

научно-технический

ISSN 2220-4245
журнал

ИЗВЕСТИЯ

№ 3(39)

2019

Транссиба



РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

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

EDITORIAL BOARD

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

- Волчек Т. В., Мельниченко О. В., Линьков А. О. Математическое моделирование энергоэффективной системы ослабления поля тяговых электрических двигателей электропоездов переменного тока.....2
- Нехаев В. А., Николаев В. А., Смалев А. Н., Ведрученко В. Р. К оценке мощности локомотива.....14
- Литвинцев В. Г., Раевский Н. В., Ларченко А. В. Реализация модели прогнозирования электропотребления на тягу поездов на основе метода интервальной регрессии.....31
- Тэттэр В. Ю., Тэттэр А. Ю., Корнейчук И. Л., Бородин А. В. Математические модели дефектов роторных механизмов подвижного состава в частотной и временной областях.....39
- Филиппов В. М., Сидоров О. А., Стулаков С. А. К вопросу изнашивания элементов контактных пар устройств токосъема электрического транспорта при высокоскоростном движении.....49
- Черемисин В. Т., Никифоров М. М., Вильгельм А. С. Оценка потенциала повышения энергоэффективности Московского центрального кольца за счет применения выпрямительно-инверторных преобразователей.....57
- Хусаинов Е. К., Кондратьев Ю. В. Методика определения уставок защиты контактной сети постоянного тока в вынужденном режиме с использованием короткозамыкателя КЗКС-3,3.....68
- Сахаров П. А. Оценка влияния параметров силовых характеристик поглощающих аппаратов на силы между вагонами поезда.....78
- Ступицкий В. П., Худонов И. А., Тихомиров В. А., Лобанов О. В. Определение остаточной несущей способности металлических конструкций контактной сети.....88
- Смердин А. Н., Томилов В. В., Павлов В. М. Совершенствование методики определения нагрузочных показателей токоприемников магистрального электроподвижного состава.....99

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

- Клычева Н. А., Прокофьева Е. С. Эффективность внедрения цифровых моделей в области грузовых перевозок.....110
- Соколов М. М. Локализация отказов в аппаратуре релейного конца станционной рельсовой цепи тональной частоты.....118

Совершенствование промышленных теплосистем, теплотехнического и теплового оборудования

- Юшков Н. В., Губарев В. Я. Методика исследования эффективности очистки доменного газа в полых форсуночных прямоточных скрубберах.....126

Электрические станции и электроэнергетические системы

- Петрова Е. В. Оценка влияния солнечной радиации на нагрузочные потери активной мощности в высокотемпературных и самонесущих изолированных проводах линий электропередачи.....134

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

Учредитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Омский государственный университет путей сообщения

(ОмГУПС (ОмИИТ))

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35

УДК 629.423.1

Т. В. Волчек, О. В. Мельниченко, А. О. Линьков

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

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ОСЛАБЛЕНИЯ ПОЛЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВОЗОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Аннотация. В данной статье описана штатная система ослабления поля (ОП) тяговых электродвигателей (ТЭД) контакторно-реостатного типа с использованием индуктивных шунтов (ИШ), выявлены ее недостатки. Разработана и предложена усовершенствованная система ОП ТЭД электровоза переменного тока на базе IGBT-транзисторов. Предложенное решение позволит исключить из силовой цепи медесодержащий ИШ, при этом обеспечит надежную защиту при нестационарных режимах работы электровоза, а также снизит потребление электроэнергии на тягу поездов. Для доказательства преимуществ предложенной системы ОП ТЭД был применен метод сравнительного анализа электромагнитных процессов математических моделей штатной и предлагаемой систем ОП ТЭД электровоза, полученных в среде MatLab Simulink. В результате доказано, что реализация системы ОП ТЭД с применением IGBT-транзисторов с разработанным алгоритмом управления обеспечивает повышение коэффициента мощности электровоза в среднем не менее чем на 4 %, а также значительно снижает пульсацию тока возбуждения ТЭД.

Ключевые слова: электровоз переменного тока, система ослабления поля тяговых электродвигателей, индуктивный шунт, IGBT-транзистор, электроэнергия, коэффициент мощности, энергосберегающий способ управления.

Tatyana V. Volchek, Oleg V. Melnichenko, Aleksey O. Linkov

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

MATHEMATICAL MODELING OF ENERGY EFFICIENT FIELD REDUCTION SYSTEMS OF TRACTION MOTOR FOR AC ELECTRIC LOCOMOTIVES

Abstract. This article describes the standard field reduction system of traction electric motors of a contactor-resistors type using inductive shunts, its drawbacks are revealed. An improved field reduction system of traction electric motors of an AC locomotive based on IGBT transistors has been developed and proposed. The proposed solution will allow to exclude the copper-containing inductive shunt from the power circuit, while providing reliable protection in non-stationary operating modes of the electric locomotive, as well as reduce electricity consumption for train traction. To prove the advantages of the proposed the field reduction system of traction electric motors, a method of comparative analysis of electromagnetic processes of the mathematical model of the standard and proposed systems of the field reduction of traction electric motors of an electric locomotive obtained in the MatLab Simulink environment was applied. As a result, it is proved that the implementation of the field reduction systems of traction electric motors using IGBT transistors with the developed control algorithm provides an increase in the power factor of an electric locomotive on average by at least 4%, and also significantly reduces the ripple current of the traction electric motor.

Keywords: AC electric locomotive, traction motor field reduction system, inductive shunt, IGBT-transistor, electricity, power factor, energy-efficient control method.

Железнодорожный транспорт – один из крупнейших потребителей электроэнергии в России. В общем энергопотреблении железных дорог большую часть составляет расход электроэнергии на тягу поездов. Одной из приоритетных задач Указа Президента Российской Федерации «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» и Белой книги ОАО «РЖД» «Стратегия научно-технического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года» является реализация технологий, которые позволят повысить энергетическую эффективность деятельности «РЖД» [1, 2]. В настоящее время на отечественном электроподвижном составе (ЭПС) для регулирования скорости применяют систему регулирования ОП ТЭД за счет шунтирования обмотки возбуждения (ОВ) резистором с ИШ (далее – штатная система ОП ТЭД) [3]. Устройство штатной системы ОП ТЭД контакторно-

реостатного типа с применением ИШ на отечественных электровозах применяется с 1932 г. и до настоящего времени не изменялось. Был проведен анализ предлагаемых ранее способов и устройств по усовершенствованию системы ОП ТЭД электровозов. Данные системы имеют ряд недостатков, поэтому не нашли применения на производстве [7]. Необходимо усовершенствование системы ОП ТЭД, которое позволит исключить ее недостатки и снизить расход потребляемой электроэнергии.

На рисунке 1 приведена упрощенная принципиальная электрическая схема электровоза переменного тока в режиме тяги со штатной системой ОП ТЭД на примере одной тележки. ОП ТЭД состоит из резисторов ОП (R_1) с промежуточным выводом, резистора постоянной шунтировки (R_0), контакторов ($K1 - K3$), образующих три ступени ОП, и ИШ, предназначенного для облегчения условий коммутации ТЭД при колебаниях напряжения в контактной сети и др. [4]. R_0 предназначен для уменьшения переменной составляющей тока в ОБ и пульсаций магнитного потока ТЭД с целью улучшения условий коммутации [4]. Для получения нескольких ступеней ОП ТЭД электровоза необходимо изменить сопротивление R_1 с помощью $K1 - K3$ [5].

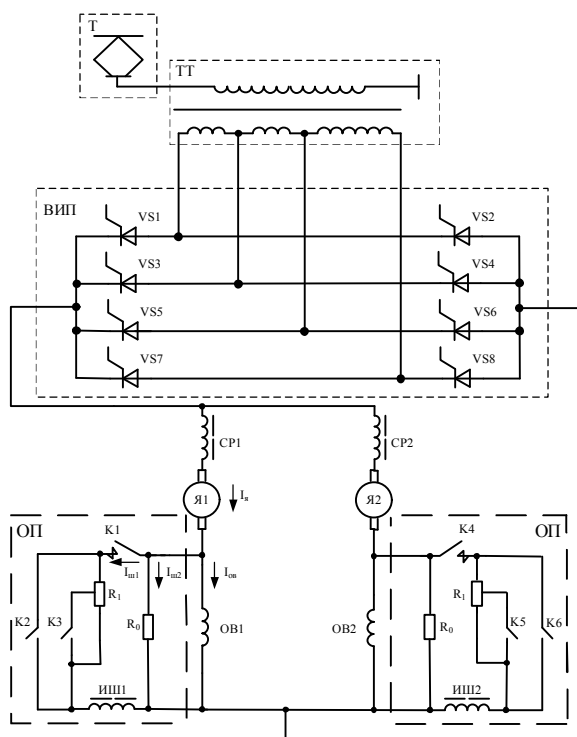


Рисунок 1 – Упрощенная принципиальная электрическая схема электровоза переменного тока в режиме тяги со штатной системой ОП ТЭД на примере одной тележки

В таблице 1 представлен алгоритм управления штатной системой ОП ТЭД согласно рисунку 1.

Таблица 1 – Алгоритм управления штатной системой ОП ТЭД

Режим работы электровоза	Ступень регулирования	Алгоритм включения контакторов		
		K1, K4	K2, K6	K3, K5
Тяга	ОП1	Вкл.	Выкл.	Выкл.
	ОП2	Вкл.	Выкл.	Вкл.
	ОП3	Вкл.	Вкл.	Выкл.

Электромагнитные процессы в ТЭД при работе штатной системы ОП согласно рисунку 1 описываются следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} U_B = C_v \Phi \cdot V + I_{\text{я}} \cdot (r_{\text{я}} + r_c) + I_{\text{ОВ}} \cdot r_{\text{ОВ}} + (L_{\text{я}} + L_c) \cdot \frac{dI_{\text{я}}}{dt} + 2 \cdot p \cdot \sigma \cdot w_{\text{ОВ}} \cdot \frac{d\Phi}{dt}; \\ I_{\text{ОВ}} \cdot r_{\text{ОВ}} - I_{\text{ш1}} \cdot r_{\text{ш1}} - L_{\text{ш}} \cdot \frac{dI_{\text{ш1}}}{dt} + 2 \cdot p \cdot \sigma \cdot w_{\text{ОВ}} \cdot \frac{d\Phi}{dt} = 0; \\ I_{\text{ОВ}} \cdot r_{\text{ОВ}} - I_{\text{ш2}} \cdot r_{\text{ш2}} + 2 \cdot p \cdot \sigma \cdot w_{\text{ОВ}} \cdot \frac{d\Phi}{dt} = 0; \\ I_{\text{я}} = I_{\text{ОВ}} + I_{\text{ш1}} + I_{\text{ш2}}; \\ \Phi = \Phi_1(t) + \Phi_2(t) = \Phi_y \left(1 - \varphi e^{-\frac{t}{\tau_{\text{ВХ}}}} - (1 - \varphi) e^{-\frac{t}{\tau_{\text{ВХ}}}} \right), \end{cases} \quad (1)$$

где C_v – конструктивная постоянная колесно-моторного блока (КМБ), зависящая от параметров ТЭД и тягового редуктора;

Φ – магнитный поток главных полюсов, зависящий от тока возбуждения, Вб;

V – линейная скорость движения поезда, км/ч;

$\varphi = \frac{\Phi'_y}{\Phi_y}$ – отношение установившегося значения магнитного потока основной волны и

суммарного;

σ – коэффициент рассеивания суммарного магнитного потока;

$w_{\text{ОВ}}$ – число витков ОВ;

p – число пар главных полюсов;

$I_{\text{ОВ}}, I_{\text{я}}, I_{\text{ш1}}, I_{\text{ш2}}$ – токи ОВ, обмотки якоря ТЭД, шунтирующей цепи соответственно;

$r_c, r_{\text{ОВ}}, r_{\text{я}}, r_{\text{ш1}}, r_{\text{ш2}}$ – сопротивления сглаживающего реактора, ОВ, обмотки якоря ТЭД и шунтирующей цепи соответственно;

$L_{\text{я}}, L_c, L_{\text{ш}}$ – индуктивность якоря ТЭД, сглаживающего реактора и шунтирующей цепи;

U_B – выпрямленное пульсирующее напряжение;

$$\Phi_y = \frac{\Phi_n}{1,2} \arctg \left(\frac{2,6 \cdot I_B}{I_{\text{ВН}}} \right).$$

Магнитный поток с учетом вихревых токов в сплошном стальном сердечнике раскладывается на ряд пространственных гармоник, амплитуды которых изменяются в функции времени по экспоненциальному закону, поэтому Φ_1 – магнитный поток основной гармоники; Φ_2 – суммарный магнитный поток всех высших гармоник, $\tau'_{\text{ВХ}}, \tau''_{\text{ВХ}}$ – их постоянные времени [3].

Недостатки штатной системы ОП ТЭД электровоза:

переключение с одной ступени ОП ТЭД на другую происходит ступенчато и всегда сопровождается бросками тока электровоза;

из-за значительной стоимости ИШ силовые цепи электровоза часто остаются разобранными, соответственно электровоз лишается возможности регулирования в широком диапазоне скоростных характеристик;

наличие электропневматических контакторов типа ПК-356.

В связи с развитием современной элементной базы появилась возможность усовершенствовать существующую систему ОП ТЭД электровоза. Авторами предлагается замена ИШ полностью управляемым силовым полупроводниковым прибором – IGBT-транзистором [6].

Разработана система ОП ТЭД на основе IGBT-транзисторов с энергосберегающим способом управления [7, 8]. На рисунке 2 представлена упрощенная принципиальная электрическая схема электровоза переменного тока в режиме тяги с предлагаемой системой ОП ТЭД на примере одной тележки. Система ОП ТЭД включает в себя последовательно включенные диод (VD2) и IGBT-транзистор (VT2), параллельно которым включен IGBT-транзистор (VT1). Управление VT1-VT2 осуществляется блоком управления ОП. Диод (VD1), подключенный параллельно якорной обмотке ТЭД (Д1), предназначен для защиты IGBT-транзисторов от выбросов напряжения при коммутации индуктивной нагрузки. Датчик тока (DT1), размещенный в цепи якорной обмотки, служит для измерения тока, протекающего в цепи. В обмотку собственных нужд силового трансформатора для

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

синхронизации блока управления ОП с контактной сетью включен датчик напряжения. При возникновении нестационарного режима VT1-VT2 выключаются, включается контактор (K1) и ТЭД переходит в режим полного поля (ПП).

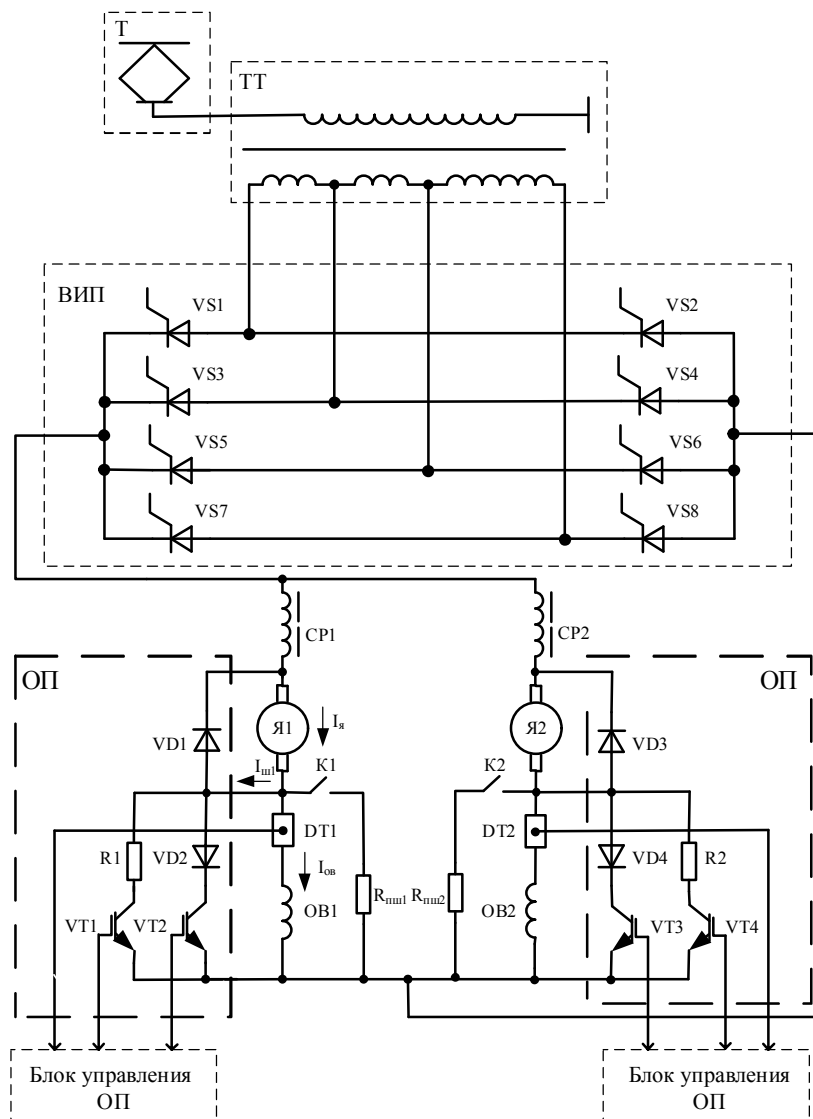


Рисунок 2 – Упрощенная принципиальная электрическая схема электровоза переменного тока в режиме тяги с предлагаемой системой ОП ТЭД на примере одной тележки

Электромагнитные процессы ТЭД при работе предлагаемой системы ОП согласно рисунку 2 описываются следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} U_B = C_V \Phi \cdot V + I_{\text{я}} \cdot (r_{\text{я}} + r_c) + I_{\text{об}} \cdot r_{\text{об}} + (L_{\text{я}} + L_c) \cdot \frac{dI_{\text{я}}}{dt} + 2 \cdot p \cdot \sigma \cdot w_{\text{об}} \cdot \frac{d\Phi}{dt}; \\ I_{\text{об}} \cdot r_{\text{об}} - \Delta U_T - I_{\text{ш1}} \cdot r_T - I_{\text{ш1}} \cdot r_1 + 2 \cdot p \cdot \sigma \cdot w_{\text{об}} \cdot \frac{d\Phi}{dt} = 0; \\ I_{\text{я}} = I_{\text{об}} + I_{\text{ш1}}; \\ \Phi = \Phi_1(t) + \Phi_2(t) = \Phi_y \left(1 - \varphi e^{-\frac{t}{\tau_{\text{вх}}}} - (1 - \varphi) e^{-\frac{t}{\tau_{\text{вх}}}} \right), \end{cases} \quad (2)$$

где ΔU_T – падение напряжения на транзисторе, В;

r_T – динамическое сопротивление транзистора, Ом.

Для исследования электромагнитных процессов штатной системы ОП ТЭД и отработки технического решения по ее усовершенствованию разработана математическая модель электровоза переменного тока в режиме ОП. В современном мире благодаря математическому моделированию удастся ускорить процесс разработки сложных физических моделей. Такой способ позволяет получить результаты для аналитического обоснования идеи, при этом удастся сэкономить время и материальные затраты на теоретический или экспериментальный подходы. Одной из ведущих программ математического моделирования сложных электромагнитных процессов является MatLab. Для моделирования электрических принципиальных схем используется пакет Simulink, интегрированный в MatLab, который содержит библиотеку необходимых блоков [9].

Функциональная схема двухсекционного электровоза переменного тока 2ЭС5К, работающего в тяговом режиме, представлена на рисунке 3 [10, 11]. Схема включает в себя два ТТ (тяговые трансформаторы секций 1 и 2), подключенных к контактной сети (КС) переменного тока частотой 50 Гц и напряжением 25 кВ выводом КС, четыре выпрямительно-инверторных преобразователя (ВИПы 1 – 4), каждый из которых питает по два ТЭД, работающих в режиме ОП (тележки 1 и 2). Тележка и ВИПы соединены между собой через сглаживающий реактор (СР), который в данной структурной схеме включен в блок тележки [12].

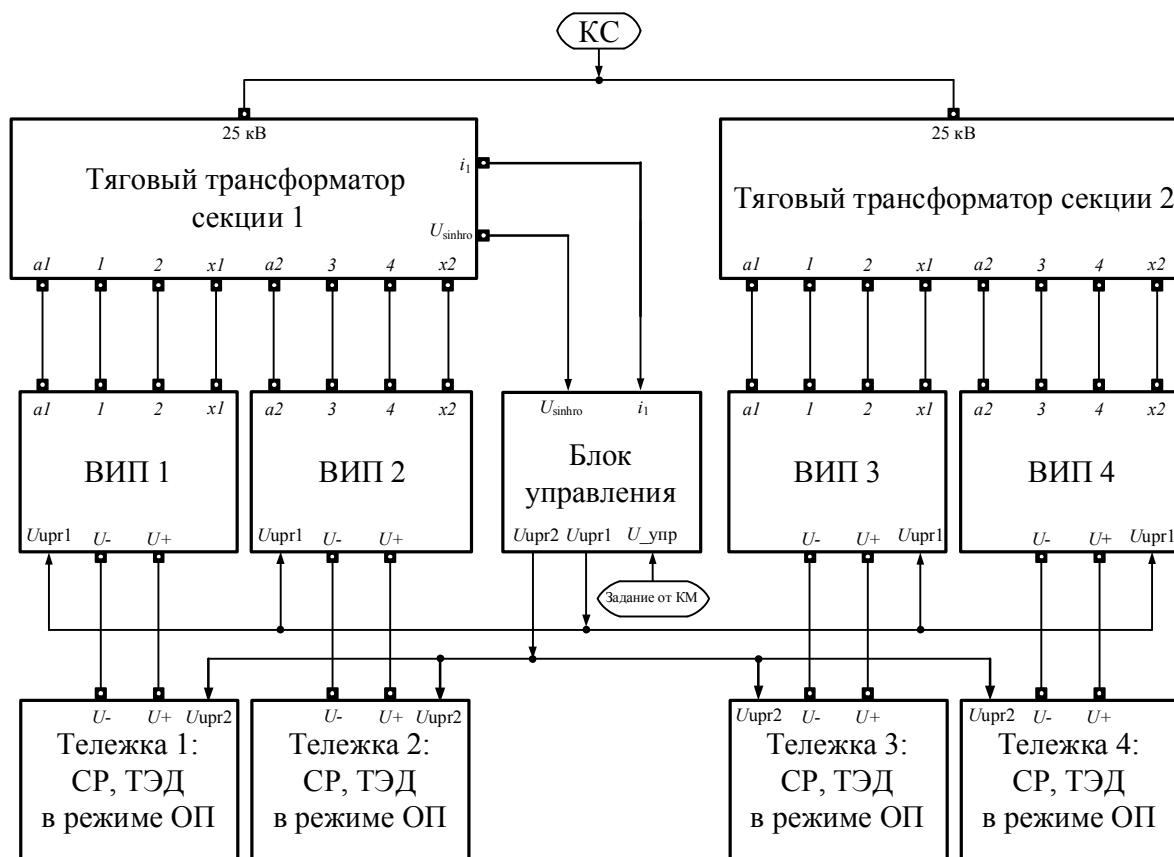


Рисунок 3 – Функциональная схема двухсекционного электровоза 2ЭС5К

С помощью блоков библиотеки Simulink пакета MatLab создана имитационная модель двухсекционного электровоза 2ЭС5К, в которую включены дифференциальные уравнения (1) и (2), описывающие процесс работы ТЭД в режиме ОП.

На рисунке 4 изображена блок-схема тележки электровоза со штатной системой ОП ТЭД, разработанная в среде MatLab Simulink. В качестве ТЭД применяется модель машины постоянного тока DC Machine, имеющаяся в библиотеке SimPowerSystems. Данная модель в работе [13] сравнивалась с разработанной моделью ТЭД, реализованной профессором ДВГУПСа Ю. М. Кулиничем в пакете OrCAD, которая учитывала нелинейность магнитной характери-

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

стики, динамическую индуктивность и вихревые токи. Обе модели отражают переходные процессы, протекающие в двигателе, погрешность которых вполне приемлема для модели. Поэтому принято использовать модель машины постоянного тока из библиотеки SimPowerSystems пакета Simulink. Параллельно ОБ ТЭД устанавливаются резистор постоянной шунтировки ($R_{п.ш}$) и резистор ОП ($R1$) с ИШ (ИШ1). Для получения трех ступеней ОП ТЭД необходимо изменять сопротивление резистора ($R1$).

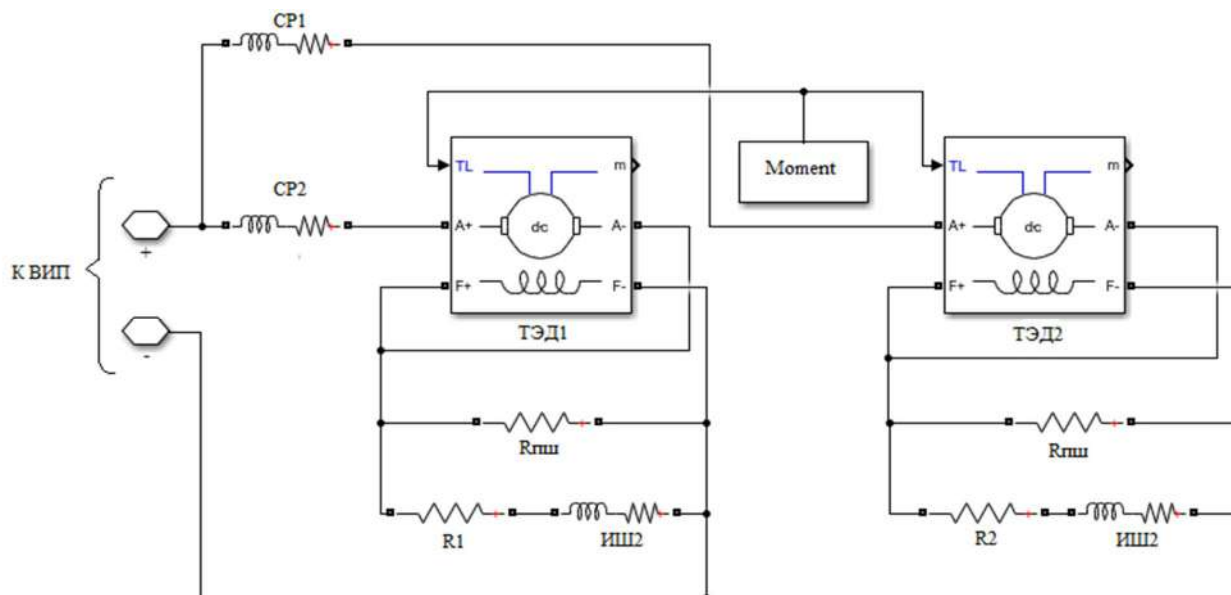


Рисунок 4 – Блок-схема тележки электровоза переменного тока со штатной системой ОП ТЭД в среде MatLab Simulink

На рисунке 5 изображена блок-схема тележки электровоза с предлагаемой системой ОП ТЭД в среде MatLab Simulink.

