Дальтона, устанавливающее связь между полным давлением смеси и парциальными давлениями отдельных компонентов:

$$\left\{ \begin{aligned} &\alpha(P_{CO_2} + P_{CO} + P_C + 2P_{C_2} + P_{CH_4} + P_{COS} + P_{CN} + P_{CH} + P_{CH_2} + P_{CH_3} + P_{HCO} + \\ &+ P_{H_2CO} + 2P_{C_2H} + 2P_{C_2H_2} + P_{HCN} + P_{CS_2}) = \alpha_p(2P_{O_2} + P_O + 3P_{O_3} + P_{OH} + P_{H_2O} + \\ &+ 2P_{CO_2} + P_{CO} + P_{NO} + 2P_{NO_2} + P_{COS} + P_{HCO} + P_{H_2CO} + P_{SO} + 2P_{SO_2} + 3P_{SO_3} + P_{S_2O}); \\ &\beta_p(P_N + 2P_{N_2} + P_{NO} + P_{NO_2} + P_{CN} + P_{NH_3} + P_{HCN} + P_{NS}) = 2P_{O_2} + P_O + 3P_{O_3} + P_{OH} + \\ &+ P_{H_2O} + 2P_{CO_2} + P_{CO} + P_{NO} + 2P_{NO_2} + P_{COS} + P_{HCO} + P_{H_2CO} + P_{SO} + 2P_{SO_2} + 3P_{SO_3} + P_{S_2O}; \\ &\gamma_p(P_H + 2P_{H_2} + P_{OH} + 2P_{H_2O} + 4P_{CH_4} + P_{CH_3} + 2P_{CH_2} + 3P_{CH_3} + P_{HCO} + 2P_{H_2CO} + \\ &+ P_{C_2H} + 2P_{C_2H_2} + 3P_{NH_3} + P_{HCN} + P_{HS} + 2P_{H_2S}) = P_C + 2P_{C_2} + P_{CO} + P_{CO_2} + P_{CH_4} + \\ &+ P_{COS} + P_{CN} + P_{CH} + P_{CH_2} + P_{CH_3} + P_{HCO} + P_{H_2CO} + 2P_{C_2H} + 2P_{C_2H_2} + P_{HCN} + P_{CS_2}; \\ &S_p(P_C + 2P_{C_2} + P_{CO} + P_{CO_2} + P_{CH_4} + P_{COS_3} + P_{CN} + P_{CH} + P_{CH_2} + P_{CH_3} + \\ &+ P_{HCO} + P_{H_2CO} + 2P_{C_2H} + 2P_{C_2H_2} + P_{HCN} + P_{CS_2}) = P_{COS} + P_S + 2P_{S_2} + P_{SO} + \\ &+ P_{SO_2} + P_{SO_3} + 2P_{S_2O} + P_{HS} + P_{H_2S} + P_{NS} + 2P_{CS_2}; \\ &P_j = P_O + P_H + P_C + P_N + P_S + P_{O_2} + P_{O_3} + P_{H_2} + P_{OH} + P_{H_2O} + \\ &+ P_{CO} + P_{CO_2} + P_{C_2} + P_{CH_4} + P_{N_2} + P_{NO} + P_{NO_2} + P_{COS} + P_{CN} + \\ &+ P_{CH} + P_{CH_2} + P_{CH_3} + P_{HCO} + P_{H_2CO} + P_{C_2H} + P_{C_2H_2} + P_{NH_3} + \\ &+ P_{HCN} + P_{S_2} + P_{SO} + P_{SO_2} + P_{SO_3} + P_{S_2O} + P_{HS} + P_{H_2S} + P_{NS} + P_{CS_2}. \end{aligned} \right. \quad (1)$$

Количество рассчитываемых компонентов устанавливается условиями поставленной задачи. Так, для определения качественной оценки полноты сгорания топлива предложено рассчитывать состав отработавших газов из 11

компонентов полного и неполного сгорания. Если же решаются задачи экологического характера, то состав может быть существенно расширен (до 18 и более компонентов).

Возвращаясь к бортовым системам контроля параметров работы локомотивов, нужно отметить, что контроль работы агрегатов системы наддува тепловоза – турбокомпрессора, охладителя наддувочного воздуха, воздушных фильтров и воздухопроводов, ограничивается измерением частоты вращения вала турбокомпрессора или давлением наддува (и то не во всех системах). А ведь именно от работы этих агрегатов во многом зависит эффективность, надежность и экономичность работы дизеля тепловоза. Занос проточной части газовой турбины турбокомпрессора и выхлопного коллектора сажевыми отложениями, загрязнения воздушных фильтров, поверхностей теплообмена воздухоохладителя и воздушного коллектора приводят к повышению удельного расхода топлива до 18 %, возникновению помпажа, излому лопаток компрессора и выходу из строя агрегатов наддува. Целесообразно в бортовых системах контроля использовать математическую модель, которая на основе контроля ряда параметров и результатов моделирования рабочего процесса, позволила бы отслеживать отклонения параметров агрегатов системы наддува от их паспортных (нормативных) значений. Такая модель создана на основе метода малых отклонений параметров процесса от их исходных значений на заданном режиме работы двигателя, широко применяемого для авиационных газотурбинных двигателей и для судовых дизелей [5, 6]. Обоснованность применения данного метода, продиктована тем, что на основе обычных методов расчета заранее трудно оценить всю цепь изменения параметров рабочего процесса, вызванных изменением эффективности агрегатов системы наддува. Основные уравнения, связывающие между собой малые отклонения параметров двигателя и агрегатов наддува, для каждого нагрузочного режима дизеля получены путем дифференцирования исходных уравнений, описывающих рабочие процессы дизеля и агрегатов наддува:

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta T_K = k_1 k_2 \delta \pi_K - k_2 \delta \eta_K; \\ \delta G_K = (1 - k_1 k_2) \delta \pi_K + k_2 \delta \eta_K; \\ \delta G_B = k_\varphi k_\psi \delta P_{KT} + k_6 \delta \pi_K + k_7 \delta \eta_K; \\ \delta \pi_T = \frac{1}{k_8} (k_1 \delta \pi_K - \delta T_T - \delta \eta_K - \delta \eta_T); \\ \delta G_T = \delta \pi_T - 0,5 \delta T_T + \delta F_c; \\ \delta G_B = 0,5 k_8 \delta \pi_T + k_y \delta \eta_K + \delta F_c + 0,5 \delta \eta_T; \\ \delta T_s = k_1 k_2 \delta \pi_K - k_2 \delta \eta_K; \\ \delta B_T = \delta G_B + k_9 \delta T_T - (k_9 - 1) \delta T_s. \end{array} \right. \quad (2)$$

Изменения в работе агрегатов системы наддува оцениваются по результатам выходных параметров работы дизеля тепловоза, которые получают опытным путем в совокупности с моделированием рабочего цикла энергетической установки локомотива. Представленная система уравнений позволяет по известным отклонениям контролируемых параметров работы тепловоза (давление и температура наддувочного воздуха, давление и температура газа перед турбиной, расход воздуха) определить отклонения параметров агрегатов системы наддува (КПД компрессора и турбины, площади проходного сечения диффузора компрессора и соплового аппарата турбины ТК, степени охлаждения наддувочного воздуха) и расхода топлива дизелем от их исходных значений.

В заключении хотелось бы отметить, что математические модели постоянно совершенствуются. Так, например, сейчас проходит тестирование модель теплового расчета, в которой сгорание топлива представляет собой двухфазный процесс выделения тепла на основе закона сгорания Пугачева. Ведется разработка модели, которая свяжет воедино результаты моделирования виртуальной индикаторной диаграммы, равновесных концентраций продуктов сгорания с данными бортовых систем контроля параметров для определения эффективной мощности дизеля, отбора мощности на привод вспомогательного оборудования и потерь в тяговом генераторе тепловоза.

Список литературы

1. Фофанов, Г. А. Альтернативные виды топлива на подвижном составе железнодорожного транспорта / Г. А. Фофанов, Д. Н. Григорович, А. С. Нестрахов; Под ред. Г. А. Фофанова // Труды ОАО «ВНИИЖТ. – М.: Интекст, 2008. – 144 с.
2. Вибе, И. И. Новое о рабочем цикле двигателей / И. И. Вибе. – М., Свердловск, 1962. – 271 с.
3. Кавтарадзе, Р. З. Теория поршневых двигателей: Специальные главы / Р. З. Кавтарадзе. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 720 с.
4. Звонов, В. А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания / В. А. Звонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 159 с.
5. Черкез, А. Я. Инженерные расчеты газотурбинных двигателей методом малых отклонений / А. Я. Черкез. – М.: Машиностроение, 1965. – 354 с.
6. Межеричкий, А. Д. Турбокомпрессоры судовых дизелей / А. Д. Межеричкий. – Л.: Судостроение, 1971. – 192 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Анисимов Александр Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы» ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-34-17.

E-mail: anisimovas1971@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anisimov Alexandr Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Candidate of Engineering Sciences, Associate

Professor of the department «Locomotives» OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-34-17.

E-mail: anisimovas1971@mail.ru

Научное издание

ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ
ЛОКОМОТИВНОГО ПАРКА И ПОВЫШЕНИЕ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЯГИ ПОЕЗДОВ

Материалы IV всероссийской
научно-технической конференции
с международным участием
(8 ноября 2018 г.)

Ответственный за выпуск Е. В. Пономарев

* * *

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 23.11.2018. Формат $60 \times 84 \frac{1}{16}$.
Плоская печать. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 14,0. Уч.-изд. л. 15,6.
Тираж 300 экз. Заказ

* *

Типография ОмГУПСа

*

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35