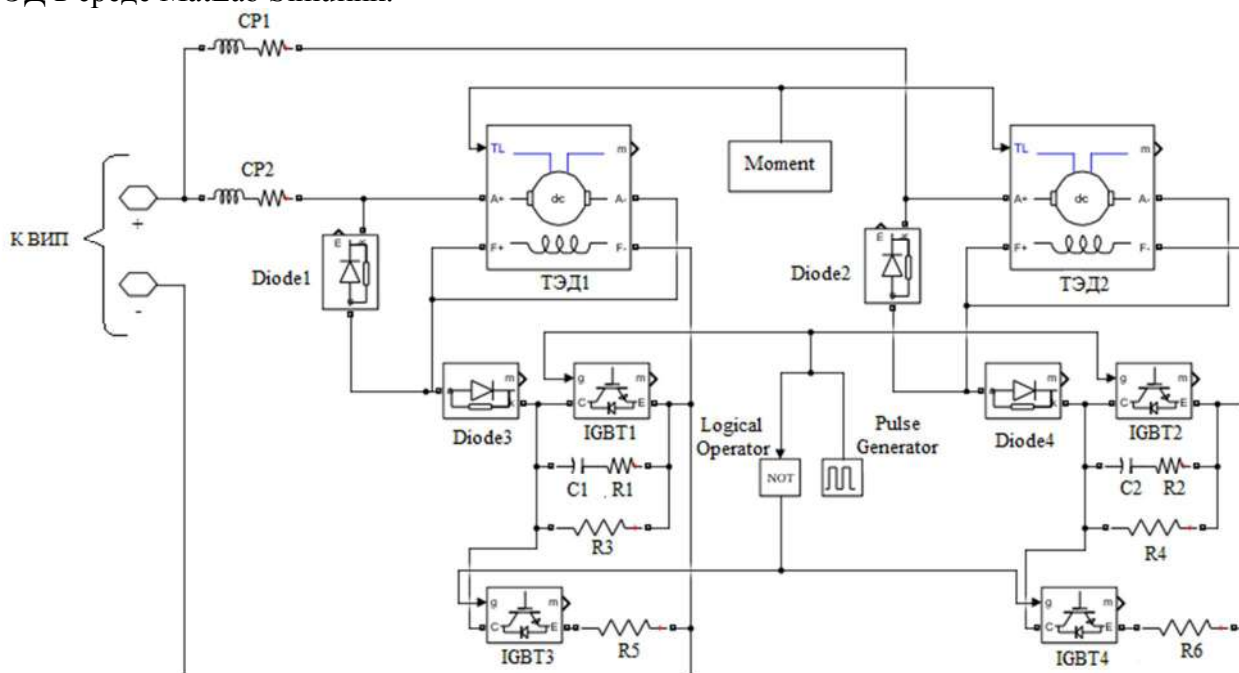


Рисунок 5 – Блок-схема тележки электровоза переменного тока с предлагаемой системой ОП ТЭД в среде MatLab Simulink

Параллельно ОБ ТЭД подключаются диод (Diode 3) и IGBT-транзистор (IGBT 1). Для защиты транзистора к положительной шине питания ТЭД подключается диод (Diode 1). Регулируя величину открытия IGBT 1 с помощью импульсного генератора (Pulse Generator), получаем ОП до 70 %. Для ОП ТЭД от 70 до 43 % параллельно IGBT 1 подключаются последовательно включенные резистор (R5) и IGBT-транзистор (IGBT 3), на который подаются управляющие сигналы в тот момент, когда IGBT 1 выключен.

На разработанной математической модели проведено имитационное моделирование работы электровоза в режиме тяги на четвертой зоне регулирования со штатной и предлагаемой системами ОП ТЭД. Получены диаграммы напряжений, токов сети и ТЭД, а также значения коэффициента мощности.

На рисунках 6 и 7 представлены электромагнитные процессы для первой ступени штатной системы ОП ТЭД электровоза 2ЭС5К, полученные в его имитационной модели в среде MatLab Simulink.

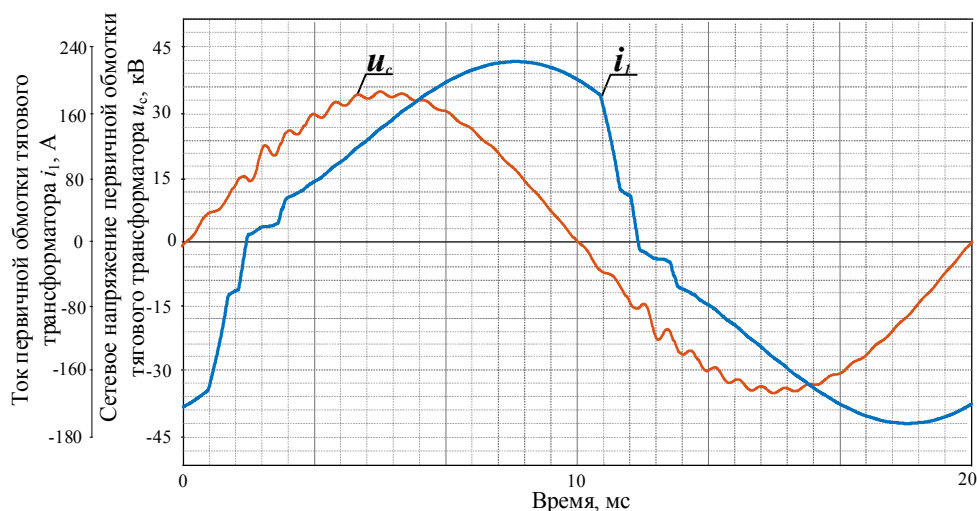


Рисунок 6 – Диаграмма напряжения u_c и тока i_l на первичной обмотке тягового трансформатора для штатной системы ОП ТЭД при работе на первой ступени

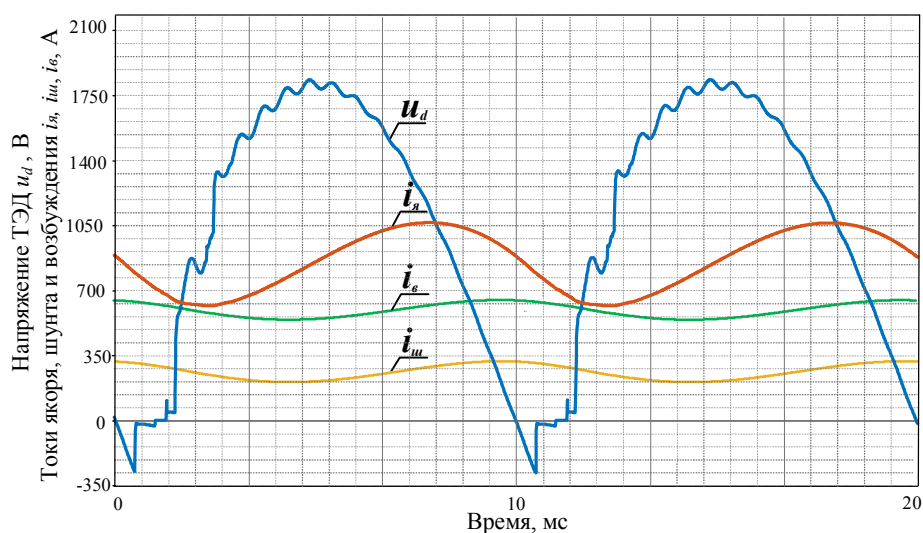


Рисунок 7 – Диаграмма выпрямленного напряжения u_d ТЭД и токов якоря i_a , шунтирующей цепи $i_{ш}$ и возбуждения i_e для штатной системы ОП ТЭД при работе на первой ступени

Регулируя сопротивление R1 согласно рисунку 4 получаем вторую и третью ступени ОП ТЭД, которые имеют аналогичные электромагнитные процессы первой ступени ОП.

На рисунках 8 и 9 представлены электромагнитные процессы для первой ступени предлагаемой системы ОП ТЭД электровоза 2ЭС5К, полученные в его имитационной модели

в среде MatLab Simulink. Первая ступень ОП ТЭД обеспечивается при включении IGBT 1 (рисунок 5), на который система управления формирует импульсы управления по критерию максимального коэффициента мощности электровоза.

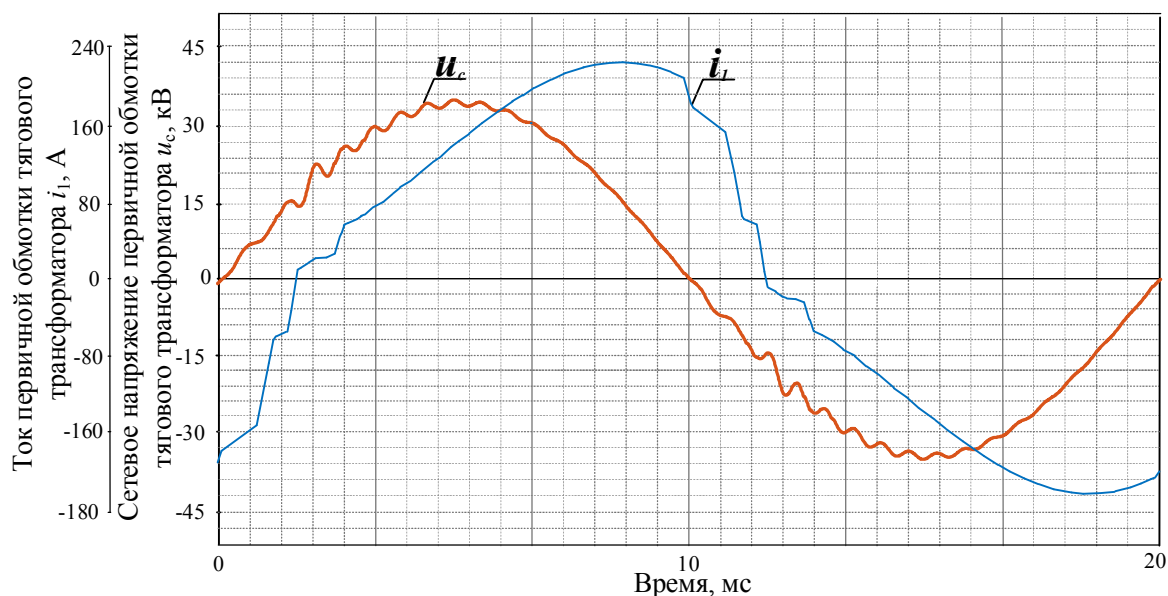


Рисунок 8 – Диаграмма напряжения u_c и тока i_l на первичной обмотке тягового трансформатора для предлагаемой системы ОП ТЭД при работе на первой ступени

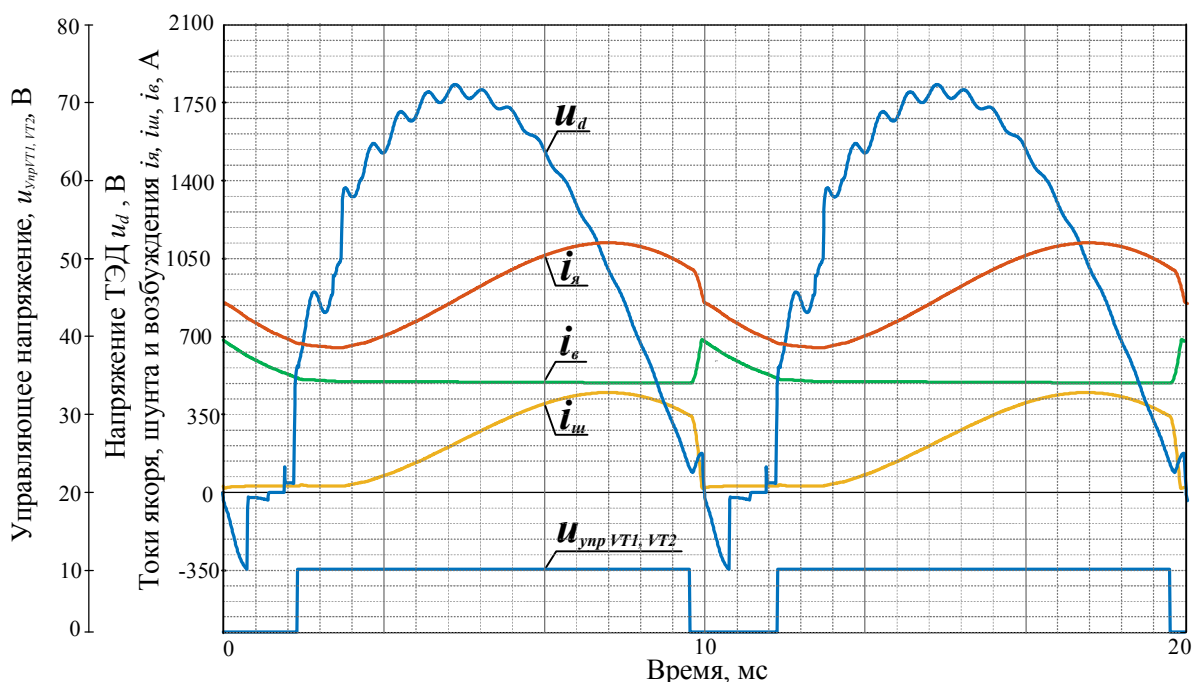


Рисунок 9 – Диаграмма выпрямленного напряжения u_d ТЭД и токов якоря i_a , шунтирующей цепи $i_{ш}$ и возбуждения i_e для предлагаемой системы ОП ТЭД при работе на первой ступени

Вторая и третья ступени ОП ТЭД осуществляются при дополнительном включении IGBT 3 (см. рисунок 5). За счет регулирования ширины импульса, подаваемого на IGBT 1 и 3, обеспечивается плавное регулирование тока возбуждения, при этом его пульсация практически равна нулю. На рисунках 10 и 11 представлены электромагнитные процессы для второй ступени ОП ТЭД, третья ступень ОП аналогична второй ступени.

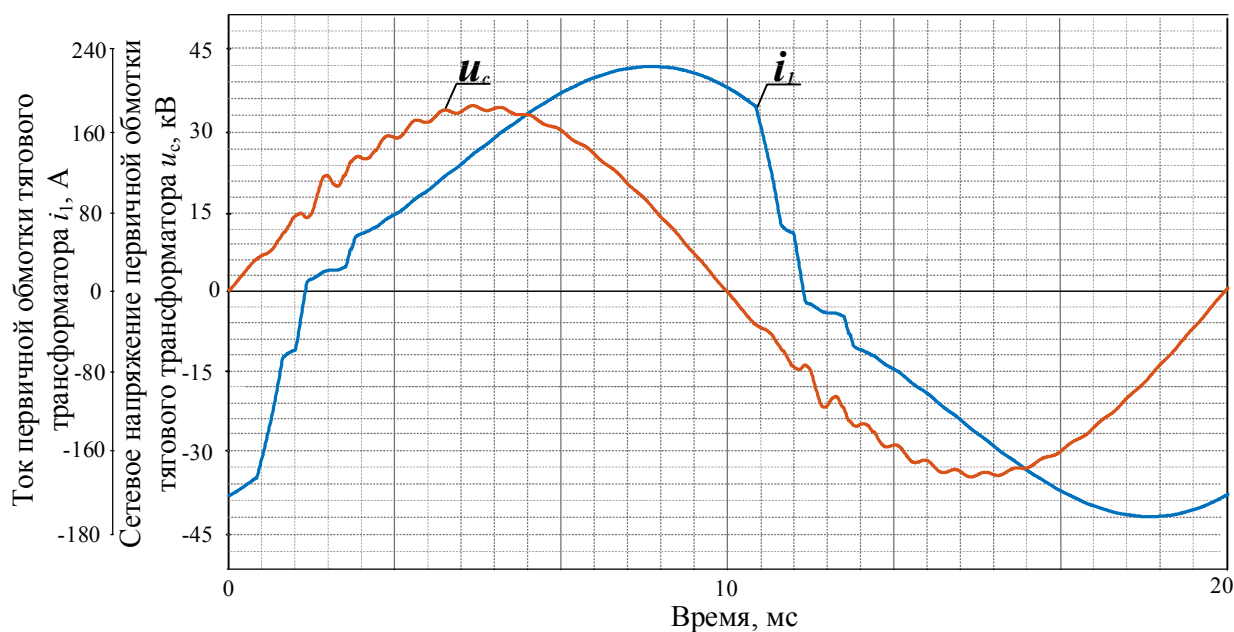


Рисунок 10 – Диаграмма напряжения u_c и тока i_l на первичной обмотке тягового трансформатора для предлагаемой системы ОП ТЭД при работе на второй ступени

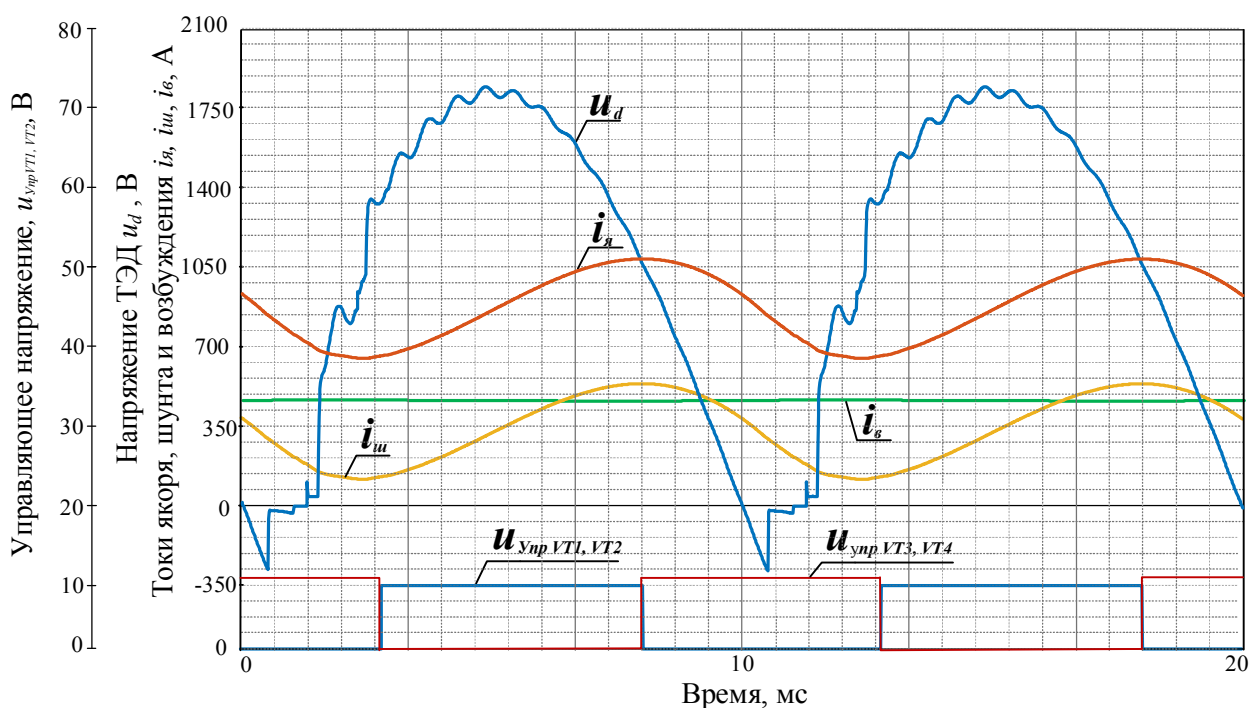


Рисунок 11 – Диаграмма выпрямленного напряжения u_d ТЭД и токов якоря i_a , шунтирующей цепи $i_{ш}$ и возбуждения i_b для предлагаемой системы ОП ТЭД при работе на второй ступени

Для определения коэффициента мощности электровоза производится имитационное моделирование блока его работы в среде MatLab Simulink, а расчет выполняется по цепи первичной обмотки трансформатора согласно формуле:

$$K_M = \frac{\sum_{k=1}^n U_k I_k \cos \varphi_k}{\sqrt{\sum_{k=0}^n U_k^2} \sqrt{\sum_{k=0}^n I_k^2}} = \frac{U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 + \dots + U_k I_k \cos \varphi_k}{\sqrt{U_0^2 + U_1^2 + \dots + U_k^2} \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + \dots + I_k^2}}, \quad (3)$$

где U_0, I_0 – постоянные составляющие напряжения и тока сети;

U_1, I_1 – действующие значения напряжения и тока 1-й гармоники;

U_k, I_k – действующие значения напряжения и тока k -й гармоники;

φ_k – угол сдвига фазы между напряжением и током k -й гармоники.

С помощью данного блока удастся получить коэффициент мощности электровоза в любом режиме его работы.

На рисунке 12 приведены диаграммы токов и напряжения сети при штатной и предлагаемой системах ОП ТЭД. Благодаря энергосберегающему алгоритму управления IGBT-транзисторами удастся уменьшить потребляемый ток сети в его реактивной токовой части по отношению к напряжению. За счет этого по показаниям блока, разработанного в среде MatLab Simulink, коэффициент мощности электровоза повышается в среднем не менее чем на 4 %.

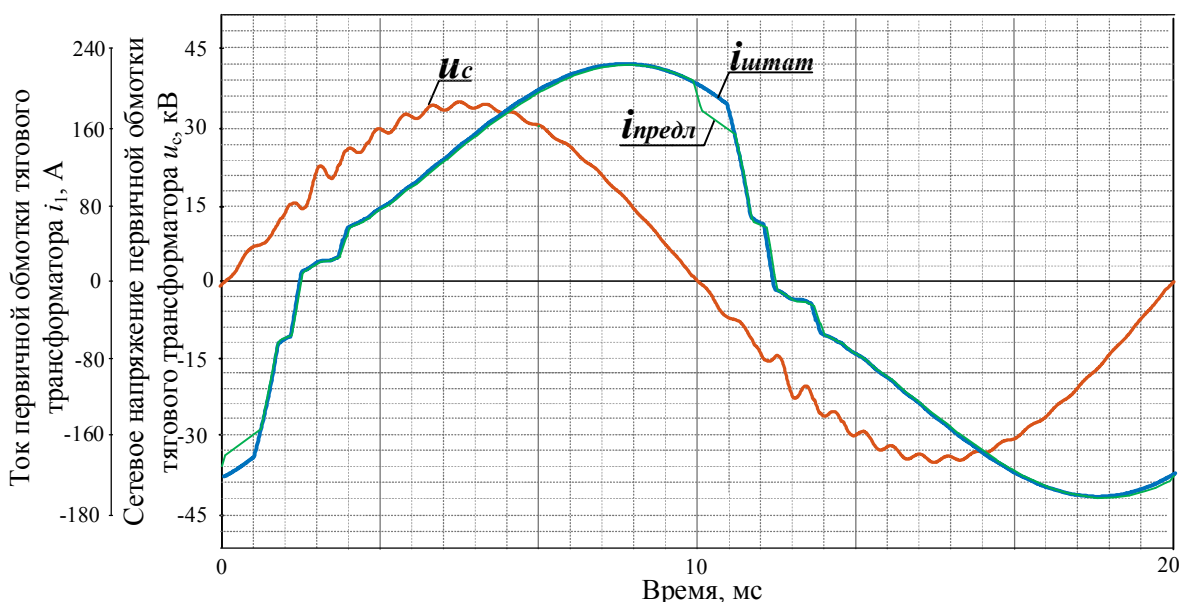


Рисунок 12 – Диаграмма напряжения u_c и токов i_1 на первичной обмотке тягового трансформатора при предлагаемой и штатной системах ОП ТЭД на первой ступени

На основании изложенного можно сделать выводы.

1. Рассмотрена штатная система ОП ТЭД, выявлены ее недостатки, на их основании предложена усовершенствованная система ОП ТЭД на базе IGBT-транзисторов.

2. Разработан алгоритм управления предлагаемой системой ОП ТЭД, который позволит снизить потребление реактивной мощности, тем самым уменьшить количество потребляемой электроэнергии из сети, обеспечить плавное регулирование тока возбуждения.

3. Разработаны имитационные модели электровоза 2ЭС5К, работающего в режиме тяги с реализацией системы ОП ТЭД контакторно-реостатного типа при использовании ИШ и предложенной энергоэффективной системы ОП ТЭД на базе IGBT-транзисторов, получены диаграммы электромагнитных процессов при работе данных схем.

4. Произведен анализ электромагнитных процессов. Предлагаемая система ОП ТЭД позволяет увеличить коэффициент мощности электровоза в среднем не менее чем на 4 %, значительно снизить пульсацию тока возбуждения ТЭД.

5. Усовершенствованная система ОП ТЭД позволяет исключить 16 контакторов, восемь ИШ и восемь резисторов ОП с промежуточными выводами на электровозе 2ЭС5К.

Список литературы

1. Указ Президента РФ от 07.05.2018 № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http:// publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201805070038?index=0&rangeSize=1](http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201805070038?index=0&rangeSize=1) (Дата обращения 25.03.2019).
2. Белая книга ОАО «РЖД» № 769/р от 17.04.2018 «Стратегия научно-технического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.irgups.ru/sites/default/files/irgups/science/document/strategiya_nauchno-tehnologicheskogo_razvitiya_holdinga_rzhd_na_period_do_2025_goda_i_na_perspektivu_do_2030_goda_belaya_kniga_2018.pdf (Дата обращения 25.03.2019).
3. Плакс, А. В. Система управления электрическим подвижным составом: Учебник [Текст] / А. В. Плакс. – М.: Маршрут, 2005. – 360 с.
4. Тихменев, Б. Н. Подвижной состав электрофицированных железных дорог. Теория работы электрооборудования. Электрические схемы и аппараты: Учебник [Текст] / Б. Н. Тихменев, Л. М. Трахтман. – М.: Транспорт, 1980. – 470 с.
5. Тихменев, Б. Н. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями [Текст] / Б. Н. Тихменев, В. А. Кучумов. – М.: Транспорт, 1988. – 312 с.
6. Засорин, С. Н. Электронная и преобразовательная техника: Учебник [Текст] / С. Н. Засорин, В. А. Мицкевич, К. Г. Кучма. М.: Транспорт, 1981. – 319 с.
7. Анализ способов и технических средств ослабления поля тяговых электродвигателей электровозов переменного тока [Текст] / Т. В. Волчек, О. В. Мельниченко, и др. // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: Материалы междунар. науч.-практ. конф. / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск. – 2018. – С. 411 – 415.
8. Снижение затрат электрической энергии на тягу поездов при использовании системы ослабления поля тяговых электрических двигателей электровозов переменного тока [Текст] / Т. В. Волчек, О. В. Мельниченко и др. // Материалы 3-й междунар. науч.-практ. конф. «Resonances science». – Чехия, Карловы Вары. – Россия, Москва, 2018. – С. 81 – 87.
9. Черных, И. В. Моделирование электромеханических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink [Текст] / И. В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб: Питер, 2008. – 288 с.
10. Электровоз 2ЭС5К: Руководство по эксплуатации [Текст] / Новочеркасский электро-возостроительный завод. – Новочеркасск, 2006. – Т. 1. – 249 с.
11. Савоськин, А. Н. Математическое моделирование электромагнитных процессов в динамической системе «контактная сеть – электровоз» [Текст] / А. Н. Савоськин, Ю. М. Кулинич, А. С. Алексеев // Электричество. – 2002. – № 2. – С. 29 – 35.
12. Яговкин, Д. А. Разработка математической модели выпрямительно-инверторного преобразователя на IGBT-транзисторах для электровоза переменного тока и его блока управления в режиме тяги [Текст] / Д. А. Яговкин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск. – 2015. – № 3 (47). – С. 197 – 202.
13. Алексеев, А. С. Система автоматического регулирования тока коллекторных тяговых двигателей электровоза [Текст]: Дис... канд. техн. наук: 05.09.03 / Алексеев Алексей Сергеевич. – М., 2009. – 271 с.

References

1. Decree of the President of the Russian Federation of May 7, 2018, No. 204 «O natsional'nykh tselyakh i strategicheskikh zadachakh razvitiya Rossijskoj Federatsii na period do 2024 go-

da» ("On the national goals and strategic objectives of the development of the Russian Federation for the period up to 2024"). Access point:

<http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201805070038?index=0&rangeSize=1>
(Revised: 25.03.2019).

2. White Paper of JSCo Russian Railways no. 769 / p dated 04.17.2018 «Strategiya nauchno-tekhnicheskogo razvitiya kholdinga «RZHD» na period do 2025 goda i na perspektivu do 2030 goda». ("Strategy of the Scientific and Technical Development of the Russian Railways Holding for the Period up to 2025 and the Prospect until 2030"). Access point:

<https://www.irkups.ru/sites/default/files/irkups/science/document/> (Revised: 25.03.2019).

3. Plaks A. V. *Sistema upravleniya ehlektricheskimi podvizhnymi sostavom* (Electric rolling stock control system. A textbook for universities). Moscow: Route, 2005, 360 p.

4. Tikhmenev B. N., Trakhtman L. M. *Podvizhnoy sostav ehlektricheskikh zheleznikh dorog. Teoriya raboty ehlektrooborudovaniya, ehlektricheskikh skhemy i apparaty* (Rolling stock of electrified railways. Theory of electrical equipment. Electric circuits and devices). Moscow: Transport, 1980, 470 p.

5. Tikhmenev, B. N. *Ehlektrovozy peremennogo toka s tiristornymi preobrazovatelyami* (AC electric locomotives with thyristor converters). Moscow: Transport, 1988, 312 p.

6. Zasorin S. N., Mitskevich V. A., Kuchma K. G. *Ehlektroonnaya i preobrazovatel'naya tekhnika* (Electronic and converting technology). Moscow: Transport, 1981, 319 p.

7. Volchek T. V., Melnichenko O. V., Linkov A. O., Vlashevsky S. V. Analysis of methods and technical means of weakening the field of traction electric motors of alternating current electric locomotives [Analiz sposobov i tekhnicheskikh sredstv oslableniya polya tyagovykh ehlektrodvigatelej ehlektrovozov peremennogo toka]. *Transport Infrastructure of the Siberian Region: materials of the 9th Intern. Scientific practical conf.* Irkutsk, 2018, pp. 411 – 415.

8. Volchek T. V., Melnichenko O. V., Shramko S. G., Linkov A. O. Reducing the cost of electrical energy to train traction when using the system of weakening the field of traction electric motors of alternating current electric locomotives [Snizhenie zatrat ehlektricheskoy ehnergii na tyagu poezdov pri ispol'zovanii sistemy oslableniya polya tyagovykh ehlektricheskikh dvigatelej ehlektrovozov peremennogo toka]. *Proceedings of the Third International Scientific and Practical Conference "Resonances science"*. Czech Republic, Karlovy Vary, Russia, Moscow, 2018, pp. 81 – 87.

9. Chernykh I. V. *Modelirovanie ehlektromekhanicheskikh ustroystv v Matlab, SimPowerSystems i Simulink* (Modeling of electromechanical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink). Moscow: DMK Press; SPb.: Peterburg, 2008, 288 p.

10. *Electric locomotive 2ES5K. Rukovodstvo po ehkspluatacii* (User manual. The mainline electric locomotive 2ES5K), Novocherkassk, 2006, volume 1, 249 p.

11. Savoskin, A. N. Mathematical modeling of electromagnetic processes in a dynamic system contact network – an electric locomotive [Matematicheskoe modelirovanie ehlektromagnitnykh protsessov v dinamicheskoy sisteme kontaktnaya set' - ehlektrovoz]. *Electricity*, 2002, no.2, pp.29–35.

12. Yagovkin D. A. Development of a mathematical model of a rectifier-inverter converter on IGBT transistors for an AC electric locomotive and its control unit in thrust mode [Razrabotka matematicheskoy modeli vypryamitel'no-invertornogo preobrazovatelya na IGBT-tranzistorakh dlya ehlektrovoza peremennogo toka i ego bloka upravleniya v rezhime tyagi]. *Modern technologies. System analysis. Modeling, IrGUPS*, 2015, no. 3 (47), pp. 197 – 202.

13. Alekseev A. S. *Sistema avtomaticheskogo regulirovaniya toka kollektornykh tyagovykh dvigatelej ehlektrovoza* (The system of automatic current regulation of collector traction motors of an electric locomotive). Doctor's Thesis, Moscow, 2009, 271 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Волчек Татьяна Витальевна

Иркутский государственный университет путей
сообщения (ИрГУПС).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Volchek Tatyana Vitalevna

Irkutsk State Transport University,

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

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

Аспирант кафедры «Электроподвижной состав», ИрГУПС.

Тел.: +7 (929) 321-51-13.

E-mail: tanya.vol4eck@yandex.ru

Мельниченко Олег Валерьевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

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

Доктор технических наук, заведующий кафедрой «Электроподвижной состав», ИрГУПС.

Тел.: 8-902-170-24-37.

E-mail: olegmelnval@mail.ru

Линьков Алексей Олегович

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроподвижной состав», ИрГУПС.

Тел.: 8-924-709-52-99.

E-mail: linkovalex@mail.ru

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

Postgraduate of the Department of Electric Rolling Stock,

Tel.: +7 (929) 321-51-13.

E-mail: tanya.vol4eck@yandex.ru

Melnichenko Oleg Valerevich,

Irkutsk State Transport University,

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

Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Electric Rolling Stock,

Tel.: 8-902-170-24-37.

E-mail: olegmelnval@mail.ru

Lenkov Alex. Olegovich

Irkutsk State Transport University,

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

Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Electric Rolling Stock.

Tel.: 8-924-709-52-99.

E-mail: linkovalex@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Волчек, Т. В. Математическое моделирование энергоэффективной системы ослабления поля тяговых электрических двигателей электропоездов переменного тока [Текст] / Т. В. Волчек, О. В. Мельниченко, А. О. Линьков // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 3 (39). – С. 2 – 14.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Volchek T. V., Melnichenko O. V., Linkov A. O. Mathematical modeling of energy efficient field reduction systems of traction motor for AC electric locomotives. Journal of Transsib Railway Studies, 2019, vol. 3, no. 39, pp. 2 – 14 (In Russian).

УДК 629.4

В. А. Нехаев, В. А. Николаев, А. Н. Смалев, В. Р. Ведрученко

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

К ОЦЕНКЕ МОЩНОСТИ ЛОКОМОТИВА

Аннотация. В статье рассмотрены феноменологический и модельный подходы к исследованию взаимодействия деформируемого колеса и опорной плоскости. Описаны преимущества и недостатки указанных подходов. В рамках феноменологического подхода были рассмотрены пять способов вычисления касательной силы тяги локомотива. Для того чтобы касательная сила тяги локомотива могла совершить работу и изменить кинетическую энергию поезда в точке касания колеса и рельса, обязательно должно присутствовать псевдоскольжение.

Специалисты по тяге поездов считают мощность как произведение касательной силы тяги локомотива на скорость поступательного движения поезда, хотя в действительности следует брать скорость точки ее приложения, а приложена она к колесной паре, поэтому скорость этой точки и должна использоваться для подсчета мощности локомотива. Учет данного факта уменьшает мощность локомотива в несколько десятков раз.

Ключевые слова: локомотив, контактное пятно, фрикционное взаимодействие колесной пары и рельсов, сила тяги, коэффициенты крипа, феноменологический и модельный подходы, зоны сцепления и качения.

Victor. A. Nekhaev, Victor. A. Nikolaev, Alexander N. Smalev, Victor R. Vedruchenko
Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

TO THE ESTIMATION OF THE LOCOMOTIVE POWER

Abstract. *The article considers phenomenological and modelling approach to researching of interaction of a deformable wheel and a plane of support, their advantages and disadvantages are mentioned. In the context of phenomenological approach the five methods of locomotive tangent tractive force calculation were considered. There certainly must be pseudo-creeping to let locomotive tangent tractive force do work and change the kinetic energy of a train in the point of wheel and rail contact.*

Locomotive tractive force experts calculate the power as product of the locomotive tangent tractive force and the velocity of translational motion of a train, although in fact the velocity of the point of force application must be assumed. It is applied to a wheel pair, then the velocity of this point must be used to calculate the locomotive power. According to this fact the locomotive power is found several tens of times reduced.

Keywords: *locomotive, contact spot, frictional interaction of a wheel pair and rails, tractive force, creep factors, phenomenological and modelling approach, adhesion and rolling zone*

Увеличение провозной способности российских железных дорог в первую очередь связано с ростом мощности локомотивов, и определяется увеличением скорости движения поездов. В этом случае одним из главных вопросов является вопрос адекватного представления силы тяги локомотива и ее роли в процессе тяги поезда. В настоящее время существует два подхода для решения указанной задачи – это феноменологический, когда считается, что сила тяги является функцией скорости движения локомотива, и модельный, развиваемый профессорами М. А. Левиным и Н. А. Фуфаевым [1], когда учитываются все шесть составляющих главного вектора и главного момента. Разумеется, что наиболее простым и поэтому часто используемым является феноменологический подход. К сожалению, в этом случае часто неизвестно фрикционное состояние в пятне контакта колеса с рельсом, а это принципиально важно в данном случае.

Классическим примером феноменологического подхода является теория, разработанная М. В. Келдышем [2], которая учитывает три из шести составляющих реакции в области контакта и столько же степеней свободы жесткого диска колеса. Предполагается, что центр колеса в своем движении мало отклоняется от прямолинейного и равномерного, а все три составляющие реакции являются линейными функциями параметров упругой деформации в центре области контакта. Из принятых допущений об отсутствии скольжения в центре контакта следует, что касательная к экваториальной линии деформируемой периферии совпадает с касательной к линии качения и точно так же в этой точке совпадают кривизны обеих линий. При этом используется гипотеза о линейной зависимости кривизны от трех параметров деформации. Влияние ширины области контакта проявляется только в значениях коэффициентов теории, а проскальзывание в области контакта не рассматривается. Между тем, как давно доказано классиками-механиками Н. Е. Жуковским, Ю.И. Неймарком и Н. А. Фуфаевым [3, 4, 26], движение колеса по рельсу без упругого псевдоскольжения невозможно. Способы понижения порядка системы дифференциальных уравнений теории М. В. Келдыша, позволяющие построить ряд приближений, предложены Ю. А. Неймарком и Н. А. Фуфаевым, а в работе [3] дано обобщение теории на случай произвольных движений колеса. Методы и способы экспериментального определения констант теории М. В. Келдыша описаны в работах [4, 5] Н. А. Фуфаева с соавторами.

Модельный подход характеризуется рассмотрением колеса с конкретным представлением деформируемой (эластичной) периферии не в виде непрерывной совокупности элементов, а в форме пружин или деформируемых стержней, связанных нитями, балками, кривыми брусками и т. д., которые моделируют, в частности, оболочку под давлением (шину). Последнюю можно было бы учесть и непосредственно, что, однако, в случае нестационарного качения оказывается довольно сложным делом [1]. Описанная конструкция деформируе-

мой периферии допускает математическое описание в форме совокупности дифференциальных операторов, которые допустимо рассматривать как математическую модель деформируемого колеса.

Существенные особенности процесса качения деформируемого колеса могут быть выявлены на очень простой модели деформируемой периферии, к которой могут быть приведены различные шины и другие деформируемые колеса, например, железнодорожные колеса подвижного состава. Эта модель в первую очередь должна учитывать деформируемость периферии колеса в каждой его точке и в более совершенных вариантах – непрерывность деформации в трех взаимно перпендикулярных направлениях, а также размеры области контакта колеса с опорной плоскостью [1]. При изучении процесса качения колеса необходимо принимать во внимание существование зон сцепления и скольжения в области контакта и то обстоятельство, что элемент периферии, вступивший в контакт с опорной поверхностью, в зоне сцепления остается неподвижным до того момента, когда в результате поворота колеса и под действием сил этот элемент выйдет из зоны сцепления.

Преимущества феноменологического подхода заключаются в его относительной простоте и большей доступности с точки зрения понимания, так как здесь довольно свободно можно оперировать различными гипотезами, которые позволяют записать определяющие уравнения теории качения, не вникая во все тонкости сложных механических явлений, наблюдающихся в контактной области колеса. В этом случае большинство констант теории, а их оказывается немало, приходится находить из опыта. Однако если не удалось правильно угадать вид исходных зависимостей, то феноменологическая теория может давать существенные погрешности, а в попытках определить коэффициенты, которые предполагались постоянными, мы часто приходим к противоречиям. И это является очевидным недостатком феноменологического описания.

Модельный же подход при его корректной, правильной реализации в большей степени свободен от указанных выше несовершенств, но он отличается значительно большей сложностью в сравнении с феноменологическим, так как если какая-то модель колеса принята за основу, то она должна быть достаточно чисто и доказательно обработана математически. И задача заключается не только в том, чтобы найти вид определяющих уравнений, описывающих процесс качения, но и выразить все константы теории через минимально необходимое количество параметров, характеризующих деформируемое колесо. И такая возможность появляется только при модельном подходе, при котором оказывается необходимым исследовать механизм взаимодействия диска колеса и все составляющие реакции в области контакта. Приходится рассматривать, как это принято в механике деформируемых тел, систему деформаций, систему распределенных усилий и связь между ними. Причем наибольшие трудности возникают в связи с необходимостью учитывать кинематику и то, что колесо обладает «памятью» вследствие фиксации на опорной поверхности в зоне сцепления деформаций, возникающих за время прохождения колесом пути, равного примерно длине этой зоны. К этому, естественно, добавляются вопросы сопряжения деформаций на границах зон скольжения и сцепления в области контакта. Все это делает аппарат модельного подхода громоздким и требует большой осмотрительности в деталях исследования [1].

В то же время оба подхода, феноменологический и модельный, не являются антагонистическими, а наоборот, дополняют друг друга, являясь двумя эффективными методами в исследовании рассматриваемых явлений качения деформируемых колес.

Все подробности описания ныне существующих гипотез взаимодействия колесной пары и железнодорожного пути можно выяснить в работе профессора А. Л. Голубенко [6]. Хорошо известно, что полное аналитическое решение задачи фрикционного взаимодействия колеса с рельсом во взаимосвязи с параметрами экипажа, режимами движения и поверхностными явлениями на контактирующих поверхностях на современном этапе развития трибологии невозможно.

Итак, обращаясь к проблеме, вынесенной в заголовок статьи, отметим, что авторы будут работать в парадигме феноменологического подхода.

В теории тяги поездов последний представляется материальной точкой, хотя данное утверждение многократно критиковалось, ибо в таком случае грузовой и наливной поезда ничем не отличаются друг от друга. В действительности известно и очевидно, что в наливных поездах обязательно колеблется жидкость в цистернах, а значит, на это тратится энергия.

На так называемые «вредные движения» – колебания вагонов в составе поезда в пространстве и во времени – также тратится энергия. По грубым оценкам, полученным доктором технических наук, профессором Т. А. Тибилковым, ее величина составляет от 17 до 30 % от полной энергии локомотива в зависимости от скорости движения поезда. Здесь будем оценивать необходимую интегральную мощность локомотивов в зависимости от скорости движения поезда и режима его движения (трогание с места и тяга поезда).

Из теоретической механики известно, что, вообще говоря, движение механических систем происходит под действием внешних сил. Слова «вообще говоря» указывают на исключение из правил, а именно на то, что для всех транспортных систем необходимо существование внутренних сил, чтобы возникли внешние силы. Действительно, вращающие моменты, развиваемые тяговыми двигателями, должны передаваться на колесные пары, которые, пытаясь вращаться, испытывают сопротивление со стороны рельсов, развиваемое в контактном пятне и называемое реакцией, направленной по движению поезда. Эта реакция рельсов (как бы она ни называлась) и является той внешней силой, которая и приводит поезд в движение. Согласно теореме об изменении кинетической энергии механической системы внешняя сила должна производить работу, следовательно, точка приложения силы должна иметь какую-либо скорость. В теории тяги поездов образование силы тяги излагается иначе.

«...Сила тяги – внешняя сила, под действием которой локомотив перемещается по рельсам. Рассмотрим образование силы тяги у электровоза и тепловоза (с электрической передачей). Ток, проходя по обмоткам возбуждения тягового электродвигателя (сокращенно – тягового двигателя), создает магнитный поток. В результате взаимодействия тока якоря и магнитного потока главных полюсов на валу тягового двигателя создается вращающий момент M_1 (рисунок 1, а), равный $H_1 r_1$ (r_1 – радиус шестерни), который приводит во вращение якорь двигателя электровоза или тепловоза, например по часовой стрелке.

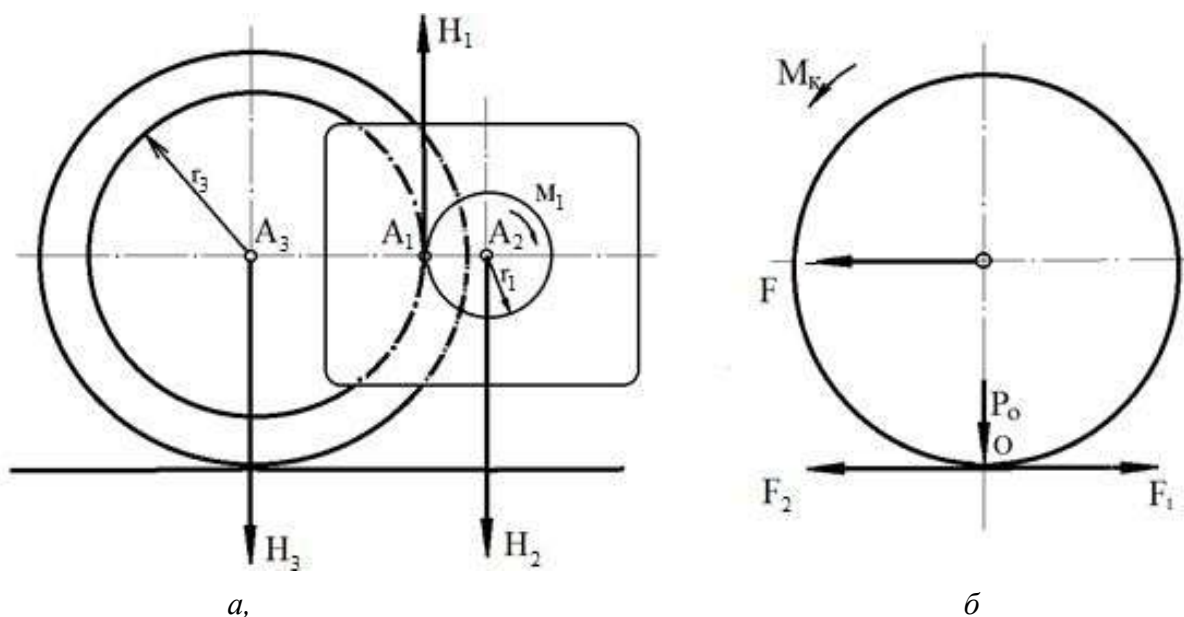


Рисунок 1 – Схема действия сил при вращении якоря электродвигателя (а) и образовании силы тяги (б)

Вращающий момент M_1 можно представить в виде пары сил, из которых одна – H_1 – действует на зубчатое колесо в точке зацепления его с шестерней (точка A_1), а другая – H_2 –

приложена в центре вала двигателя (точка A_2). Сила H_1 , действуя на зубчатое колесо, создает вращающий момент M_k , без учета потерь равный $H_1 r_2$, где r_2 – радиус зубчатого колеса. Вращающий момент M_k можно заменить парой сил H_1 и H_2 , приложенной в центре колеса A_3 . Этот вращающий момент приводит во вращение зубчатое колесо и, следовательно, колесную пару локомотива против хода часовой стрелки.

Так как вращающий момент M_k – внутренний по отношению к локомотиву, то он не может сообщить поступательное движение колесной паре. Чтобы сообщить колесной паре поступательное движение, необходимо иметь внешнюю силу. Разберем процесс образования этой силы.

Если бы колесная пара не опиралась на рельсы, то она под влиянием момента M_k вращалась бы относительно своей оси и не совершала поступательного движения. Вращающий момент M_k можно представить в виде пары сил F и F_1 (рисунок 1, б). Сила F приложена в центре оси колесной пары и направлена по движению, сила F_1 – в точке касания колеса и рельса (точка O) и направлена против движения.

Так как колесная пара опирается на рельсы с силой, равной части веса локомотива P_0 , то под действием силы F_1 в точке касания колес с рельсами возникает внешняя по отношению к локомотиву сила сцепления F_2 , являющаяся горизонтальной реакцией рельса на силу F_1 . Сила F_2 равна по величине силе F_1 , но направлена в противоположную сторону. Следовательно, обе эти силы уравновешены. Оставшаяся неуравновешенная сила F , приложенная в центре колесной пары, передается через буксу на раму локомотива и создает поступательное движение...» [7]. Здесь практически со всем можно согласиться, **кроме утверждения об уравновешенности двух сил, приложенных к разным телам.** Это просто невозможно! Так утверждает теоретическая механика, которая предлагает мысленно отделить локомотив от железнодорожного пути, заменив действие этого пути соответствующей реакцией, касательная составляющая которой и является силой тяги локомотива (внешняя сила). Очевидно также то, что приложенная в точке контакта колеса с рельсом внешняя сила (сила тяги локомотива) будет только тогда совершать работу,

когда колесо проскальзывает по рельсу. Прокомментируем рисунок 1 так: разумеется, тяговый электродвигатель кроме опирания на ось колесной пары должен иметь еще одну опору, но, видимо, авторы ограничились только принципом работы. Действительно, в теории качения основной характеристикой является зависимость между силой трения сцепления, реализуемой в фрикционном контакте, и скоростью относительного проскальзывания контактирующих поверхностей [8]. Расчетная схема в этом случае представлена на рисунке 2, где касательная сила приложена в точке контакта. Отметим, что **«Сила является приложенным, а не свободным вектором в данной точке пространства. В других точках пространства этот вектор либо имеет уже другое значение, либо вообще теряет смысл»** [Березкин, Е. Н. Курс теоретической механики. М., 1974. С. 13.]. Отметим еще, что **«При выборе нового центра приведения сил изменяется главный момент системы сил** [Теоретическая механика: Учебник. Под ред. П. Е. Товстика. М.: Высшая школа, 2000. С. 329 – 331.]. Таким образом, перенос силы, приложенной к одной точке тела в другую является некорректным, так как это приводит к неадекватной модели описания динамического поведения исследуемого объекта, т. е. искажает сущность происходящих явлений.

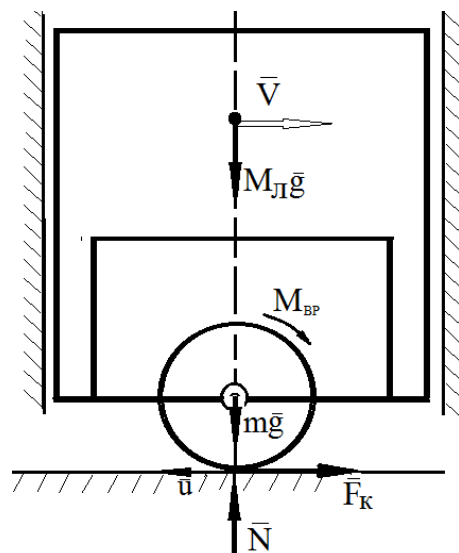


Рисунок 2 – Простейшая расчетная схема железнодорожного экипажа

Уравнение движения обобщенного железнодорожного экипажа находится с помощью энергетического метода Лагранжа второго рода. Кинетическая энергия экипажа

$$T = \frac{1}{2}MV^2 + \frac{1}{2}J\omega^2, \quad (1)$$

где M – масса экипажа; V – скорость его поступательного движения; J – момент инерции колесной пары; ω – угловая скорость ее вращения. При плоском движении колесной пары скорость любой ее точки определяется через скорость ее центра масс и ее угловую скорость вокруг центра масс:

$$\begin{aligned} \vec{V}_k &= \vec{V} + \vec{\omega} \times \vec{CK} = \begin{pmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 0 & 0 & -\omega \\ 0 & -R & 0 \end{pmatrix} = \\ &= V\vec{i} + (-1)^{1+1} \begin{pmatrix} 0 & -\omega \\ -R & 0 \end{pmatrix} \vec{i} + (-1)^{1+2} \begin{pmatrix} 0 & -\omega \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \vec{j} + (-1)^{1+3} \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -R \end{pmatrix} \vec{k} = \\ &= (V - \omega R)\vec{i}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $u = V - \omega R$ – скорость проскальзывания колеса по рельсу, она по величине чрезвычайно мала (будем полагать, что она не превышает 5% от скорости движения поезда V). Поэтому в первом приближении для вычисления кинетической энергии экипажа будем считать, что $\omega = V/R$, тогда имеем:

$$T \approx \frac{1}{2} \left(M + \frac{J}{R^2} \right) V^2. \quad (3)$$

Обобщенную силу (силу сопротивления движению экипажа) вычислим с помощью возможной работы на задаваемом мысленно малом возможном перемещении δx , т. е.

$$\delta A = (\vec{W}(V) + \vec{F}_k) \cdot \delta \vec{x} = (-W(V) + F_k) \delta x \quad (4)$$

или

$$Q = F_k - W(V). \quad (5)$$

Тогда, составляя уравнение Лагранжа второго рода, получаем уравнение движения поезда в расчете на одну колесную пару:

$$M(1 + \gamma) \frac{dV}{dt} = F_k - W(V), \quad (6)$$

здесь γ – коэффициент инерции вращающихся частей экипажей. Уравнение (6) можно найти в учебниках по тяге поездов [9, 10], в которых подсчитывают требуемую мощность локомотива как произведение силы тяги локомотива на скорость его поступательного движения вдоль железнодорожного пути.

Как было продемонстрировано выше, такой подход на самом деле не совсем корректен, ибо мощность должна вычисляться по известной в теоретической механике формуле:

$$N = \vec{F}_k \cdot \vec{V}_k, \quad (7)$$

здесь N – мощность одного тягового двигателя, тс·м/с; $\vec{F}_k$ – вектор касательной силы тяги колесной пары, тс; $\vec{V}_k$ – вектор скорости точки приложения силы, м/с. Учитывая, что векторы $\vec{F}_k$ и $\vec{V}_k$ направлены в разные стороны для модуля мощности силы тяги, можно написать следующее выражение:

$$N = \varepsilon F_k V, \quad (8)$$

где $\varepsilon = 0,02 - 0,05$ – доля от скорости движения поезда, когда он не буксует, т. е. когда $F_k > W(V)$ (сила тяги больше силы сопротивления движению поезда).

Поэтому, оставаясь в парадигме «тягови́ков» (специалистов, занимающихся вопросами тяги поездов), будем считать, что к колесу приложена касательная сила тяги, вычислять которую можно несколькими способами [11]. Рассмотрим наиболее известные способы и гипотезы определения силы тяги локомотива.

1. ПТР. Наиболее простой способ состоит в том, чтобы воспользоваться Правилами для тяговых расчетов для поездной работы (ПТР) и для соответствующего типа локомотива снять с графика силу тяги как функцию скорости движения поезда, проведя ее кусочно-линейную аппроксимацию, т. е. построив интерполяционный полином Лагранжа или сплайны. Их легко применять при тяговых расчетах. Плохо только то, что неизвестно, для каких фрикционных условий в контакте колеса с рельсом справедлива выбранная таким образом сила тяги локомотива, кроме того, она зависит только от скорости движения поезда.

2. Методика ДИИТа. Рекомендуется находить касательную силу тяги по выражению:

$$F_k = 2\mu\eta_3 M \bar{m} / D_6, \quad (9)$$

где μ – передаточное число редуктора тяговой передачи; η_3 – коэффициент полезного действия зубчатой передачи; M – вращающий момент на валу тягового двигателя; $\bar{m}$ – число тяговых двигателей локомотива; D_6 – диаметр бандажа по кругу катания. В работе [11], пренебрегая внутренним сопротивлением вращению якоря тягового двигателя, а также влиянием вихревых токов, схемами питания фидерного участка железной дороги и поездной обстановкой, найдена следующая система уравнений:

$$\begin{cases} A \frac{d\Phi}{dt} + BV\Phi + CI_b(\Phi) = cU_{kc}; \\ I_a = (1 + \rho_2)I_b(\Phi) + \rho_3 \frac{d\Phi}{dt}; \\ F_k = k\bar{m}\Phi I_a, \end{cases} \quad (10)$$

здесь

$$\begin{cases} A = k_1 + \rho_1 k_2 + cd\rho_3 R_p; \quad B = 20\mu/D_6; \\ C = r + \rho_1 r_{гп} + cd(1 + \rho_2)R_p; \quad k_1 = 2,7 p\sigma w_b 10^{-8}; \\ r = r_a + r_{дп} + r_{гп}; \quad k_2 = 2 p\sigma w_b 10^{-8}; \\ \rho_1 = (r_a + r_{дп})/R_{ш}; \quad \rho_2 = r_{гп}/R_{ш}; \quad \rho_3 = k_2/R_{ш}, \end{cases} \quad (11)$$

где I_a и r_a – ток, протекающий через якорь тягового двигателя, и сопротивление его цепи со-

ответственно; $r_{дп}$ – сопротивление обмоток дополнительных полюсов; $r_{г.п}$ – сопротивление обмоток главных полюсов; $R_{ш}$ – сопротивление шунта; c и d – параметры, зависящие от схемы соединения тяговых двигателей; Φ – магнитный поток; R_p – сопротивление пускового реостата; $U_{к.с}$ – напряжение в контактной сети; $2p$ – число пар главных полюсов; $2a$ – число пар параллельных ветвей обмотки якоря; σ – коэффициент рассеяния главного полюса; w_b – количество витков обмотки возбуждения; I_b – ток, протекающий через обмотку возбуждения; r_d – активное сопротивление обмотки якоря. Устанавливая соответствие значений ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 , c , d , R_p , $R_{ш}$ номерам позиции контроллера, можно, решая первое уравнение системы (3), определить с помощью второго и третьего выражения системы (3) силу тяги локомотива в любой момент времени при любой позиции контроллера. Более того, если в первом выражении системы (3) положить $U_{к.с} = 0$, то при $V \neq 0$ можно с помощью формул системы (3) определить силу, развиваемую при электрическом торможении.

3. Гипотеза Ф. Картера. Для определения тангенциальных сил в контакте колеса с рельсом до последнего времени наиболее широко использовалось решение Ф. Картера [12], которое он получил для случая контакта двух прямых круговых цилиндров с параллельными осями. Согласно его теории продольные (по оси Ox , совпадающей с направлением рельса) касательные силы F_x в контакте колеса с рельсом, так называемые силы крипа, пропорциональны относительному упругому скольжению (крипу) ε_x сопрягаемых тел или относительной скорости упругого скольжения $v_{ск}$:

$$F_x = f_x \varepsilon_x \quad (12)$$

или

$$F_x = f_x \frac{V_{ск}}{V}. \quad (13)$$

Коэффициент крипа f_x был определен Ф. Картером в результате решения двумерной контактной задачи теории упругости с допущением о форме контактного пятна в виде плоской полоски и при отсутствии скольжения во всех остальных направлениях. Усредненное значение для стальных рельса и колеса радиуса R , мм, при статической нагрузке на него P , кгс, Ф. Картер представил так:

$$f_x = 800\sqrt{PR}. \quad (14)$$

В дальнейшем другими исследователями [13 – 17] были предложены следующие выражения:

$$f_x = 182P; \quad (15)$$

$$f_x = 235P - 24P^2 + P^3; \quad (16)$$

$$f_x = 306,9 + 139,6P + 6,7P^2; \quad (17)$$

$$f_x = 425\sqrt{PR}; \quad (18)$$

$$f_x = 25,58 + 84\Delta P + 0,67(\Delta P)^2, \quad (19)$$

где ΔP – отклонение нагрузки от статического давления колесной пары на рельсы. На основании приведенных данных среднее значение коэффициента псевдоскольжения f_x можно считать равным 1430 тс, а если принять во внимание разброс измерений, то нижний предел

значений коэффициента псевдоскольжения будет порядка 1000 тс, а верхний – 1800 тс. Таким образом, достаточно очень малой скорости проскальзывания, чтобы реализовать чрезвычайно большие силы.

Не говоря о принятых в методике Ф. Картера допущениях, существенно искажающих физическую сторону процесса взаимодействия колеса с рельсом, необходимо отметить, что также значительно отличаются результаты расчетов по модификациям методики. Укажем на очевидный факт, что даже чрезвычайно малые относительные проскальзывания вызывают очень большие силы. Следовательно, механические системы, в которых действуют такие огромные силы, являются «жесткими» системами, требующими даже специальных численных методов их интегрирования, например, метод Гира.

4. Теория А. де Патера и Дж. Калкера. Если же выйти за пределы модели, что и рельс, и колесо являются абсолютно жесткими телами, то можно назвать следующие факторы, оказывающие влияние на величину сил сцепления колеса с рельсом в порядке убывания их важности [18]: 1) давление в контакте «колесо – рельс»; 2) физико-химические и фрикционные свойства поверхностных слоев и загрязнений; 3) скорость скольжения колеса по рельсу; 4) предварительное упругое смещение материала колеса относительно материала рельса; 5) поверхностная твердость материалов колес и рельсов, вид контакта – упругий или пластический; 6) скорость движения локомотива; 7) фактическая площадь контакта и т. д.

Отсюда следует, что вопрос определения касательных усилий в контакте «колесо – рельс» является чрезвычайно сложным и при моделировании приходится прежде всего ограничивать число учитываемых факторов исходя из специфики рассматриваемой задачи.

Цилиндрическая поверхность головки рельса и коническая поверхность бандажа образуют при контакте под нагрузкой площадку, по форме изменяющуюся от эллипса (новые рельс и колесо) до прямоугольника (изношенные рельс и колесо). Статическая нагрузка в контакте составляет до 12,5 тс, а площадь контакта $S = 55 - 150 \text{ мм}^2$ [13].

В режиме тяги путь, пройденный центром колеса, в действительности отличается от пути при чистом качении в связи со взаимным проскальзыванием и деформациями материала колеса и рельса. Упругий характер сил крива (псевдоскольжения), возникающих в контакте, был впервые отмечен Н. П. Петровым в работе [14]. Дж. Калкер, используя гипотезу своего учителя профессора А. де Патера о малости зон скольжения, создал двумерную и трехмерную теории крива [15]:

$$F_x = c^2 G C_{11} \varepsilon, \quad (20)$$

здесь $a = 0,77 \text{ см}$, $b = 0,66 \text{ см}$ – полуоси контактного эллипса, т. е. $c^2 = ab = 0,5 \text{ см}^2$ – площадь контактного пятна; $a > b$; $b/a = 0,86$, следовательно, согласно работе [15] коэффициент C_{11} равен 4,46; $G = E/[2(1 - \nu)]$ – модуль сдвига; $\nu = 0,3$ – коэффициент Пуассона; $E = 2,1 \cdot 10^6$ – модуль Юнга, кгс/см²; ε – относительное проскальзывание колеса по рельсу.

При относительном проскальзывании $\varepsilon = 0,0014$ колесная пара локомотива реализует силу тяги, равную 9,52 тс.

5. Регрессионные уравнения, полученные на основании экспериментов. Профессором А. Л. Голубенко были выполнены большие экспериментальные исследования проблемы фрикционного взаимодействия колесной пары локомотива и рельсов, результаты которых в виде таблиц и графиков приведены в работе [6], в которой силу сцепления рекомендуется вычислять по формуле [19]:

$$F_{\text{сц}} = k \psi_0 P_{\text{ст}}, \quad (21)$$

здесь ψ_0 – максимально возможный потенциальный коэффициент сцепления; $k = k(u/V)$ – коэффициент, определяемый по безразмерной характеристике сцепления в функции относи-

тельной скорости скольжения, предложенной Н. Н. Меншутиным [20] и Д. К. Миновым [21] (рисунок 3); $P_{ст}$ – статическая нагрузка от колесной пары на рельсы.

Значение потенциального коэффициента сцепления ψ_0 для электровоза переменного тока вычисляется по формуле:

$$\psi_0 = 0,28 + \frac{4}{50 + 6V} - 0,0006V, \quad (22)$$

где скорость электровоза V , км/ч.

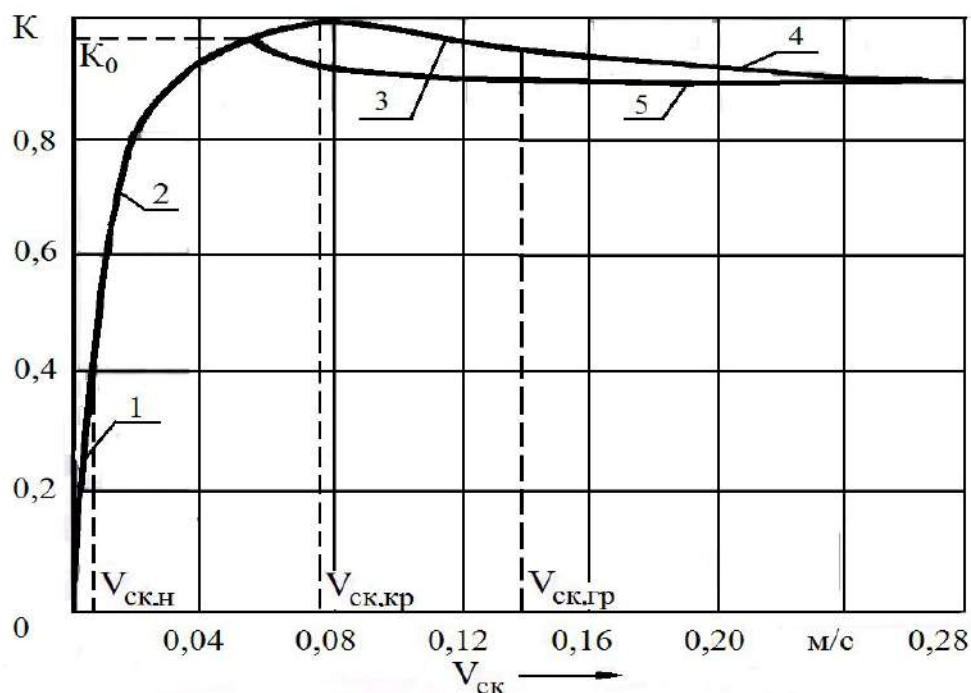


Рисунок 3 – Характеристика сцепления колесной пары электровоза с рельсами: 1 – начальная ветвь; 2 – восходящая ветвь; 3 – промежуточная ветвь; 4 – падающая ветвь; 5 – возвратная ветвь

В работе [16] вид регрессионного уравнения принимался по данным, приведенным в [22], и использовались результаты экспериментов, приведенные А. Л. Голубенко из работы [6]. В итоге имеем регрессионное выражение:

$$F_k = a F_{тр} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{кр}} \right)^b e^{-c \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{кр}}}, \quad (23)$$

где $F_{тр} = f_0 P_{ст}$.

График изменения силы тяги одной колесной пары, вычисляемой по уравнению регрессии (23), показан на рисунке 4.

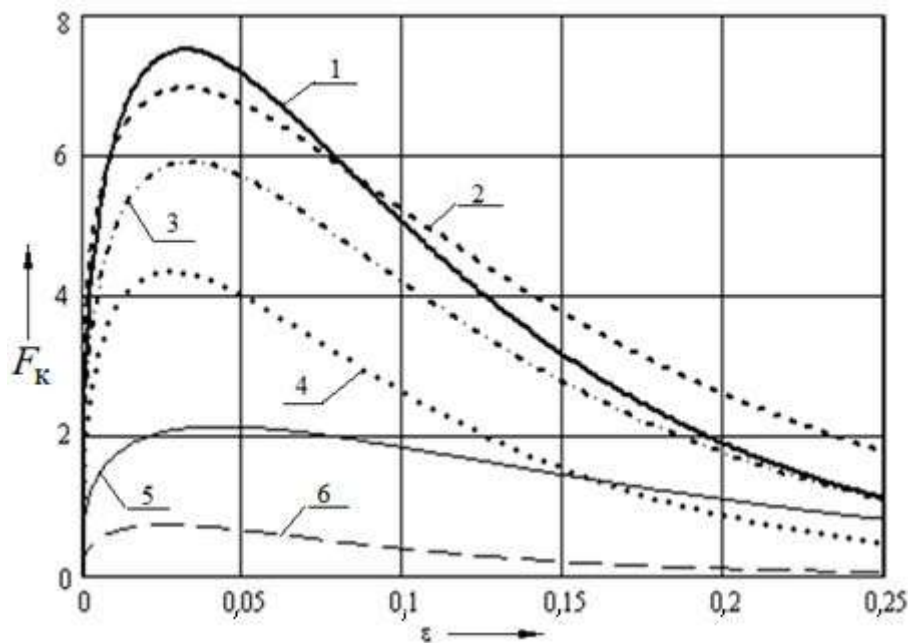


Рисунок 4 – Сила тяги локомотива: 1 – для сухого чистого рельса с подачей песка; 2 – для сухого обезжиренного рельса; 3 – для сухого чистого рельса; 4 – для мокрого рельса с подачей песка; 5 – для чистого рельса, политого водой; 6 – для рельсов, покрытых тонким слоем СТП

Очевидно, что на падающих ветвях силы тяги локомотива, когда $\varepsilon \geq \varepsilon_{кр}$, возможно возникновение и развитие боксования колесной пары. Коэффициенты a , b , c и $\varepsilon_{кр}$ определены для различных условий контактирования колесной пары с рельсами с использованием уравнения регрессии (23) и приведены в таблице 1. Для сухого чистого рельса находим, что максимальная сила тяги одной колесной пары локомотива составляет около 5,8 тс.

Таблица 1 – Зависимость коэффициентов регрессионного уравнения (22)

Условия на контакте колеса с рельсом	a	b	c	$\varepsilon_{кр}$	$f_{сцmax}/f_0$	Коэффициент корреляции
Сухой чистый рельс с подачей песка	0,88454	0,41034	0,40645	0,032	0,5891	0,99264
Сухой обезжиренный рельс	0,72771	0,28755	0,28888	0,032	0,5451	0,99767
Сухой чистый рельс	0,71693	0,37933	0,37605	0,033	0,4922	0,9955
Мокрый рельс с подачей песка	0,62734	0,38389	0,37349	0,027	0,4318	0,97756
Чистый рельс, политый водой	0,35161	0,32744	0,33716	0,045	0,2510	0,99737
Рельс, покрытый тонким слоем СТП	0,24823	0,43601	0,43151	0,026	0,1612	0,9824

При проведении экспериментальных исследований с поездами, ведомыми электровозами ВЛ-10 или ВЛ-11, Л. А. Мугинштейн нашел максимальное значение, равное 0,252, а О. А. Некрасов для электровозов ВЛ 80, и ВЛ 60 – 0,265. Легко видеть, что эти результаты хорошо коррелируются с данными, представленными в таблице 2.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Таблица 2 – Значение потенциального коэффициента сцепления колеса с рельсом

Условия контактирования колеса с рельсом	$\Psi_{\max}$
Сухой чистый рельс с подачей песка	0,300
Сухой обезжиренный рельс	0,278
Сухой чистый рельс	0,236
Мокрый рельс с подачей песка	0,173
Чистый рельс, политый водой	0,085
Рельс, покрытый СТП	0,029

Оценивая силу тяги по формуле (23), составим с помощью общих теорем динамики механической системы дифференциальные уравнения движения колесной пары локомотива (первое нами уже получено ранее – это выражение (6)). Второе уравнение описывает вращательное движение колесной пары:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{вр}} - F_{\text{к}} R, \quad (24)$$

здесь $M_{\text{вр}}$ – вращающий момент, приложенный к колесной паре со стороны тягового двигателя. Уравнения (6) и (24) образуют сингулярно возмущенную систему [23], так как время установления скорости центра масс поезда исчисляется минутами, а установление скорости вращения колесной пары – секундами. Замечено, что контактная сила давления колеса на рельс (нормальная составляющая реакции связи), от которой зависит сила тяги $F_{\text{к}}$, изменяется за очень короткое время, не превышающее 0,0025 с [24].

Выведем дифференциальное уравнение для «быстрой» переменной u :

$$\frac{du}{dt} = \frac{M(1+\gamma)RM_{\text{вр}} - M(1+\gamma)R^2F_{\text{к}}(1+\alpha) + JQw_0''/m_0}{JM(1+\gamma)}, \quad (25)$$

здесь $\alpha = J/MR^2(1+\gamma)$ – безразмерный коэффициент; m_0 – количество колесных пар локомотива. Теперь запишем в стандартном виде систему сингулярно возмущенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} M(1+\gamma) \frac{dV}{dt} = F_{\text{к}} - W(V); \\ M(1+\gamma) \frac{du}{dt} = \frac{M(1+\gamma)RM_{\text{вр}} - M(1+\gamma)(1+\alpha)R^2F_{\text{к}} + JW(V)}{J}. \end{cases} \quad (26)$$

Система дифференциальных уравнений (26) написана для одной колесной пары. Так как нас не интересуют режимы ведения поезда по перегону, а нужно получить экспертную оценку мощности локомотива, будем иметь в виду только стационарные режимы движения, следовательно, система (26) принимает вид:

$$\begin{cases} 0 = F_{\text{к}} - W(V); \\ 0 = \frac{M(1+\gamma)RM_{\text{вр}} - M(1+\gamma)(1+\alpha)R^2F_{\text{к}} + JW(V)}{J}. \end{cases} \quad (27)$$

Из первого выражения системы (27) получаем:

$$F_k = W(V), \quad (28)$$

а второе выражение системы (27) разрешаем относительно вращающего момента $M_{вр}$:

$$M_{вр} = RW(V). \quad (29)$$

Если вращающий момент представить как функцию угловой скорости колесной пары, то тогда уравнение (29) можно разрешить относительно ω , а затем вычислить скорость проскальзывания колесной пары по рельсам и определить мощность локомотива так:

$$N = W(V)|u|. \quad (30)$$

Для расчетов достаточно взять однородный поезд, находя основное сопротивление движению локомотива и вагона по справочной литературе, например, [25].

Примем для численных вычислений перспективную нагрузку на ось 25 тс, количество вагонов 80 четырехосных на подшипниках качения, железнодорожный путь бесстыковой, масса состава 8000 т. (Здесь и выше, учитывая общепринятую практику обозначения осевой нагрузки в тонна-силах на ось (тс/ось), а скорость – в километрах в час (км/ч), сила тяги и мощность локомотива измеряются в тонна-силах (тс) и тонна-силах на метр в секунду (тс·м/с) соответственно). В таблице 3 приведены результаты численных расчетов мощности перспективных локомотивов, вычисленной по формулам (7) и (23).

Таблица 3 – Технические характеристики поезда при движении по площадке

V , км/ч	$\varepsilon = u/V$, б/р	F_k , тс	N , тс·м/с по формуле (23)	N , тс·м/с по формуле (7)
100	0,002	20,416	1,134	567,111
120	0,003	24,678	2,468	822,600
140	0,004	29,530	4,594	1148,389
160	0,007	34,970	10,879	1554,222
180	0,012	40,998	24,599	2049,900
200	0,033	47,155	86,441	2619,722

Из данных таблицы 3 следует вывод: формула (7), используемая специалистами по тяге поездов, дает чрезвычайно высокую мощность локомотива, ибо они используют скорость движения поезда, а сила тяги колесной пары приложена к ее ободу и поэтому должна умножаться на скорость проскальзывания колесной пары по рельсам. С ростом скорости движения поезда увеличивается скорость проскальзывания колесной пары по рельсам в 16,5 раза, а мощность локомотива, вычисленная по формуле (30) – в 76,2 раза, в то время как для «тягловиков» она возрастает в 4,62 раза. Следует отметить, что ведение поезда такой массы локомотивом с опорно-рамным подвешиванием тягового двигателя со скоростью 200 км/ч физически неосуществимо, так как сила сопротивления движению поезда становится больше максимальной силы тяги, равной 47,151 тс, при безразмерном проскальзывании колесной пары по рельсам 0,034, или 3,4 %.

На основании изложенного можно сделать выводы.

1. Существующие в настоящее время феноменологические, регрессионные выражения для касательной силы тяги локомотива при их сравнении дают существенно различные результаты. Следовательно, из предложенных формул нужно выбрать одну, которая лучше всего представляет процесс ведения поезда.

2. Вычисление мощности локомотива как произведения касательной силы тяги локомотива на скорость движения поезда физически некорректно.

3. Наиболее подходящим с точки зрения физики тягового процесса является регрессионное выражение (23), позволяющее кроме режима тяги изучать режим боксования колесной пары.

4. Предложенная в статье методика оценки мощности локомотива позволяет утверждать, что при изменении скорости движения поезда от 100 до 200 км/ч проскальзывание колесной пары по рельсам увеличивается от 0,02 до 3,3 %, мощность локомотива при этом возрастает в 76,2 раза и не превышает 86,451 тс·м/с.

5. При скорости движения поезда 200 км/ч корректно определенная мощность локомотива более чем в 30 раз меньше той, что обычно вычисляется специалистами по тяге поездов.

6. Предложенная авторами методика существенным образом опирается на известную в математике теорему академика А. Н. Тихонова о разделении движений динамической системы на «быстрые» и «медленные» составляющие, но полностью она здесь не излагается вследствие ограниченности объема статьи.

В заключение добавим, что здесь рассматривалась одномерная модель сухого трения, истоки которой восходят к Амонтону. Однако в 1998 – 2010 гг. академик РАН В. Ф. Журавлёв и его ученики разработали двумерные модели сухого трения, основанные на разложениях Паде [27 – 29]. Такие модели более точно отражают процессы трения, происходящие в контакте колеса с рельсом, особенно при высокоскоростном движении.

Список литературы

1. Левин, М. А. Теория качения деформируемого колеса [Текст] / М. А. Левин, Н. А. Фуфаев. – М.: Наука, 1989. – 272 с.
2. Келдыш, М. В. Шимми переднего колеса трёхосного шасси [Текст] / М. В. Келдыш // Труды ЦАГИ. – 1945. – № 564. – С. 1 – 33.
3. Неймарк, Ю. И. Динамика неголономных систем / Ю. И. Неймарк, Н. А. Фуфаев. – М.: Наука, – 1967. – 519 с.
4. Неймарк, Ю. И. Устойчивость криволинейного движения экипажа на баллонных колёсах [Текст] / Ю. И. Неймарк, Н. А. Фуфаев // ПММ. – 1971. – Т. 35. – Вып. 5. – С. 899 – 967.
5. Тураев, Х. Т. Определение кинематических параметров шин для изучения динамики транспортных машин [Текст] / Х. Т. Тураев, Н. А. Фуфаев, В. А. Шишкин // Автомобильная промышленность. – 1974. – № 12. – С. 11 – 13.
6. Голубенко, А. Л. Сцепление колеса с рельсом: Монография [Текст] / А. Л. Голубенко. Киев: Випол. – 1983. – 448 с.
7. Ишлинский, А. Ю. Теория сопротивления перекачиванию (трение качения) и смежных явлений [Текст] / А. Ю. Ишлинский // Всесоюзная конференция по трению и износу на машинах. – М.-Л., 1940. – Т. 2. – С. 225 – 265.
8. Аглиулин, Х. Я. Фрикционное проскальзывание поверхностей при теории качения [Текст]: Автореф. дис... канд. техн. наук / Х. Я. Аглиулин – М., 1971. – 17 с.
9. Бабичков, А. М. Тяга поездов [Текст] / А. М. Бабичков, В. Ф. Егорченков. – М.: Трансжелдориздат, 1962. – 263 с.
10. Розенфельд, В. Е. Электрическая тяга [Текст] / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. М.: Трансжелдориздат, 1962. – 347 с.
11. Блохин, Е. П. Динамика поезда (нестационарные продольные колебания) [Текст] / Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин. – М.: Транспорт, 1982. – 222 с.
12. Carter, F. M. On the action of locomotive driving wheel [Текст] / F. M. Carter / Proc. Roy. Soc. Ser. A. – 1926. – V. 112. – P. 151 – 157.
13. Гордиенко, П. И. Определение площади контактного пятна между колесом и рельсом с учетом их износа [Текст] / П. И. Гордиенко // Электровозостроение: Сб. науч. тр./ АО ВЭЛНИИ. – Новочеркасск, 1996. – Т. 36. – С. 208 – 215.

14. Петров, Н. П. Давление колес на рельсы железных дорог, прочность рельс и устойчивость пути [Текст] / Н. П. Петров. – Петроград: Электротипография Н. Я. Стойковой. – 1915. – 321 с.
15. Kalker, J. J. Wheel-Rail rolling contact theory [Текст] / J. J. Kalker // Wear. – 1991. – Vol. 144. – P. 243 – 261.
16. Нехаев, В. А. Оптимизация режимов ведения поезда с учетом критериев безопасности движения (методы и алгоритмы) [Текст]: Дис...докт. техн. наук: 05.22.07 / Нехаев Виктор Алексеевич. – Омск, 2000. – 352 с.
17. Bommel, V. P. Application de la theorie des vibrations nonlinearities sur le problem du mouvement de lacel d'un vehicule de chemin de fer [Текст] / V. P. Bommel. Utrecht: Drykkeriy Elinkwijk, 1964. – 303 p.
18. Исаев, И. П. Проблемы сцепления колес локомотива с рельсами [Текст] / И. П. Исаев, Ю. М. Лужнов. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.
19. Математическое моделирование динамики электропоездов [Текст] / А. Г. Никитенко, Е. П. Плохов и др. – М.: Высшая школа, 1998. – 274 с.
20. Меншутин, Н. Н. Исследование скольжения колёсной пары электропоезда при реализации силы тяги в эксплуатационных условиях [Текст] / Н. Н. Меншутин // Труды ВНИИЖТ. – 1960. – Вып. 188. – С. 113 – 132.
21. Минов, Д. К. Повышение тяговых свойств электропоездов и тепловозов с электрической передачей [Текст] / Д. К. Минов. – М.: Транспорт, – 1965. – 268 с.
22. Куценко, С. М. О характере сил трения в контакте катящегося по направляющей колеса [Текст] / С. М. Куценко, В. П. Игнатенко, Т. В. Гулякина // Вестник ХПИ. – 1985. – Вып. 99. – С. 39 – 41.
23. Васильева, А. Ю. Асимптотические разложения решений сингулярно возмущенных уравнений [Текст] / А. Ю. Васильева, Н. Ф. Бутузов. – М.: Наука, – 1973. – 272 с.
24. Локтев, А. А. Модели взаимодействия колеса и рельса при высоких скоростях движения [Текст] / А. А. Локтев, В. В. Виноградов, В. А. Бучкин // Мир транспорта. – 2016. – Т. 14. – №1. – С. 54 – 60.
25. Гребенюк, П. Т. Тяговые расчеты [Текст] / П. Т. Гребенюк, А. Н. Долганов, А. И. Скворцова. – М.: Транспорт, 1987. – 272 с.
26. Жуковский, Н. Е. Теория прибора инженера Ромейко-Гурко [Текст] // Полн. собр. соч. Н. Е. Жуковский Т. VIII: Теория упругости. Железные дороги. – М.- Л.: ОНТИ НКТП СССР, 1937. – С. 102 – 106.
27. Журавлёв, В. Ф. О модели сухого трения в задаче качения твердых тел [Текст] / В. Ф. Журавлёв, А. А. Киреевков // ПММ. – 1998. – Т. 62. – Вып. 5. – С. 762 – 767.
28. Журавлёв, В. Ф. О разложениях Паде в задаче о двумерном кулоновом трении [Текст] / В. Ф. Журавлёв, А. А. Киреевков // Известия РАН. МТТ. – 2005. – № 2. – С. 3 – 13.
29. Киреевков, А. А. Связанные модели трения скольжения и верчения: от теории к эксперименту [Текст] / А. А. Киреевков, С. В. Семендяев // Аэрокосмические исследования, прикладная механика: Труды МФТИ. – 2010. – Т. 2. – № 3. – С. 174 – 181.

References

1. Levin M. A., Fufaev N. A. Teoriya kacheniya deformiruемого kolesa [Rolling theory of deformable wheel]. Moscow: Nauka, 1989, 272 p.
2. Keldysh M. V. Shimmi perednego kolesa trekhosnogo shassi [Shimmy of the three-wheel chassis front wheel]. *Trudy TSAGI [Proceedings of TSAGI]*, 1945, № 564, pp. 1 – 33
3. Neimark Yu. I., Fufaev N. A. Dinamika negolonomnyh system [Dynamics of nonholonomic systems]. Moscow: Nauka, 1967, 519 p.

4. Neimark YU. I., Fufaev N. A. Ustojchivost' krivolinejnogo dvizheniya ekipazha na ballonnnyh kolesah [The stability of a curvilinear motion of a vehicle on balloon wheels]. *PMM [Applied mathematics and mechanics]*, 1971, vol. 35, iss. 5, pp. 899 – 967.
5. Turaev H. T., Fufaev N. A., Shishkin V. A. Opredelenie kinematicheskikh parametrov shin dlya izucheniya dinamiki transportnyh mashin [Determination of kinematic parameters of tires for studying the dynamics of transport vehicles]. *Avtomobil'naya promyshlennost' [Automotive industry]*, 1974, № 12, pp. 11 – 13.
6. Golubenko A. L. Stseplenie kolesa s rel'som: Monograph [The adhesion of wheel and rail]. Kiev: Firma «Vipol», 1983. 448 p.
7. Ishlinskij A. Yu. Teoriya soprotivleniya perekatyvaniyu (trenie kacheniya) i smezhnyh yavlenij [Theory of resistance to rolling (rolling friction) and related phenomena]. *Vsesoyuznaya konferentsiya po treniyu i iznosu na mashinah [All-Union Conference on Friction and Wear on Machines]*, vol.2, M.-L., 1940, pp. 225 –265.
8. Agliulin H. Ya. Friksionnoe proskal'zyvanie poverhnostej pri teorii kacheniya [Frictional slipping of surfaces in rolling theory]: Ph. D. Thesis abstract, Moscow, 1971, 17 p.
9. Babichkov A. M., Egorchenkov V. F. Tyaga poezdov [Traction of trains]. Moscow: Transzheldorizdat, 1962, 263 p.
10. Rozenfeld V. E., Isaev I. P., Sidorov N. N. Elektricheskaya tyaga [Electric traction]. Moscow: Transzheldorizdat, 1962, 347 p.
11. Blohin, E. P., Manashchkin L. A. Dinamika poezda (nestatsionarnye prodol'nye kolebaniya) [Train dynamics (non-stationary longitudinal oscillations)]. Moscow: Transport, 1982, 222 p.
12. Carter F. M. On the action of locomotive driving wheel. *Proc. Roy. Soc. Ser. A*, 1926, vol. 112, pp. 151 – 157.
13. Gordienko P. I. Opredelenie ploshchadi kontaktного pyatna mezhdu kolesom i rel'som s uchedom ih iznosa [Determination of the area of the contact spot between the wheel and the rail, taking into account their wear]. *Elektrovozostroyeniye: Sb. nauch. tr. AO VELNII [Electric locomotive engineering: Proceedings of VELNII]*, vol. 36, Novocherkassk, 1996, pp. 208 – 215.
14. Petrov N. P. Davlenie koles na rel'sy zheleznnyh dorog, prochnost' rel's i ustojchi-vost' puti [Wheel pressure on rail tracks, rail strength and track stability]. Petrograd, 1915, 321 p.
15. Kalker J. J. Wheel-Rail rolling contact theory. *Wear*, 1991, vol. 144, pp. 243 – 261.
16. Nekhaev V. A. Optimizatsiya rezhimov vedeniya poezda s uchedom kriteriev bezopasno-sti dvizheniya (metody i algoritmy) [Optimization of train operation modes taking into account traffic safety criteria (methods and algorithms)]. Ph. D. Thesis: 05.22.07, Omsk, 2000, 352 p.
17. Bommel V. P. Application de la theorie des vibrations nonlinearities sur le problem du mouvement de l'axe d'un vehicule de chemin de fer [Application of the theory of nonlinear vibrations to the problem of lancel movement of a railway vehicle]. Utrecht: Drykkerij Elinkwijk, 1964, 303 p.
18. Isaev I. P., Luzhnov Yu. M. Problemy stsepleniya koles lokomotiva s rel'sami [Problems of adhesion of locomotive wheels with rails]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1985, 240 p.
19. Nikitenko A. G., Plovov E. P., Zarif'yan A. A., Homenko B. I. Matematicheskoe modelirovanie dinamiki elektrovozov [Mathematical modeling of the dynamics of electric locomotives]. Moscow: Vysshaya shkola, 1998, 274 p.
20. Menshutina N. N. Issledovanie skol'zheniya kolesnoj pary elektrovoza pri realizatsii sily tyagi v ekspluatatsionnyh usloviyah [The study of slipping of a wheel pair of a locomotive in the implementation of traction under operating conditions] / *Trudy VNIIZHT [Proceedings of VNIIZHT]*, 1960, iss. 188, pp. 113 – 132.
21. Minov D. K. Povyshenie tyagovykh svoystv elektrovozov i teplovozov s elektricheskoy peredachej [Improving traction properties of electric locomotives and diesel locomotives with electric transmission]. Moscow: Transport, 1965, 268 p.

22. Kutsenko S. M., Ignatenko V. P., Gulyakina T. V. O haraktere sil treniya v kontakte katyashchegosya po napravlyayushchej kolese [On the nature of friction forces in contact of rolling-on-the-guide wheel]. *Vestnik HPI [Bulletin of Kharkiv Polytechnic Institute]*, 1985, iss. 99, pp. 39 – 41.
23. Vasil'eva A. Yu., Butuzov N. F. Asimptoticheskie razlozheniya reshenij singulyarno vozmushchennyh uravnenij [Asymptotic expansions of solutions of singularly perturbed equations]. Moscow: Nauka, 1973, 272 p.
24. Loktev A.A., Vinogradov V.V., Buchkin V.A. Models of interaction of wheel and rail at high speed. *World of Transport and Transportation*. 2016; 14(1): 54 – 60.
25. Grebenyuk P. T., Dolganov A. N., Skvortsova A. I. Tyagovye raschety [Traction calculations]. Moscow: Transport, 1987, 272 p.
26. Zhukovskij N. E. Teoriya pribora inzhenera Romejko-Gurko [The theory of an instrument of engineer Romejko-Gurko]. N. E. Zhukovskij complete works, vol. VIII: Theory of elasticity. Railway. M.- L.: ONTI USSR, 1937, pp. 102 – 106.
27. Zhuravlev V.F. O modeli suhogo treniya v zadache kacheniya tverdyh tel [On the dry friction model in the rolling problem of solids]. *PMM [Applied mathematics and mechanics]*, 1998, vol. 62, Iss.5, pp. 762 – 767.
28. Zhuravlyov V.F., Kireenkov A.A. O razlozheniyah Pade v zadache o dvumernom kulonovom trenii [On Pade expansions in the two-dimensional Coulomb friction problem] // *Journal of Russian Academy of Sciences. Solid mechanics*, 2005, № 2, pp. 3 – 13.
29. Kireenkov A. A., Semendyaev S. V. Svyazannye modeli treniya skol'zheniya i vercheniya: ot teorii k eksperimentu [Related models of sliding friction and twisting: from theory to experiment]. *Aerokosmicheskie issledovaniya, prikladnaya mekhanika [Aerospace research, applied mechanics]* / Proceedings of MFTI [Moscow Institute of Physics and Technology], 2010, vol. 2, № 3, pp. 174 –181.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Нехаев Виктор Алексеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Теоретическая и прикладная механика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: NehaevVA@rambler.ru

Николаев Виктор Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: NikolaevVA@omgups.ru

Смалев Александр Николаевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая и прикладная механика», ОмГУПС

Тел.: +7 (3812) 31-16-88.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nekhaev Victor Alexeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor of Technical Sciences, professor, professor of the department «Theoretical and applied mechanics », OSTU.

Phone: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: NehaevVA@rambler.ru

Nikolaev Victor Alexandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor of Technical Sciences, professor, head of the department «Theoretical and applied mechanics », OSTU.

Phone: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: NikolaevVA@omgups.ru

Smalev Alexander Nikolaevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department « «Theoretical and applied mechanics », OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-16-88.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Ведрученко Виктор Родионович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-23.

E-mail: VedruchenkoVR@omgups.ru

Vedruchenko Victor Rodionovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor of Technical Sciences, professor of the department «Power system», OSTU.

Phone: (3812) 31-06-23.

E-mail: VedruchenkoVR@omgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

К оценке мощности локомотива [Текст] / В. А. Нехаев, В. А. Николаев и др. // Известия Транссиба/ Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 3 (39). – С. 14 – 31.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Nekhaev V. A., Nikolaev V. A., Smalev A. N., Vedruchenko V. R. To the estimation of the locomotive power // Journal of Transsib Railway Studies, Omsk, 2019, vol. 3, no. 39, pp. 14 – 31 (In Russian).

УДК 621.33

В. Г. Литвинцев, Н. В. Раевский, А. В. Ларченко

Забайкальский институт железнодорожного транспорта (ЗабИЖТ (ИрГУПС)), г. Чита,
Российская Федерация

РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ НА ТЯГУ ПОЕЗДОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ИНТЕРВАЛЬНОЙ РЕГРЕССИИ

Аннотация. Проведен анализ результатов прогнозирования потребления электрической энергии на тягу поездов, полученных при помощи существующих методов и математического аппарата интервальной регрессии. Определены погрешности прогнозирования по трем методам относительно фактического электропотребления. Представлен программный продукт по расчету прогнозных значений электропотребления на тягу поездов с учетом эксплуатационных показателей работы участка электрифицированной железной дороги в условиях неопределенности исходных данных.

Ключевые слова: электротяга поездов, прогнозирование электропотребления, интервальная регрессия, доверительный интервал, ошибка прогнозирования, программный продукт.

Vitaly G. Litvintsev, Nikolay V. Raevsky, Alexey V. Larchenko

Zabaikalsky Institute of railway transport (ZiRT (ISTU)), Chita, the Russian Federation

APPLICATION OF THE TRAIN TRACTION ELECTRICITY CONSUMPTION FORECASTING MODEL BASED ON INTERVAL REGRESSION METHOD

Abstract. The results of the train traction electricity consumption forecasting, which were obtained on the basis of existing methods and the interval regression method, was analyzed. The errors of forecasting according to three methods compared with the real electricity consumption were determined. The authors put forward the software for calculating the predicted values of electricity consumption for train traction, taking into account the operational indicators of the electrified railroad under conditions of uncertainty in the initial data.

Keywords: Electric train traction, electricity consumption forecasting, interval regression, confidence interval, error of forecasting, software.

Одной из основных задач для ОАО «Российские железные дороги» является определение конструктивных мер и технических решений, направленных на улучшение показателей энергоэффективности перевозочного процесса. Ситуация осложняется тем, что ОАО «РЖД» не является производителем собственных энергетических ресурсов и полностью зависит от топливно-энергетического комплекса страны.

Необходимость корректировки параметров энергопотребления (ЭП), а также затрат на

приобретение топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), предусмотренных «Энергетической стратегией холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года [1], вызвана превышением фактического объема перевозок над ранее запланированным, а также существенным изменением структуры и количественного наполнения топливно-энергетического баланса ОАО «РЖД», вызванного ходом процесса реформирования, изменением структуры и ценообразования рынка ТЭР.

При реализации Стратегии уделяется внимание рациональному использованию электрической энергии (ЭЭ) на тягу поездов путем разработки новых и совершенствования существующих методов управления и нормирования ТЭР на основе современных информационных технологий, способов обработки статистических данных, систем учета ЭП, взаимовыгодных отношений с производителями и поставщиками энергоресурсов [2].

Проблемы при решении задачи прогнозирования на электрифицированном железнодорожном транспорте обусловлены многими причинами – недостаточное качество и количество исходных данных, изменения среды, в которой протекает процесс, воздействие субъективных факторов, изменяющаяся во времени и по величине нагрузка потребителей. В некоторых случаях информация об ЭП на тягу поездов может быть недостаточной, иметь нечеткий характер. Среди возможных причин такой неопределенности – неодновременность снятия показаний регистрирующих приборов, несовершенство систем учета ЭП, влияние температуры окружающей среды, потери ЭЭ и др. Все эти факторы затрудняют применение традиционных методов оценки и прогнозирования ЭП ввиду возможности появления произвольных неконтролируемых ошибок в результатах прогнозирования при наличии погрешностей в исходных данных [3].

Идеальной моделью для решения прогнозирования потребления энергии на железнодорожных дорогах при неопределенности исходных данных могут являться интервальные методы [4, 5]. Их основные преимущества заключаются в определении ошибок и погрешностей при измерениях показателей, влияющих на ЭП. Такие ошибки могут влиять на характер и алгоритм регрессионного анализа, на прогнозное интервальное уравнение, которое учитывает случайные и неопределенные выборочные данные. В этой ситуации могут учитываться, например, ошибки округления и выборки, систематические ошибки, которые появляются ввиду несовершенства учета ЭЭ и вследствие инструментальных погрешностей.

Прогнозируемое значение ЭП должно представлять собой доверительные интервалы, которые включают в себя с заданным уровнем надежности фактическое значение ЭП. В этом случае при управлении объемами отпуска ЭЭ на тягу поездов следует охватывать реалистичный прогноз энергопотребления с определенным уровнем надежности так, чтобы он находился в допустимых пределах в зависимости от реальных параметров движения, и который гарантированно будет лежать в области допустимых значений, а также реализуем системами автоматического управления.

Авторами предложен усовершенствованный метод краткосрочного прогнозирования потребления ЭЭ на тягу поездов посредством применения интервального регрессионного анализа с учетом непредвиденных ошибок в исходной информации о влияющих факторах, позволяющий сократить оплату электроэнергии за счет корректировки договорного соглашения о заявленном ЭП [6].

В качестве исследуемого участка был выбран полигон Забайкальской железной дороги в пределах одного региона. В процессе детального корреляционного анализа собранной статистической информации по часовому ЭП за один месяц на тягу поездов (W_T), участковой скорости движения ($V_{уч}$, км/ч), количеству поездов, одновременно находящихся на участке (N , шт.), средней массе состава ($m_{ср}$, т) и грузообороту линии ($\sum(p \times L)$, тыс. ткм брутто) оказалось, что самая тесная связь наблюдается между электропотреблением на тягу поездов и грузооборотом на анализируемом участке: коэффициент корреляции находится в пределах 0,72 – 0,76. Самый низкий показатель взаимодействия – между электропотреблением и скоростью движения по рассматриваемому участку (0,23 – 0,33). Достаточно большое влияние

на электропотребление оказывает количество поездов, одновременно находящихся на участке. Таким образом, для дальнейших расчетов рассматривались только два эксплуатационных показателя – грузооборот линии $\sum(p \times L)$ и количество поездов N . Для каждого исследуемого дня месяца было получено уравнение регрессии для прогнозирования ЭП.

На основе массива данных по выбранным показателям работы участка железной дороги за одни сутки составлено уравнение множественной регрессии:

$$W_T = 21586,37 + 7,53 \sum(p \times L) + 225,81N + e. \quad (1)$$

На основе часовых статистических показаний тягового ЭП и результатов автокорреляционных вычислений определен необходимый объем выборки n для интервального уравнения

$$P[\mu - d \leq W_T \leq \mu + d] = 1 - \alpha, \quad (2)$$

где $\mu \pm d$ – интервал, содержащий выборочное среднее W_T .

Таким образом, необходимый объем выборки для значений электропотребления на тягу поездов при оценке среднесуточного ЭП W_T равняется 15.

Для значений грузооборота и количества поездов на участке также оценен рациональный объем выборки с использованием приведенных методов. Оказалось, что размер выборки имеет те же значения, что и для ЭП. Следовательно, для составления предлагаемой модели прогнозирования электропотребления на основе трех рассматриваемых параметров $(W_T, \sum(p \times L), N)$ необходимым и достаточным объемом выборки являются почасовые значения каждого показателя в течение суток.

При составлении интервальной прогностической функции выражение (1) будет являться исходным. Одним из условий при формировании линейных многофакторных уравнений является проверка их на уровень статистической значимости. При этом следует учесть такие факторы, как множественные коэффициенты корреляции, а также сопоставить их в первом приближении со средней их ошибкой при помощи коэффициента Стьюдента, оценкой значимости всего уравнения в целом при помощи F-критерия Фишера – Снедекора, оценкой F-критерия Фишера, а также средней ошибкой аппроксимации и частных коэффициентов эластичности.

В результате проверки всех параметров регрессионного уравнения выявлено, что они обладают высокой статистической значимостью. Следовательно, можно судить о большой точности полученной модели.

Задаваясь плановыми показателями перевозочного процесса по рассматриваемому участку за каждый час на предстоящие сутки, можно получить следующую модель прогнозного интервального уравнения на основе множественной регрессии

$$\hat{W}_{T0} - t_{1-\alpha; n-p-1} \cdot S_{\hat{W}_{T0}} \leq W_{T0}^* \leq \hat{W}_{T0} + t_{1-\alpha; n-p-1} \cdot S_{\hat{W}_{T0}} \quad (3)$$

где $t_{1-\alpha; n-p-1}$ – критерий Стьюдента, определённый на уровне значимости α при числе степеней свободы $k = n - p - 1$;

$S_{\hat{W}_{T0}}$ – стандартная ошибка функции регрессии прогнозируемого электропотребления.

На основе результатов часовых данных интервального прогноза на следующие сутки построены графики с указанием доверительных границ планируемой величины и выполнено сравнение с фактическим ЭП на примере одних суток. Оказалось, что фактическое значение потребления ЭЭ практически попадает в коридор с доверительной вероятностью $p = 0,95$. При этом ошибка прогнозирования в среднем за сутки составляет 1,7 %.

После определения ошибок прогнозирования ЭП на тягу поездов на основе интервальной регрессии [7, 8] за одни сутки произведена сравнительная оценка между потреблением

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

ЭЭ на участке Забайкальской железной дороги за один неполный месяц с прогнозными значениями ЭП, рассчитанные при помощи предлагаемой методики, нейросетевого моделирования [9, 10] и автоматизированной системы управления покупкой электроэнергии. Результаты полученных прогнозных значений ЭП, которые представлены на рисунке 1, сравнивались относительно фактического потребления ЭЭ W_T .

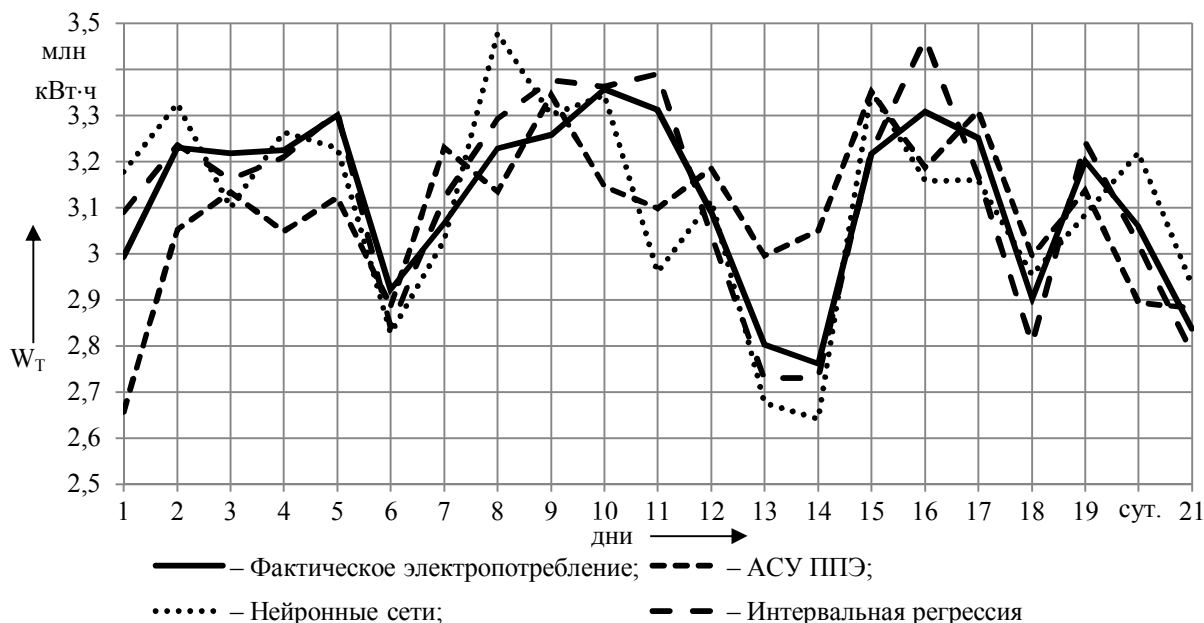


Рисунок 1 – Результаты прогнозирования ЭП за каждые сутки

Анализируя результаты прогнозирования, можно сделать вывод о том, что прогнозный график суточного тягового потребления ЭЭ, рассчитанный при помощи интервальной регрессии, лежит ближе к кривой фактического ЭП, чем диаграмма электропотребления, определенная по существующей автоматизированной системе управления покупкой и потреблением электроэнергии (АСУ ППЭ) и при помощи нейронных сетей (НС).

Чтобы выполнить оценку отклонений результатов прогнозирования по трем методам, определены и оценены суточные отклонения относительно фактического ЭП в процентном выражении, представленные на рисунке 2.



Рисунок 2 – Сравнение ошибок прогнозирования ЭП

Рассматривая приведенную на рисунке 2 диаграмму, можно отметить, что за представленный период наблюдаются четыре выброса за 5 %-ный разрешенный диапазон ошибок при

прогнозировании с использованием существующей методики АСУ ППЭ, а при нейронных сетях – одно наблюдение на каждые сутки. В это же время не отмечаются отклонения свыше нормированных значений прогнозных оценок, полученных с использованием предлагаемого интервального метода.

Авторами предлагается производить прогнозирование ЭП на тягу поездов с определением основных этапов выполнения при планировании, покупке и контроле электропотребления. Для этого необходимо проведение следующих мероприятий:

- создание статистической базы данных по использованию локомотивов на железных дорогах;
- планирование грузооборота;
- прогнозирование уровня ЭП на основе статистики данных об эксплуатационных параметрах на участках железной дороги;
- разработка и утверждение планов ЭП;
- управление отклонением фактического и прогнозируемого объемов ЭП.

Предлагаемая схема прогнозирования с использованием неопределенности исходных эксплуатационных данных и применения экспертной оценки может быть применена как для суточного, так и для часового планирования ЭП на тягу поездов.

После тестирования полученной модели прогнозирования на правильность ее работы разработан программный продукт «Расчет прогноза электропотребления на тягу поездов», зарегистрированный в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам [11].

Главное окно программы представлено на рисунке 3. Программа позволяет рассчитывать прогноз ЭП на тягу поездов на следующие сутки на основании данных, получаемых из файла текстового формата, содержащего значения грузооборота и количества поездов.

Прикрепление файлов с измерениями

Файл с данными	C:\phpdev\www\litvincev\2.csv	Choose...
Прикрепить		

Рисунок 3 – Вид главного окна программы

После представления расчетных данных по прогнозу формируется таблица расчетных значений данного показателя и строится график прогноза с указанием доверительных границ. Для этого использован язык программирования JavaScript, работа которого построена на оперативной системе ОС Windows, Unix в обозревателях Internet Explorer, Opera. Интерфейс программы написан на языке гипертекстовой разметки (HTML) [6, 11]. Результаты расчета представлены в таблице.

В основу разработанной программы заложен модуль PDL (PerlDataLanguage), содержащий быстрые и компактные матричные и математические функции аппарата интервальной регрессии [7, 8]. При использовании этого модуля требуется значительно меньше памяти и ресурсов процессора компьютера.

Программа обеспечивает выполнение следующих функций:

- расчет прогностического уравнения потребления ЭЭ на тягу поездов;
- определение доверительных границ прогнозируемого значения ЭП для заданного уровня надежности;
- построение таблицы прогноза тягового ЭП;
- построение интервального графика суточного и часового прогноза потребления ЭЭ на тягу поездов.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Таблица – Расчетная таблица результатов прогноза ЭП

Часы	Прогноз W , тыс. кВт·ч	Минимальная граница $W_{\min}$, тыс. кВт·ч	Максимальная граница $W_{\max}$, тыс. кВт·ч
1	137,515	134,187	140,843
2	118,544	114,006	123,083
3	123,801	119,800	127,803
4	120,880	114,729	125,632
5	124,100	120,698	127,593
6	127,802	123,323	132,281
7	124,222	119,352	129,092
8	118,563	113,225	123,901
9	129,511	126,296	132,728
10	124,165	119,626	128,704
11	118,472	112,788	124,156
12	118,060	113,073	123,047
13	116,248	111,073	121,422
14	112,413	105,768	119,058
15	108,910	99,532	114,289
16	118,060	89,983	108,990
17	116,739	111,454	122,024
18	117,310	112,083	122,538
19	119,332	113,596	125,070
20	131,851	128,070	136,632
21	145,754	140,727	150,781
22	135,831	131,830	139,832
23	135,411	131,711	139,111
24	140,957	136,936	144,978

По результатам предложенного способа с использованием разработанного программного продукта показана эффективность применения предлагаемого метода, предназначенного выполнять с необходимыми быстротой и точностью краткосрочное прогнозирование электропотребления с применением математического аппарата интервальной регрессии. В этом случае при планировании потребления энергии относительно применяемой в настоящее время АСУ ППЭ суммарная погрешность планирования тягового ЭП относительно фактического потребления ЭЭ снизилась на 3,0 %.

Список литературы

1. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года. [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2016. – 76 с.
2. Раевский, Н. В. Оперативное прогнозирование тягового электропотребления гибридным методом [Текст] / Н. В. Раевский, В. Г. Литвинцев // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока / Новосибирский гос. ун-т водного тр-та. – Новосибирск. – 2010. – № 2. – С. 298 – 301.
3. Раевский, Н. В. Интервальное оценивание статистических данных при прогнозировании электропотребления на тягу поездов [Текст] / Н. В. Раевский, Д. А. Яковлев, В. Г. Литвинцев // Вестник по материалам I междунар. науч.-практ. конф. «Ресурсосбережение и возобновляемые источники энергии: экономика, экология, опыт применения» / Междуна-

родная академия наук экологии и безопасности жизнедеятельности. – СПб-Чита. – 2008. – № 3. – Т. 13. – С. 67 – 69.

4. Вошинин, А. П. Задачи анализа с неопределенными данными – интервальность и/или случайность? [Текст] / А. П. Вошинин // Труды междунар. конф. по вычислительной математике МКВМ-2004 / ИВМиМГ СО РАН. – Новосибирск, 2004. – С. 147 – 158.

5. Киншт, Н. В. Некоторые особенности анализа электрической цепи с интервально заданными параметрами / Н. В. Киншт, Н. Н. Петрунько // Электричество. – 2006. – №1. – С. 49 – 52.

6. Литвинцев, В. Г. Краткосрочное и оперативное прогнозирование потребления электрической энергии на тягу поездов методом интервальной регрессии [Текст]: Дис... канд. техн. наук: 05.22.07 / Литвинцев Виталий Геннадьевич. – Омск, 2011. – 121 с.

7. Кремер, Н. Ш. Эконометрика [Текст] / Н. Ш. Кремер, Б. А. Путко. – М.: Юнити-Дана, 2002. – 311 с.

8. Айвазян, С. А. Прикладная статистика и основы эконометрики [Текст] / С. А. Айвазян, В. С. Мхитарян. – М.: Юнити, 1998. – 112 с.

9. Крюков, А. В. Прогнозирование электропотребления с применением аппарата нейронных сетей [Текст] / А. В. Крюков, Н. В. Раевский, Д. А. Яковлев // Proceedings of the International conference 29-31 March 2004, Irkutsk. – Irkutsk: Irkutsk state transport university – Technological educational institution of Athens. – Irkutsk, 2004. – P. 240 – 247.

10. Яковлев, Д. А. Прогнозирование потребления активной электрической энергии на предприятиях железнодорожного транспорта [Текст] / Д. А. Яковлев // Проблемы модернизации инфраструктуры Транссибирской магистрали: Сб. науч. тр. / Забайкальский ин-т ж.-д. трансп. – Чита, 2005. – С. 170 – 172.

11. Свид. 2011612366 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Расчет прогноза электропотребления на тягу поездов / Раевский Н. В., Лашук Н. В., Литвинцев В. Г.; заявитель и правообладатель ГОУ ВПО «Иркутский гос. ун-т путей сообщения» (RU). – № 2011610586; заявл. 02.02.11; опубл. 22.03.11.

References

1. *Energeticheskaya strategiya Holdinga «Rossijskie zheleznye dorogi» na period do 2025 g. i na perspektivu do 2030 g. (Energy strategy of the Holding «Russian Railways» for the period up to 2020 and for the future up to 2030)*, Moscow, Russian Railways, 2016, 76 p.

2. Raevskij N. V., Litvintsev V. G. Operational forecasting of traction power consumption by the hybrid method [Operativnoe prognozirovanie tyagovogo elektropotrebleniya gibridnym metodom]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka. – The journal of Scientific problems of transport of Sibiria and Far East*, 2010, no. 2, pp. 298 – 301.

3. Raevsky N. V., Yakovlev D. A., Litvintsev V. G. Interval estimation of statistics on forecasting power consumption for train traction [Interval'noe ocenivanie statisticheskikh dannyh pri prognozirovanii elektropotrebleniya na tyagu poezdov]. *Vestnik po materialam I mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Resursosberezhenie i vozobnovlyaemye istochniki energii: ekonomika, ekologiya, opyt primeneniya» (Works of the I Int. scientific and practical conference «Resource Saving and Renewable Energy Sources: economics, ecology, application experience»)*. – SPb. – Chita, 2008, T.13. – no. 3, pp. 67 – 69.

4. Voshchinin A. P. Analysis tasks with uncertain data – interval and/or randomness [Zadachi analiza s neopredelennymi dannymi – interval'nost' i/ili sluchajnost'?). *Trudy mezhdunarodnoj konferencii po vychislitel'noy matematike MKVM-2004 (Proceedings of the Int. conference on computational mathematic MKVM-2004)*. Novosibirsk, 2004, pp. 147 – 158.

5. Kinsht N. V. Some features of the analysis of an electric circuit with interval specified parameters [Nekotorye osobennosti analiza elektricheskoy cepi s interval'no zadannymi parametrami]. *Elektrichestvo – The journal of Electricity*, 2006. No. 1, pp. 49 – 52.

6. Litvintsev V. G. Kratkosrochnoe i operativnoe prognozirovanie potrebleniya elektricheskoy

energii na tyagu poezdov metodom interval'noj regrescii (Short-term and operational forecasting of electric energy consumption for train traction by interval regression method) Ph. D. thesis, Omsk, 2011, 121 p.

7. Kremer N. Sh., Putko B. A. *Ekonometrika* (Econometrics). Moscow: YUNITI-DANA Publ., 2002, 311 p.

8. Ajvazyan S. A., Mhitaryan V. S. *Prikladnaya statistika i osnovy ekonometriki* (Applied Statistics and Basics of Econometrics). Moscow: YUNITI Publ., 1998, 112 p.

9. Kryukov, A. V., Raevsky, N. V., Yakovlev D. A. Prediction of power consumption using the apparatus of neural networks [Prognozirovanie elektropotrebleniya s primeneniem apparata nejronnyh setej]. *Tezisy mezhdunarodnoj konferencii* (Proceedings of the Int. conference). – Irkutsk, 2004, pp. 240 – 247.

10. Yakovlev D. A. Forecasting the consumption of active electric energy in railway enterprises [Prognozirovanie potrebleniya aktivnoj elektricheskoy energii na predpriyatiyah zheleznodorozhnogo transporta]. *Trudy mezhvuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferencii «Problemy modernizacii infrastruktury Transsibirskoy magistrali»* (Works of the Int. scientific and practical conference). – Chita, 2005. pp.170 – 172.

11. Raevsky N.V., Lashuk V.G., Litvintsev V.G. *License RU №2011612366*, 22.03.2011.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Литвинцев Виталий Геннадьевич

Забайкальский институт железнодорожного транспорта (ЗабИЖТ (ИрГУПС)).

Магистральная ул., д. 11, г. Чита, 672040, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение», ЗабИЖТ (ИрГУПС).

Тел.: +7 (3022) 24-06-90.

E-mail: litvitgen@mail.ru

Раевский Николай Владимирович

Забайкальский институт железнодорожного транспорта (ЗабИЖТ (ИрГУПС)).

Магистральная ул., д. 11, г. Чита, 672040, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение», ЗабИЖТ (ИрГУПС).

Тел.: +7 (3022) 24-06-90.

E-mail: raevskiy_nik@mail.ru

Ларченко Алексей Владимирович

Забайкальский институт железнодорожного транспорта (ЗабИЖТ (ИрГУПС)).

Магистральная ул., д. 11, г. Чита, 672040, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог», ЗабИЖТ (ИрГУПС).

Тел.: +7 (3022) 24-06-90.

E-mail: larchenko_a@rambler.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Литвинцев, В. Г. Реализация модели прогнозирования электропотребления на тягу поездов на основе метода интервальной регрессии [Текст] / В. Г. Литвинцев, Н. В. Раевский, А. В. Ларченко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 3 (39). – С. 31 – 38.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Litvintsev Vitaly Gennadevich

Zabaikalsky Institute of railway transport (ZiRT (ISTU)).

11, Magistralnayast., Chita, 672040, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Electricity supplying», ZiRT (ISTU).

Phone: +7 (3022) 24-06-90.

E-mail: litvitgen@mail.ru

Raevsky Nikolay Vladimirovich

Zabaikalsky Institute of railway transport (ZiRT (ISTU)).

11, Magistralnayast., Chita, 672040, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Electricity supplying», ZiRT (ISTU).

Phone: +7 (3022) 24-06-90.

E-mail: raevskiy_nik@mail.ru

Larchenko Alexey Vladimirovich

Zabaikalsky Institute of railway transport (ZiRT (ISTU)).

11, Magistralnayast., Chita, 672040, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Rolling stock of railroad», ZiRT (ISTU).

Phone: +7 (3022) 24-06-90.

E-mail: larchenko_a@rambler.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Litvintsev V. G., Raevsky N. V., Larchenko A. V. Application of the train traction electricity consumption forecasting model based on interval regression method. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2019, vol. 3, no. 39, pp. 31 – 38 (In Russian).

УДК 625.1: 656.2

В. Ю. Тэттер¹, А. Ю. Тэттер¹, И. Л. Корнейчук², А. В. Бородин¹

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

²ООО «Омский завод транспортного машиностроения» (ООО «ОЗТМ»), г. Омск, Российская Федерация

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЕФЕКТОВ РОТОРНЫХ МЕХАНИЗМОВ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА В ЧАСТОТНОЙ И ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТЯХ

Аннотация. Обоснована целесообразность введения в практику вибродиагностирования роторных механических узлов динамических моделей развития дефектов. Показано, что в качестве основы для создания моделей целесообразно использовать эмпирические данные. Приведен пример построения динамической модели дефекта малой шестерни колесно-редукторного блока. Определен примерный объем работ по созданию динамических моделей. Предложены методы реализации динамических моделей дефектов «в большом».

Ключевые слова: модель, дефект, подвижной состав, диагностика, спектр, вейвлет.

Vladimir Yu. Tetter¹, Alexander Yu. Tetter¹, Ivan L. Korneichuk², Anatoliy V. Borodin¹

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

²LLC Omsk Transport Engineering Plant (LLC OZTM), Omsk, the Russian Federation

MATHEMATICAL MODELS OF DEFECTS OF ROTOR MECHANISMS OF ROLLING STOCK IN THE FREQUENCY AND TIME DOMAINS

Abstract. The expediency of introducing dynamic models of defect development into the practice of vibration diagnostics of rotor mechanical units is substantiated. It is shown that as a basis for the creation of models it is advisable to use empirical data. An example of a dynamic model of a small gear defect of a wheel-gear unit is given. The approximate amount of work on the creation of dynamic models is determined. Methods of realization of dynamic models of defects "in the big" are offered.

Keywords: model, defect, rolling stock, diagnostics, spectrum, wavelet.

Использование вибродиагностического оборудования (ВДО) для определения технического состояния роторных механических узлов (РМУ) подвижного состава (подшипники качения и скольжения, зубчатые зацепления редукторов) регламентировано нормативными документами ОАО «РЖД» [1, 2]. Такое оборудование используется для входного и выходного контроля.

Для идентификации дефектов и степени их развития все производители ВДО используют статические модели в виде набора параметров вибросигнала во временной и частотной областях.

Таковыми параметрами во временной области являются следующие:
среднеквадратическое значение:

$$X_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} [X(t)]^2 dt} ; \quad (1)$$

пикфактор. Определяется как отношение максимального (пикового) значения сигнала к среднеквадратическому значению (СКЗ) уровня вибрации:

$$K_{\text{пик}} = \frac{X_{\text{макс}}}{X_{\text{ср.кв}}} \quad (2)$$

фактор Куртозиса (ФК) [3]. Рассчитывается по формуле:

$$\Phi_K = \frac{\int_{t_0}^{t_0+T} (X - X_{\text{ср}})^4 P(x) dx}{\sigma^4}, \quad (3)$$

где $X(t)$ – амплитуда сигнала с датчика вибрации (временной сигнал),

$P(x)$ – функция вероятности случайной величины (временного сигнала),

T – период наблюдения;

t_0 – время начала наблюдения;

$X_{\text{ср}}$ – среднеквадратическое отклонение временного сигнала.

Основным инструментом идентификации дефектов РМУ является спектральный анализ сигналов вибрации, снятых с диагностируемых узлов при их вращении.

В обобщенном виде модель РМУ в частотной области может быть описана в виде двух групп составляющих [4]: первая группа – характерные периодические составляющие (включая субгармоники и супергармоники), порождаемые отдельными элементами подшипника или зубчатого зацепления при его работе; вторая – все остальные составляющие, включая «фон», шум, импульсные помехи и составляющие, порождаемые работой от других источников.

$$P(f) = P_1(f) + P_2(f) + P_3(f) + P_4(f) + P_z, \quad (4)$$

где P_1 – гармонические составляющие, кратные характерной частоте наружного кольца;

P_2 – гармонические составляющие, кратные характерной частоте внутреннего кольца;

P_3 – гармонические составляющие, кратные характерной частоте вращения сепаратора;

P_4 – гармонические составляющие, кратные характерной частоте тел качения;

P_z – шумовые составляющие.

Формулы для расчета P_1 ; P_2 ; P_3 и P_4 (соответственно f_H ; f_B ; f_C ; $f_{Т.К}$) приводятся, например, в работе [5].

Гармоники с частотами, кратными частоте перекачивания тел качения по наружному кольцу kf_H :

$$kf_H = \frac{1}{2} kf_{\text{вп}} \left(1 - \frac{d_{Т.К}}{d_C} \cos(\alpha) \right) z \quad (5)$$

где $d_{Т.К}$ – диаметр тела качения; d_C – диаметр сепаратора; α – угол контакта тел и дорожек качения; z – число тел качения в одном ряду подшипника; k – номер гармоники (целое число);

гармоники с частотами, кратными частоте перекачивания тел качения по внутреннему кольцу kf_B :

$$kf_B = \frac{1}{2} kf_{\text{вп}} \left(1 + \frac{d_{Т.К}}{d_C} \cos(\alpha) \right) z; \quad (6)$$

гармоники с частотами, кратными частоте вращения сепаратора kf_C :

$$kf_C = \frac{1}{2} kf_{\text{вп}} \left(1 - \frac{d_{Т.К}}{d_C} \cos(\alpha) \right); \quad (7)$$

гармоники с частотами, кратными частоте вращения тел качения $kf_{Т.К}$:

$$kf_{Т.К} = \frac{1}{2} kf_{\text{вп}} \left(1 - \frac{d_{Т.К}^2}{d_C^2} \cos^2(\alpha) \right). \quad (8)$$

Число дополнительных групп гармоник, которые следует принимать во внимание, может быть достаточно велико – более 10.

Для идентификации отдельных дефектов РМУ производится сравнение полученных после обработки вибросигналов моделей в частотной области с эталонными моделями. По результатам сравнения делается заключение о техническом состоянии РМУ.

В этом случае производится оценка технического состояния по статической (одномерной) во времени модели РМУ в частотной области (по такому принципу работают все ВДО, эксплуатирующиеся в ОАО «РЖД»). Статические модели не дают существенной информации для прогнозирования остаточного ресурса исследуемого узла. Для этого необходимо знать, как развивается каждый из типовых дефектов во времени. В отношении узлов подвижного состава целесообразно устанавливать зависимость развития дефектов от величины пробега. В связи с этим возникает необходимость в разработке динамических моделей.

В работе [6] предлагается ввести многопараметрический анализ вибрации, в том числе и в функции от времени. Такой подход позволяет оценивать динамику отдельных спектральных составляющих, относящихся к диагностическим признакам дефектов. Там же в качестве примера приводится тренд составляющей спектра огибающей высокочастотной вибрации подшипникового узла, отвечающей за дефект в виде неравномерного износа тел качения и сепаратора подшипника качения. Этот тренд получен для конкретного подшипника на временном отрезке в три года.

С целью реализации поставленных в ОАО «РЖД» задач по внедрению цифровизации и предиктивной аналитики предлагается разработать и ввести в практику диагностирования динамические модели развития дефектов ответственных РМУ подвижного состава.

Под динамической моделью в данном случае следует понимать зависимость степени развития каждого из идентифицируемых дефектов от времени или, что предпочтительнее, от величины пробега.

Динамические модели могут быть получены двумя путями – аналитическими методами и на основе эмпирических данных, причем первый путь, по мнению авторов, в данном случае неприемлем из-за наличия множества факторов с непредсказуемым влиянием на объект диагностирования во время его эксплуатации (например, ударные динамические нагрузки, возникающие при наличии ползуна на поверхности катания колеса, повышенный зазор в рельсовых стыках, нарушение правил погрузки в грузовые вагоны и т. д.) и необходимости введения большого количества допущений.

Анализ открытых источников информации показал отсутствие публикаций, посвященных построению динамических моделей развития РМУ подвижного состава. Авторами с помощью коллег были предприняты попытки отработки методики создания динамических моделей дефектов на основе анализа результатов диагностирования и последующей разборки колесно-редукторных блоков (КРБ) моторвагонных секций электропоезда ЭД4М.

В результате экспериментов с помощью вибродиагностического оборудования типа «Прогноз» определялось наличие дефектов в подшипниках и зубчатых зацеплениях КРБ. Возможности ВДО позволяют без разборки узла определять до 12 видов дефектов и степень развития каждого дефекта. Степень развития каждого обнаруженного дефекта определяется глубиной модуляции наибольшей из характерных гармонических составляющих по формулам (2) – (5) [7].

Объектом исследования в описываемом случае был колесно-моторный блок электропоезда ЭД4М со среднесуточным пробегом 1012 км (эксплуатация на Западно-Сибирской железной дороге).

Регулярное отслеживание степени развития обнаруженного дефекта позволило построить динамическую модель развития дефекта в зависимости от времени и от пробега.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

На рисунках 1 и 2 показана динамика развития дефекта малой шестерни редуктора соответственно в зависимости от времени и от пробега.

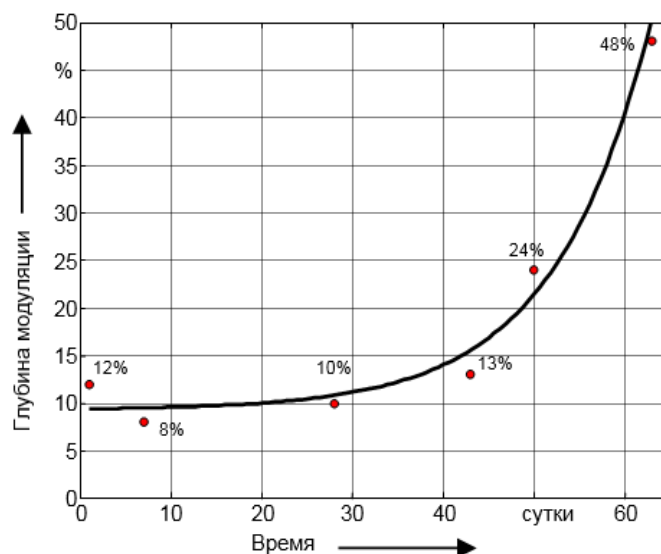


Рисунок 1 – Величина развития дефекта в зависимости от времени

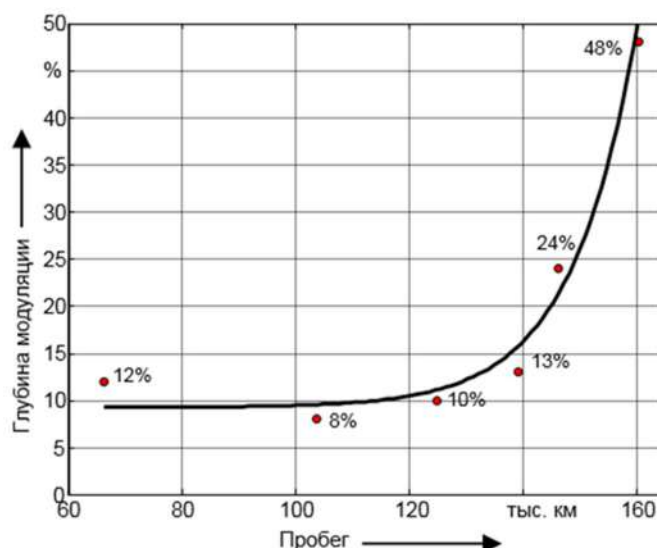


Рисунок 2 – Величина развития дефекта в зависимости от пробега

Дефект из градации «слабый» переходит в градацию «недопустимый» через 25 тыс. км пробега, т. е. в данном конкретном случае за 25 дней. Из графика, приведенного на рисунке 1, видно, что дефект был обнаружен задолго до того момента, когда степень его развития потребовала выкатки КРБ и замены шестерни. Шестерня с зарождающимся дефектом прошла 60 тыс. км, и только после этого начался быстрый рост величины дефекта. Пробег электропоезда от последнего ТР-3 до изъятия из эксплуатации КРБ по причине интенсивного развития дефекта зубчатой передачи составил 160336 км.

Для того чтобы установить типичные зависимости развития дефектов от времени или от пробега, необходимо иметь информацию по большому количеству результатов диагностирования узлов с обнаруженными дефектами и результатами разборки этих узлов. Для каждой неисправности требуется выборка не менее 10 случаев. Для 12 типовых дефектов количество выборок составит 120. Это только для одного из элементов КРБ. В КРБ вращающихся элементов различных типов пять (малая шестерня, большая шестерня, буксовые подшипники, моторно-якорные подшипники, подшипник малой шестерни). Итого для составления эмпи-

рических моделей развития дефектов одного типа КРБ необходимо провести около 3000 сеансов диагностирования и 600 разборок узлов с учетом того, что каждая модель будет строиться по пяти точкам отсчета во времени или по пробегу.

Для вагонных колесных пар объем экспериментов будет значительно меньше.

В результате экспериментальных работ могут быть получены обобщенные динамические модели дефектов. Следует иметь в виду, что даже для однотипных элементов, эксплуатирующихся в разных условиях, динамические модели могут иметь различный характер. К условиям эксплуатации, которые оказывают влияние на характер модели, можно отнести такие:

- профиль и состояние пути в месте эксплуатации;
- климатические условия региона эксплуатации;
- характер перевозимых грузов и технология погрузки.

В связи с этим обобщенные динамические модели могут быть подвергнуты корректировке (в части скорости развития дефектов) с учетом местных условий.

Еще одно направление в создании динамических моделей дефектов РМУ – использование вейвлет-преобразования (*wavelet*) временных сигналов вибрации. В начале статьи уже говорилось о статической во времени модели РМУ в частотной области, которая представляет собой амплитудно-частотный спектр – результат разложения в ряд Фурье однократной временной выборки сигнала вибрации.

Ряд Фурье можно представить в виде суммы гармонических составляющих, каждая из которых имеет свои амплитуду, частоту и фазовый сдвиг:

$$f(\omega t) = A_0 + A_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + A_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + A_3 \sin(3\omega t + \varphi_3) + \dots, \quad (9)$$

где A_0 – амплитуда постоянной составляющей;

$A_1 \sin(\omega t + \varphi_1)$ – основная гармоника;

$A_2, A_3, A_4, \dots$ – амплитуды соответствующих гармоник.

Одномерное вейвлет-преобразование сигнала $f(x)$ является двумерной функцией:

$$W_\psi(a, b)f(x) = \frac{1}{\sqrt{c_\psi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{b-x}{a}\right) f(x) dx, \quad (10)$$

где ядро ψ называется вейвлетом; b – смещением; a – масштабом, или шкалой.

Нормирующий коэффициент

$$C_\psi = 2\pi \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\psi'(\omega)|^2}{\sqrt{|a|}} d\omega < \infty \quad (11)$$

где $\Psi(\omega)$ – фурье-образ вейвлета ψ .

При преобразовании временного вибросигнала с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) получаемый амплитудно-частотный спектр не содержит информации о фазах гармонических составляющих (см. рисунок 1). Это и есть статическая (точечная) модель РМУ в частотной области для отдельного конкретного момента времени (отдельно взятой временной выборки).

Использование вейвлет-преобразования (*wavelet transform*) позволяет проследить изменение спектральной модели на протяжении всей отдельно взятой временной выборки, т. е. появляется возможность прослеживать изменения спектральных составляющих амплитудно-частотного спектра и анализ состояния РМУ можно вести уже в трехмерном пространстве (трехмерная спектрограмма – рисунок 3).

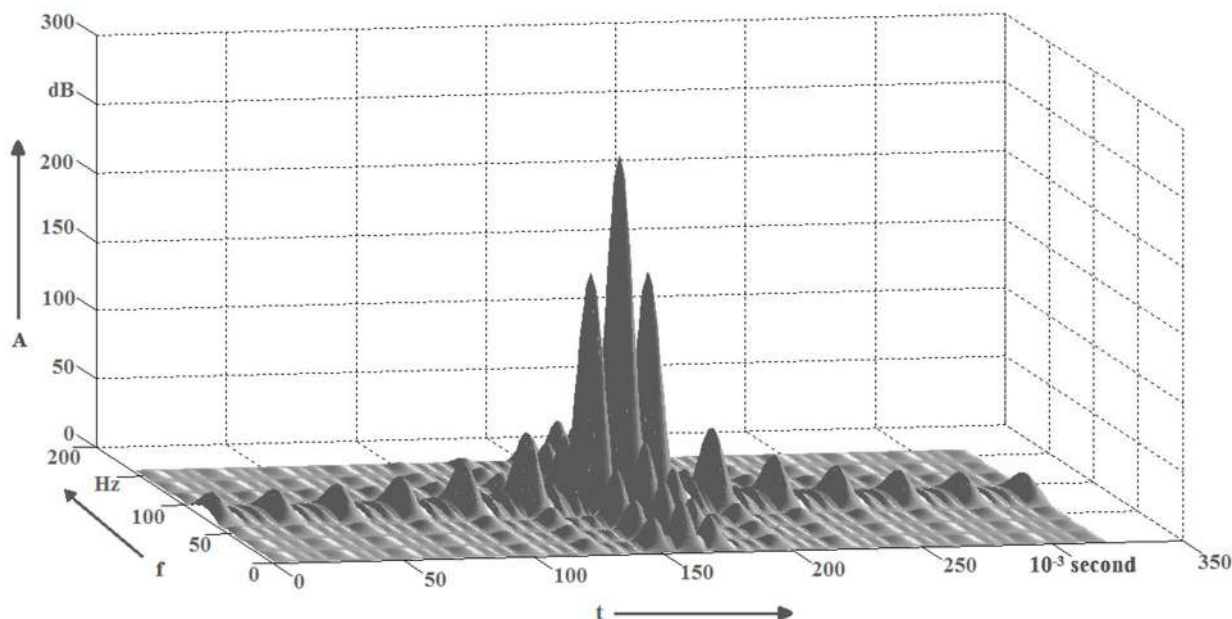


Рисунок 3 – Пример трехмерной спектрограммы в результате вейвлет-преобразования

Вейвлет-преобразование (ВП) одномерного сигнала – это его представление в виде обобщенного ряда или интеграла Фурье по системе базисных функций. Непрерывное (интегральное) вейвлет-преобразование представляет собой скалярное произведение сигнала $s(t)$ двухпараметрической вейвлет-функции $\Psi_{a,b}(t)$ выбранного вида.

Интегральное преобразование функции $s(t)$ имеет вид:

$$S_{\psi}(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(t) \psi_{a,b}(t) dt, \quad (12)$$

где a – параметр временного масштаба, обратно пропорциональный частоте и отвечающий за ширину вейвлета;

b – параметр сдвига, определяющий положение вейвлета на оси времени.

Вейвлет-функция $\Psi_{a,b}(t)$ используемого набора получается из одной материнской функции Ψ путем растяжения или сжатия и последующего сдвига:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi \left(\frac{t-b}{a} \right). \quad (13)$$

Множитель $\frac{1}{\sqrt{a}}$ определяет, что полная энергия каждого вейвлета $\Psi_{a,b}(t)$ не зависит от a .

Функция с двумя параметрами $S_{\psi}(a, b)$ дает информацию об изменении относительного вклада компонент разного масштаба во времени и будет называться спектром коэффициентов вейвлет-преобразования. Масштаб компонент близок по смыслу понятию частоты в преобразовании Фурье [8].

Вейвлет-преобразование непрерывной временной функции осуществляется на отдельно взятом временном отрезке. Для вибросигнала результатом преобразования будет являться трехмерная спектрограмма, которая будет являться трехмерной моделью в пространстве «амплитуда – частота – время». Такая модель является динамической моделью «в малом» и отражает состояние исследуемого узла в очень короткий промежуток времени и относительно временного промежутка развития дефекта будет являться моделью в «точке».

Предлагается с помощью вейвлет-преобразования создать трехмерную модель «в большом», т. е. исследуемый временной промежуток должен охватывать время от начала развития дефекта до перехода его в дефект недопустимой величины. Практически невозможно записать, сохранить и обработать непрерывный временной сигнал на отрезке, равном времени

полного развития дефекта. Это время измеряется десятками и сотнями дней. Представляется целесообразным для создания вейвлет-модели «в большом» взять четыре – пять временных выборок вибросигнала, отражающих состояние бездефектного узла, узла с зарождающимся, со средним, сильным и недопустимым дефектами. Далее «склеить» эти временные выборки в единую временную функцию. Необходимым условием «склейки» является обеспечение гладкости и непрерывности функции в месте «склейки». Таким условием является непрерывность производной в месте «склейки» – на промежутке между двумя локальными максимумами противоположного знака (отрезок ab в месте склейки двух функций).

Функция f является гладкой на (a, b) , если она непрерывна на отрезке (a, b) и имеет непрерывную производную $f'(x)$ такую, что существуют пределы $f'(a+0) = A$, $f'(b-0) = B$ [9]. «Склейку» целесообразно производить в точках, при которых $f(\Delta t1; \Delta t2; \Delta t3; \Delta t4; \Delta t5) = 0$.

В соответствии с первой теоремой Больцано – Коши, такая точка должна существовать на отрезке ab гладкой функции $f(t)$: если функция $f(t)$ непрерывна на отрезке ab и значения функции на концах отрезка имеют разные знаки: $f(a) > 0$, $f(b) < 0$ или $f(a) < 0$, $f(b) > 0$, то существует точка $\xi \in (a, b)$, значение функции в которой равно нулю $f(\xi) = 0$ [10].

На рисунках 4 и 5 показаны примеры неправильных случаев «склейки».

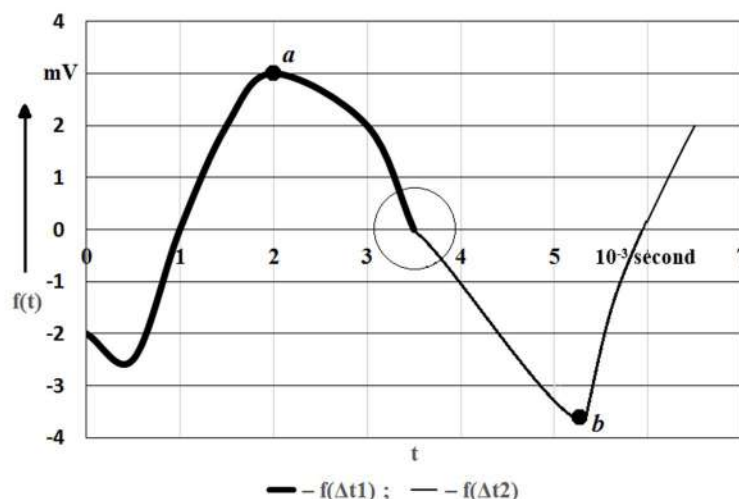


Рисунок 4 – Неверный тип «склейки» – $f(t)$ на участке ab не гладкая функция

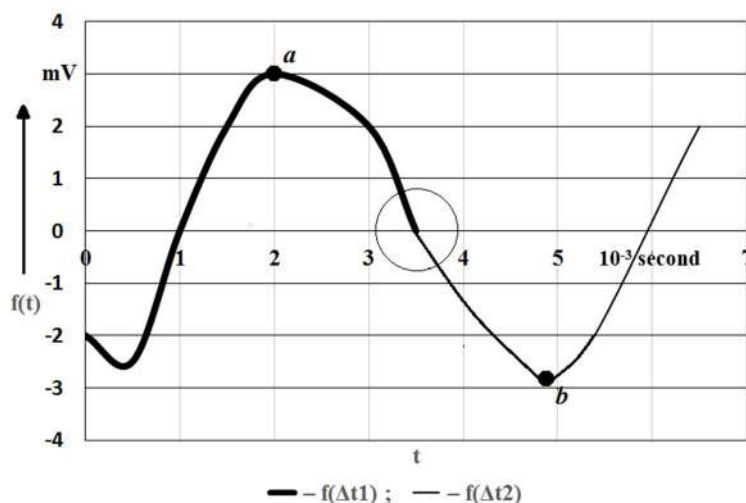


Рисунок 5 – Неверный тип «склейки» – $f(t)$ на участке ab не гладкая функция

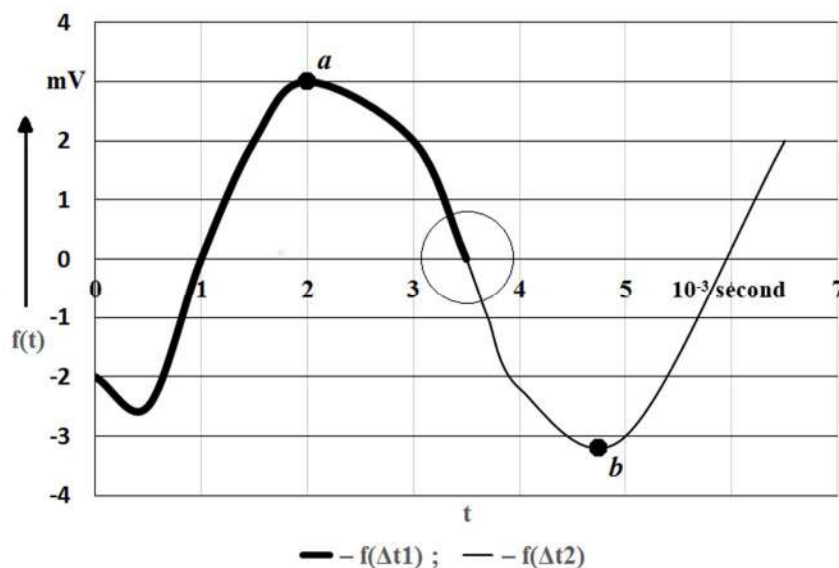


Рисунок 6 – Необходимый тип «склейки» – $f(t)$ на участке ab – гладкая функция

Неправильная «склейка» временных выборок приведет к тому, что после преобразования Фурье в амплитудно-частотном спектре появится мощная паразитная шумовая составляющая в высокочастотной области. Это обстоятельство существенно исказит динамическую модель дефекта «в большом». Авторы не ставят задачу описания алгоритма реализации правильной «склейки» – это отдельная математическая задача, имеющая, вероятно, не один вариант решения.

Теоретически существует еще один подход к реализации динамической модели дефектов «в большом» с использованием вейвлет-преобразования. Этот подход заключается в следующем. Берут, как уже было предложено выше, четыре – пять временных выборок вибросигнала и отдельно для каждой выборки осуществляют вейвлет-преобразование, в результате которого получают трехмерные спектрограммы, один из вариантов которых показан на рисунке 4 (в литературе по вейвлет-преобразованиям описываются и другие формы графической интерпретации). Далее предполагается «склейка» отдельно полученных трехмерных плоскостей. Условия, при которых должна производиться «склейка», требуют серьезного математического исследования, и их определение не входит в план настоящего обсуждения проблемы. По предварительным оценкам «склейка» трехмерных спектрограмм будет связана с дополнительными ограничениями, которые могут привести к потере или искажению информации и потребуют значительно более сложных алгоритмов реализации.

На основе изложенного можно сделать выводы.

- 1) Обоснована целесообразность введения в практику вибродиагностирования РМУ динамических моделей развития дефектов.
- 2) Показано, что в качестве основы для создания моделей целесообразно использовать эмпирические данные.
- 3) Приведены пример и методика построения динамической модели дефекта малой шестерни КРБ.
- 4) Определен примерный объем работ по созданию динамических моделей.
- 5) Динамические модели дефектов дадут возможность делать обоснованный прогноз остаточного ресурса РМУ при обнаружении только зарождающегося дефекта.

Список литературы

1. Вибрационное диагностирование узлов локомотивов [Текст] / ПКБ ЦТ.060050, ОАО «РЖД». – М., 2012.
2. Руководство по вибродиагностике подшипников буксовых узлов вагонных колесных пар [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2010.
3. Фактор Куртозиса как диагностический признак неисправностей подшипника [Текст] / В. Ю. Тэттер и др. // Контроль. Диагностика. – 2010. – № 3. – С. 28 – 34.
4. Тэттер, В. Ю. «Эталоны» неисправностей для диагностики роторных механических узлов [Текст] / В. Ю. Тэттер // Мир измерений. – 2007. – № 10. – С. 14 – 19.
5. Барков, А. В. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации [Текст] / А. В. Барков, Н. А. Баркова, А. Ю. Азовцев. СПб, 2012. – 158 с.
6. Барков, А. В. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации: Учебное пособие [Текст] / А. В. Барков, Н. А. Баркова. / Северо-Западный учебный центр. – СПб, 2013. – 152 с.
7. Барков, А. В. Интеллектуальные системы мониторинга и диагностики машин по вибрации [Текст] / А. В. Барков, Н. А. Баркова / СПбГМТУ. – СПб, 1999. – Вып. 9. – С. 115 – 156.
8. Шоберг, А. Г. Современные методы обработки изображений модифицированное вейвлет-преобразование [Текст] / А. Г. Шоберг / Тихоокеанский гос. ун-т. – Хабаровск, 2014. – 125 с.
9. Никольский, С. Н. Курс математического анализа [Текст] / С. Н. Никольский / М.: Физматлит, 2001. – 592 с.
10. Шилов, Г. Е. Математический анализ (функции одного переменного) [Текст] / Г. Е. Шилов. – М.: Наука, 1969. – 528 с.

References

1. Vibration diagnostics of nodes locomotives, PKB CT.060050, Russian Railways, Moscow, 2012. [*Vibratsionnoye diagnostirovaniye uzlov lokomotivov*]
2. Guide to vibration diagnostics of bearings of axle box units of wagon wheel sets [*Rukovodstvo po vibrodiagnostike podshipnikov buksovykh uzlov vagonnykh kolesnykh par*]. JSC "Russian Railways", Moscow, 2010.
3. Tetter V. Yu., The Kurtosis Factor as a diagnostic symptom of bearing faults-Nika [*Faktor Kurtozisa kak diagnosticheskiy priznak neispravnostey podshipnika*]. Control. Diagnostics. 2010. № 3. pp. 28 – 34.
4. Tetter V. Y. "Standards" fault diagnosis for rotary mechanical units [*«Etalony» neispravnostey dlya diagnostiki rotornykh mekhanicheskikh uzlov*]. The World measurements. 2007. № 10, pp. 14 – 19.
5. Barkov A. V. Monitoring and diagnostics of rotary machines by vibration [Monitoring i diagnostika rotornykh mashin po vibratsii]. – S-Petersburg, 2012 – 158 p.
6. Barkov A.V. Vibration diagnostics of machines and equipment. Vibration analysis [Vibratsionnaya diagnostika mashin i oborudovaniya. Analiz vibratsii]. Tutorial - S-Petersburg, North-West training center, 2013 – 152 p.
7. Barkov A.V., Barkova N. Ah. Intelligent monitoring and diagnostics systems machines for vibration [*Intellektual'nyye sistemy monitoringa i diagnostiki mashin po vibratsii*]. S-Petersburg: Izd-vo Spbgmtu. 1999.Issue. 9, pp. 115 – 156.
8. Modern methods of image processing modified by the wavelet transform [Sovremennyye metody obrabotki izobrazheniy modifitsirovannoye veyvlet-preobrazovaniye]. – Khabarovsk: publishing house of the Pacific. state UN-TA, 2014. – 125 p.
9. Nikolsky S. N. Course of mathematical analysis [Kurs matematicheskogo analiza]. – Moscow: Fizmatlit, 2001. – 592 p.

10. Shilov G. E. Mathematical analysis (functions of one variable). [Matematicheskiy analiz (funktsii odnogo peremennogo)] – Moscow: Science, 1969. – 528 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тэттер Владимир Юрьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: tetterv@gmail.com

Тэттер Александр Юрьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: TetterAU@omgups.ru

Корнейчук Иван Леонидович

ООО «Омский завод транспортного машиностроения (ООО «ОЗТМ»).

Нефтезаводская ул., д. 42 А, офис 21, г. Омск, 644065, Российская Федерация.

Научный сотрудник научно-исследовательского отдела, ООО «ОЗТМ».

Тел.: +7 (3812) 999-521

E-mail: korneichuk-il@energossu

Бородин Анатолий Васильевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, профессор

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Математические модели дефектов роторных механизмов подвижного состава в частотной и временной областях [Текст] / В. Ю. Тэттер, А. Ю. Тэттер и др. // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 3 (39). – С. 39 – 48.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tetter Vladimir Yurievich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Theoretical Electrical Engineering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: tetterv@gmail.com

Tetter Alexandr Yurievich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department « Theoretical Electrical Engineering », OSTU.

Phone: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: TetterAU@omgups.ru

Korneichuk Ivan Leonidovich

LLC Omsk Transport Engineering Plant (LLC OZTM).

St. Neftezavodskaya, 42 A, office 21, Omsk, 644065, Russian Federation.

Researcher, Research Department, LLC OZTM

Phone.: +7 (3812) 999-521

E-mail: korneichuk-il@energossu

Borodin Anatoly Vasilievich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Dr.Sci.Tech., professor

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Tetter V. Yu., Tetter A. Yu., Korneichuk I. L., Borodin A. V. Mathematical models of defects of rotor mechanisms of rolling stock in the frequency and time domains. Journal of Transsib Railway Studies, 2019, vol. 3, no. 39, pp. 39 – 48 (In Russian).

В. М. Филиппов, О. А. Сидоров, С. А. Ступаков

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

К ВОПРОСУ ИЗНАШИВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНТАКТНЫХ ПАР УСТРОЙСТВ ТОКОСЪЕМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ДВИЖЕНИИ

Аннотация. В соответствии с долгосрочной программой развития ОАО «Российские железные дороги» до 2025 года предполагается повышение уровня экономической связанности территории России посредством расширения сети скоростных и высокоскоростных перевозок. Это предполагает не только строительство новых высокоскоростных магистралей, но и модернизацию конструкций отдельных узлов подвижного состава, а также внедрение энерго- и ресурсосберегающих технологий. Применение контактных элементов с увеличенным сроком службы является одним из наиболее экономичных и наименее затратных способов обеспечения надежной, экономичной и экологичной передачи электроэнергии на подвижной состав. Увеличения срока службы токосъемного элемента можно достичь в том числе за счет снижения износа путем корректного подбора элементов контактной пары как с точки зрения их трибосовместимости, так и способности обеспечения качественного токосъема. В ОмГУПСе разработана и успешно апробирована методика проведения экспериментальных исследований контактных пар устройств токосъема, предполагающая проведение стендовых испытаний для каждой пары контактных материалов «контактная вставка – контактный провод» с целью определения их оптимального сочетания для снижения износа и увеличения ресурса. Оценка величины износа и прогнозирование ресурса элементов контактной пары производятся в том числе с помощью математических моделей. Однако применение существующих моделей для прогнозирования износа в условиях высокоскоростного движения является не достаточно точным из-за отсутствия учета аэродинамического воздействия и скорости движения подвижного состава на процессы токосъема. В данной статье рассмотрено совершенствование механической составляющей модели изнашивания элементов контактных пар устройств токосъема в условиях высокоскоростного движения. Приведены графики механического изнашивания контактных элементов, полученные экспериментально и в результате расчета по математической модели. Анализ графиков позволяет сделать вывод о возможности применения усовершенствованной математической модели для моделирования механической составляющей процесса изнашивания элементов контактных пар при максимальном значении погрешности не более 5 %.

Ключевые слова: контактная пара, устройство токосъема, высокоскоростное движение, электроподвижной состав, контактный элемент.

Victor M. Philippov, Oleg A. Sidorov, Sergei A. Stupakov

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

TO THE QUESTION ABOUT WEARING OF CONTACT COUPLES ELEMENTS OF ELECTRIC TRANSPORT CURRENT DEVICES FOR HIGH SPEED MOVEMENT

Abstract. In accordance with the long-term development program of JSC Russian Railways until 2025, it is planned to increase the level of economic connectivity of the territory of Russia by expanding the network of high-speed and high-speed transportation. This involves not only the construction of new high-speed highways, but also the modernization of the structures of individual components of rolling stock, as well as the introduction of energy and resource-saving technologies. The use of contact elements with an extended service life is one of the most economical and least costly ways to ensure reliable, economical and environmentally friendly transmission of electricity to rolling stock. An increase in the service life of the current collector element can be achieved, among other things, by reducing wear by the correct selection of contact pair elements, both from the point of view of their tribocompatibility and the ability to ensure high quality current collection. A methodology for conducting experimental studies of contact pairs of current collection devices has been developed and successfully tested at OSTU, which involves bench tests for each pair of contact materials “contact insert - contact wire” in order to determine their optimal combination to reduce wear and increase resource. Estimation of the amount of wear and prediction of the life of the elements of the contact pair is carried out including using mathematical models. However, the use of existing models for predicting wear under conditions of high-speed movement is not accurate enough due to the lack of consideration of the aerodynamic effects and the speed of the rolling stock on current collection processes. This article discusses the improvement of the mechanical component of the wear model of the elements of contact pairs of current collection devices in high-speed conditions. The graphs of the mechanical wear of the contact elements are obtained experimentally and as a result of calculation

by a mathematical model. The analysis of the graphs allows us to conclude that it is possible to use an improved mathematical model for modeling the mechanical component of the wear process of the elements of contact pairs with a maximum error value of not more than 5 %.

Keywords: contact pair, current collector, high-speed movement, electric rolling stock, contact element.

В соответствии с долгосрочной программой развития ОАО «Российские железные дороги» до 2025 года [1], утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 19 марта 2019 г. № 466-р, предполагается повышение уровня экономической связанности территории России посредством расширения и модернизации железнодорожной инфраструктуры, развития мультимодальности перевозок и расширения сети скоростных и высокоскоростных перевозок. Однако расширение сети высокоскоростного движения предполагает не только строительство новых железнодорожных магистралей, обладающих соответствующей инфраструктурой, но и модернизацию конструкций отдельных узлов существующего подвижного состава, а также внедрение энерго- и ресурсосберегающих технологий для обеспечения перевозки пассажиров и грузов со скоростями свыше 200 км/ч. Тем не менее изменение конструкции какого-либо узла (например, устройства токосъема (УТ)) напрямую связано со значительными финансовыми и временными затратами, в то время как применение контактных элементов с увеличенным сроком службы, обеспечивающих надежную, экономичную и экологичную передачу электроэнергии на подвижной состав, является более экономичным и менее затратным.

Увеличения срока службы токосъемного элемента можно достичь в том числе за счет снижения износа путем корректного подбора элементов контактной пары как с точки зрения их трибосовместимости, так и способности обеспечения качественного токосъема. Для этого необходимо учитывать физические свойства материалов контактных пар, а также факторы, характерные для условий эксплуатации. Параметры, влияющие на износ элементов контактных пар, приведены на рисунке 1.

Передача электроэнергии тяговому подвижному составу осуществляется посредством электрического скользящего контакта, при этом для высокоскоростного движения величина тягового тока, протекающего через пару «контактный провод – контактная вставка», может достигать 3,5 кА. Такие значения тока вызывают повышенный нагрев элементов контактных пар УТ, и его термическое действие существенно увеличивает электрический и электромеханический износ [2].

В Омском государственном университете путей сообщения разработана и успешно апробированы программа и методика проведения экспериментальных исследований контактных пар УТ электрического транспорта [3].

Программа предполагает проведение стендовых испытаний для каждой пары контактных материалов (трибосистемы) «контактная вставка – контактный провод» с целью определения их оптимального сочетания для снижения износа и увеличения ресурса и включает в себя следующие этапы.

1. Определение трибосовместимости, задиристости и износостойкости материалов (исследования от механической нагрузки в контакте без протекания электрического тока). Для этого варьируются следующие параметры: контактное нажатие, запыленность и влажность воздуха окружающей среды, аэродинамическое воздействие воздушного потока, скорость движения.

2. Исследование изнашивания пары «контактная вставка – контактный провод» в зависимости от величины протекающего тока. Для определения характеристик износостойкости требуется изменение следующих параметров: значений контактного нажатия, значений тягового тока (или плотности тока), параметров окружающей среды и контактной подвески при критических значениях нажатия в контакте и скорости движения. При реализации указанного этапа методики исследования необходимо выполнять при переменном и постоянном токе.

3. Оценка величины износа и прогнозирование ресурса элементов контактной пары с помощью математических моделей.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Фрикционное взаимодействие элементов трибосистемы «контактная вставка – контактный провод» представляет собой нелинейный процесс, который определяется большим количеством как внутренних (физико-химические свойства материалов пары трения), так и внешних (динамические нагрузки, наличие электрического тока в контакте, параметры внешней среды и др.) взаимосвязанных факторов.



Рисунок 1 – Параметры, влияющие на износ элементов контактных пар

Для обеспечения достоверности массива данных, получаемых в результате испытаний, применяется алгоритм реализации и обработки экспериментальных данных (рисунок 2), разработанный с учетом положений теории планирования эксперимента.

Результаты экспериментальных исследований при высокоскоростном движении зависят от параметров и характеристик средств измерений, объекта исследования, качества стендовых установок, а также человеческого фактора, влияние которого проявляется в виде случайных ошибок и погрешностей при выполнении эксперимента [4, 5].

Обработка результатов эксперимента и прогнозирование износа и ресурса элемента контактной пары УТ осуществляются с помощью математических моделей.

Следует отметить, что приведенная в работе [6] математическая модель учитывает большинство из приведенных на рисунке 1 факторов, однако ее применение для прогнозирования износа в условиях высокоскоростного движения будет не достаточно точным из-за отсутствия учета аэродинамического воздействия воздушного потока и скорости движения подвижного состава на процессы, протекающие в электрическом скользящем контакте.

В рамках данной статьи рассмотрим совершенствование механической составляющей модели изнашивания для высокоскоростного движения.

В общем виде базовая функциональная зависимость между механической составляющей I_M изнашивания и факторами модели описана в работе [7] и представляется в виде:

$$I_M = \psi_2(P, v, t, r, Cu, H_1 / H_2, \lambda_1, \lambda_2, c_1, c_2), \quad (1)$$

где P – нажатие в контакте; v – скорость скольжения; t – время проведения испытаний; r – характерный линейный размер контактного элемента; Cu – содержание меди в элементе

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

контактной пары; H_1/H_2 – безразмерный симплекс (отношение твердостей); λ_1, λ_2 – теплопроводности материалов контактной вставки и контактного провода соответственно; c_1, c_2 – удельные теплоемкости контактной вставки и контактного провода соответственно.

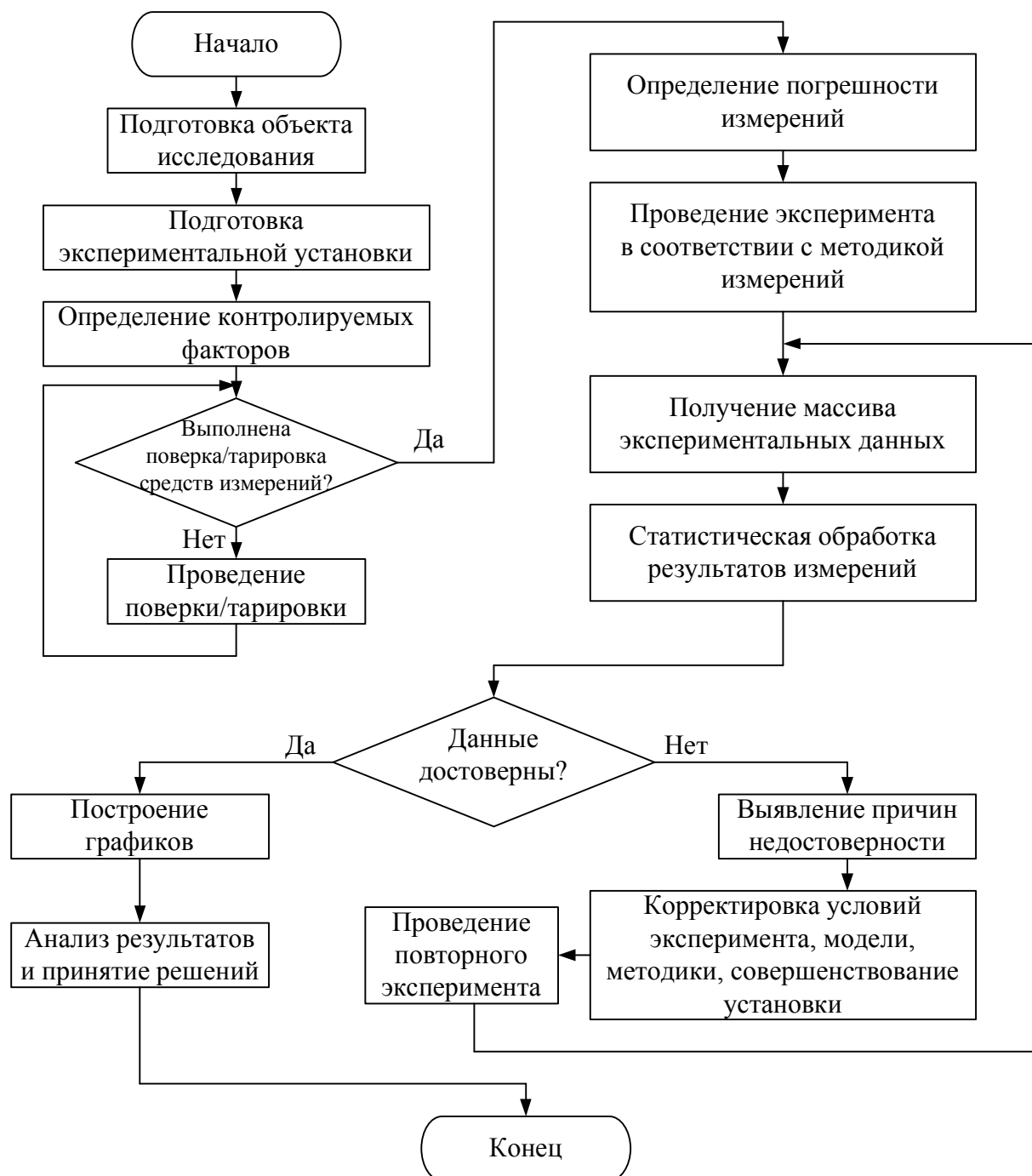


Рисунок 2 – Алгоритм планирования эксперимента

Первоначальный анализ результатов экспериментальных исследований в условиях высокоскоростного движения подтвердил необходимость внесения в модель критериев, учитывающих состояние окружающей среды, скорости аэродинамического воздействия, влияния температуры элементов контактной пары на фактическую площадь контакта [8] и на их твердость, а также критерия, учитывающего влияние силы трения в скользящем контакте.

В уравнении (1) в соответствии с положениями теории подобия отдельные факторы объединены в симплексы и комплексы [5]. При этом при формировании модели приняты следующие допущения:

- 1) побочные факторы объединяются в критерии (симплексы);
- 2) трудновоспроизводимые параметры объединяются в комплексы;
- 3) расчет приближенных значений масштабных коэффициентов производится по эмпирическим формулам.

Согласно π -теореме число безразмерных комбинаций комплексов и симплексов равно разности между количеством физических величин и основных единиц размерности, т. е. $k = \Phi - n = 10 - 4 = 6$. Таким образом, получено следующее уравнение:

$$I_M(P) = a_0 \cdot Me \cdot \left(\frac{Ptc_2}{(r(T_{I_h}))^2 \rho_1 c_1 (T_i, T_n) \chi} \right)^{\alpha_m} \left(Bi \frac{v t}{r(T_{I_h})} \right)^{\beta_m} (Cu)^{\gamma_m} \left(\frac{H_1(T_{I_h})}{H_2(T_{I_h})} \right)^{\varepsilon_m} \left(\frac{\varphi_0 \kappa_0}{\varphi_1 \kappa_1} (0,1 + v_b)^{\frac{1}{2}} \right)^{\lambda_m}, \quad (2)$$

где a_0 – функционал, отражающий влияние на процесс неучтенных факторов;

α_m – функционал, логарифмически зависящий от величины контактного нажатия в данный момент времени;

$\beta_m, \chi_m, \varepsilon_m, \lambda_m$ – определяемые экспериментально коэффициенты;

$Ptc_2/(r^2 \rho_1 c_1 \chi)$ – комплекс (мера отношения удельной мощности трения к способности контактного провода накапливать, а контактной вставки передавать тепло);

c_2 – удельная теплоемкость контактного провода;

vt/r – отношение пути трения к коэффициенту поверхности контактной вставки;

$T_{I_h} = a \cdot T_i^{\alpha_T} + b \cdot (\partial T_i / \partial z)^{\beta_T}$ – коэффициент, учитывающий влияние температуры на процесс изнашивания (a, b – экспериментальные коэффициенты, α_T, β_T – критерии, характеризующие тепловые процессы при взаимодействии элементов контактной пары);

$\partial T_i / \partial z$ – градиент температуры элемента контактной пары по нормали z к его поверхности; T_n – температура n -го тела;

T_i – температура i -го тела;

$Me \equiv \frac{T_i \lambda_1}{r f_T p v}$ – критерий Мейера ($p v$ – мощность трения (с учетом коэффициента распределения тепловых потоков), f_T – коэффициент трения);

$Bi = \frac{r \nabla T_1}{\Delta T_{1B}}$ – критерий Био; $r \nabla T_1$ – перепад температуры по объему контактной вставки;

$\Delta T_{1B} = T_1 - T_B$ – температурный напор (разность температур материала контактной вставки и окружающей среды);

$\frac{\varphi_0 \kappa_0}{\varphi_1 \kappa_1} (0,1 + v_b)^{\frac{1}{2}}$ – комплекс, учитывающий влияние факторов окружающей среды

(φ_0 / φ_1 – отношение среднего значения относительной влажности окружающей среды за пять лет к значению относительной влажности на момент исследований, κ_0 / κ_1 – отношение среднего значения запыленности окружающей среды за пять лет к значению ее запыленности на момент исследований, v_b – скорость встречного воздушного потока аэродинамического воздействия на контактную вставку).

Номограммы и диапазоны изменения коэффициентов и функционалов для расчета по модели (2) приведены в работе [10].

Тепловые процессы в элементах контактной пары УТ математически описываются системой дифференциальных уравнений Пуассона в частных производных. Тепловое состояние n -го тела характеризуется следующим дифференциальным уравнением теплового баланса [9]:

$$c_n \frac{dT_n}{dt} = \left(- \sum_{i=1}^{q(i \neq n)} \Lambda_{in} \right) T_n + \sum_{i=1}^{q(i \neq n)} (\Lambda_{in} T_i) + \sum \Delta U I_n, \quad (3)$$

где c_n – теплоемкость n -го тела;

n – количество тел, связанных в тепловом отношении с телом n ;

Λ_{in} – теплоотдача от i -го тела к n -му телу;

$\sum \Delta U I_n$ – потери мощности n -го тела от протекания электрического тока;

t – время.

Для контактной вставки изменение теплоемкости в переходном процессе при движении подвижного состава описывается формулой:

$$c_1 = \frac{1}{T_{10}} (\Lambda_{13} + \Lambda_{3в}) \int T_1 dt + \frac{1}{T_{10}} \int \sum (\Lambda_{13} + \Lambda_{3в}) T_3 dt + \frac{\Delta U I t}{T_{10}}, \quad (4)$$

где $\Lambda_{in} = \alpha(T_n - T_i)$; α – коэффициент теплоотдачи, $\alpha = \frac{m_1}{v} + m_2 v_b^2$ [2]; v_b – скорость встречного воздушного потока; v – скорость относительного перемещения контактного провода и контактной вставки в горизонтальной плоскости перпендикулярно оси пути; m_1, m_2 – коэффициенты, определяемые экспериментально.

В уравнении (4) приняты следующие обозначения: 1 – контактная вставка; 3 – полз токоприемника, в – воздушный поток.

Следует отметить, что при скоростях движения до 60 км/ч расхождение между экспериментальными и расчетными данными не превышает 5 %, а при скоростях свыше 150 км/ч погрешность становится более 10 %.

На рисунке 3 приведены графики механического изнашивания контактных элементов, полученные экспериментально и в результате расчета по существующей (рисунок 3, а) и усовершенствованной (рисунок 3, б) математическим моделям (уравнения (2) – (4)). Графики получены при нормальных условиях окружающей среды [11] и скорости воздушного потока 50 м/с. На рисунке 3 приняты обозначения: 1 – результаты эксперимента; 2 – результаты расчета.

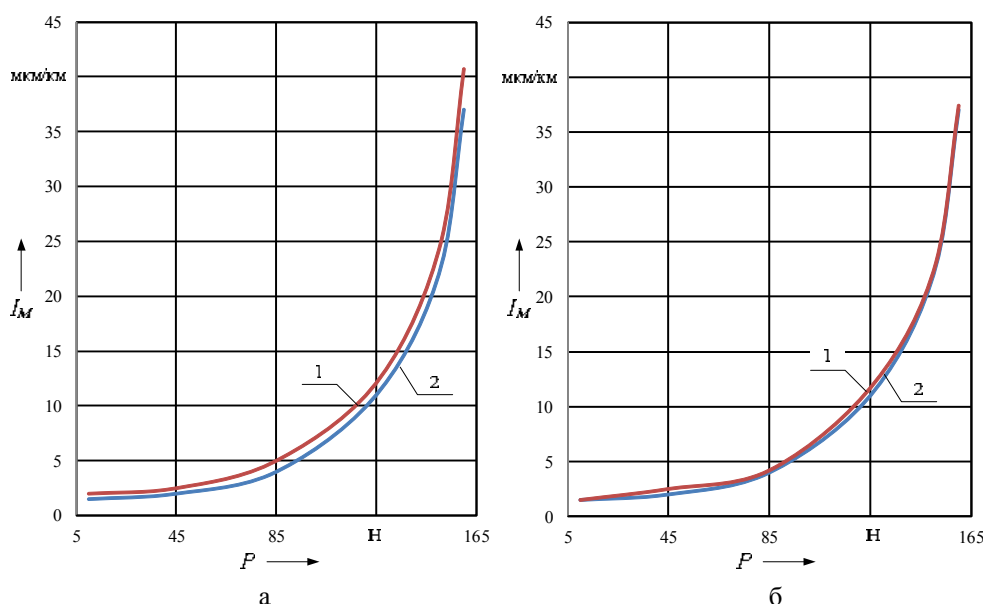


Рисунок 3 – Интенсивность изнашивания контактного элемента из графита по существующей (а) и по усовершенствованной (б) моделям

Анализ графиков на рисунке 3 позволяет сделать заключение о повышении точности расчета по математической модели (2) за счет учета влияния аэродинамического воздействия воздушного потока и скорости движения подвижного состава для моделирования механической составляющей изнашивания элементов контактных пар при высоких скоростях движения (погрешность снизилась с 10 до 5 %).

Список литературы

1. Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» до 2025 года [Текст] : утв. распоряжением Правительства Российской Федерации 19.03.19 : ввод. в действие с 19.03.19. – URL: <http://government.ru/docs/36094> (дата обращения: 01.09.2019).
2. Сидоров, О. А. Исследования электромеханического изнашивания контактных пар устройств токосъема электрического транспорта [Текст] / О. А. Сидоров, В. М. Филиппов, С. А. Ступаков // Трение и износ / Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого» НАН Беларуси. – Гомель, 2015. – Т. 36. – № 5. – С. 390 – 394.
3. Филиппов, В. М. Совершенствование методов моделирования изнашивания контактных элементов токоприемников электроподвижного состава [Текст]: Дис... канд. техн. наук: 05.22.07: защищена 19.10.12: утв. 11.03.13 / Филиппов Виктор Михайлович. – Омск, 2012. – 153 с.
4. Вознесенский, В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях [Текст] / В. А. Вознесенский. – М.: Статистика, 1974. – 192 с.
5. Шенк, Х. Теория инженерного эксперимента / Пер. с англ. Е. Г. Коваленко / Под ред. чл.-корр. АН РФ Н. П. Бусленко / Х. Шенк. – М.: Мир, 1972. – 381 с.
6. Сидоров, О. А. Методика прогнозирования износа элементов контактных пар монорельсового электрического транспорта [Текст] / О. А. Сидоров, В. М. Филиппов // Современные наукоемкие технологии. – Пенза: Академия Естествознания, 2016. – № 2-3. – С. 441–446.
7. Браун, Э. Д. Моделирование трения и изнашивания в машинах [Текст] / Э. Д. Браун, Ю. А. Евдокимов, А. В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1982. – 191 с.
8. Biesenack H., Pintscher F. Kontakt zwischen Fahrdrabt und Schleifleiste–Ausgangspunkte zur Bestimmung des elektrischen Verschleißes // *Elektrische Bahnen*. – 2005. – no. 3. – p. 138–146.
9. Григорьев, В. Л. Тепловые процессы в устройствах тягового электроснабжения [Текст]: Учебное пособие / В. Л. Григорьев, В. В. Игнатьев / УМЦ ЖДТ. – М., 2007. – 182 с.
10. Ступаков, С. А. Моделирование электромеханического изнашивания контактных пар устройств токосъема электрического транспорта [Текст] / С. А. Ступаков, О. А. Сидоров, В. М. Филиппов // Трение и смазка в машинах и механизмах. М.: Машиностроение, 2012. – № 4. – С. 23 – 30.
11. ГОСТ 8.050-73. Государственная система обеспечения единства измерений. Нормальные условия выполнения линейных и угловых измерений [Текст]. – Введ. 1975–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1973. – 19 с.

References

1. *Dolgosrochnaya programma razvitiya otkrytogo aktsionernogo obshchestva «Rossiiskiy zheleznyye dorogi» do 2025 goda* (Long-term development program of the Russian Railways open joint-stock company until 2025), Moscow, 2019, 135 p. URL: <http://government.ru/docs/36094>.
2. Sidorov O. A., Philippov V. M., Stupakov S. A. Studies of the electromechanical wear of contact pairs in the current collection devices of electric transports [Issledovaniya elektromekhanicheskogo iznashivaniy kontaktnykh par ustroystv tokosyoma elektricheskogo transporta]. *Treniye i iznos – Journal of Friction and Wear*, 2015, V. 36, no. 5, pp. 390 – 394.
3. Philippov V. M. *Sovershenstvovaniye metodov modelirovaniya iznashivaniya kontaktnykh elementov tokopriyomnikov elektropodvizhnogo sostava* (Improving methods for modeling wear of contact elements of current collectors of electric rolling stock). Doctor's thesis, Omsk, OSTU, 2012, 153 p.

4. Voznesenskii V. A. *Statisticheskiye metody planirovaniya eksperimenta v tekhniko-ekonomicheskikh issledovaniyakh* (Statistical methods of experimental design in feasibility studies). Moscow: Statistika, 1974, 192 p.
5. Schenck H. *Teoriya inzhenernogo eksperimenta* (Theories of Engineering Experimentation). Moscow: Mir, 1972, 381 p.
6. Sidorov O. A., Philippov V. M. Method of prediction elements wear contact pairs monorail electric vehicles [Metodika prognozirovaniya iznosa elementov kontaktnykh par monorel'sovogo elektricheskogo transporta]. *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii – Modern high technology*, 2016, no. 2-3, pp. 441 – 446.
7. Braun E. D., Yevdokimov Yu. A., Chichinadze A. V. *Modelirovaniye treniya i iznashivaniya v mashinakh* (Simulation of friction and wear in machines). Moscow: Mashinostroyeniye, 1982, 191 p.
8. Biesenack H., Pintscher F. Kontakt zwischen Fahrdrabt und Schleifleiste–Ausgangspunkte zur Bestimmung des elektrischen Verschleißes, *Elektrische Bahnen*, 2005, no. 3. pp. 138 – 146.
9. Grigoryev V. L., Ignatyev V. V. *Teplovyie protsessy v ustroystvakh tyagovogo elektrosnabzheniya* (Thermal processes in traction power supply devices). Moscow: UMC ZHDT, 2007, 182 p.
10. Stupakov S. A., Sidorov O. A., Philippov V. M. Modelling of electromechanical wear of contact pairs of current pickup devices electric transport [Modelirovaniye elektromekhanicheskogo iznashivaniya kontaktnykh par ustroystv tokosyoma elektricheskogo transporta]. *Treniye i smazka v mashinakh i mekhanizmax – Friction and lubrication in machines and mechanisms*, 2012, no. 4, pp. 23 – 30.
11. *Normal'nyye usloviya vypolneniya lineinykh i uglovykh izmerenii, GOST 8.050-73* (Normal conditions for linear and angular measurements). Moscow: Standarty, 1973, 19 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Филиппов Виктор Михайлович

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 (3812) 31-16-07.

E-mail: fvm-omgups@mail.ru

Сидоров Олег Алексеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, заведующий кафедрой «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-34-46.

E-mail: sidorovoa@omgups.ru

Ступаков Сергей Анатольевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Информатика и компьютерная графика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-66.

E-mail: stupakov1@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Philippov Victor Mikhailovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Railway power supply», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-16-07.

E-mail: fvm-omgups@mail.ru

Sidorov Oleg Alekseevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor of Technical Sciences, Head of department «Railway power supply», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-34-46.

E-mail: sidorovoa@omgups.ru

Stupakov Sergei Anatolyevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Informatics and computer graphics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-66.

E-mail: stupakov1@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Филиппов, В. М. К вопросу изнашивания элементов контактных пар устройств токосъема электрического транспорта при высокоскоростном движении [Текст] / В. М. Филиппов, О. А. Сидоров, С. А. Ступаков // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 3 (39). – С. 49 – 57.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Philippov V. M., Sidorov O. A., Stupakov S. A. To the question about wearing of contact couples elements of electric transport current devices for high speed movement. Journal of Transsib Railway Studies, 2019, vol. 3, no. 39, pp. 49 – 57 (In Russian).

УДК 621.331

В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм

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

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ МОСКОВСКОГО ЦЕНТРАЛЬНОГО КОЛЬЦА ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫПРЯМИТЕЛЬНО-ИНВЕРТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Аннотация. В настоящей статье представлены результаты расчетов изменения показателей энергоэффективности Московского центрального кольца, таких как удельный расход электроэнергии, отпущенной на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций, удельная рекуперация, технические потери электроэнергии в системе тягового электроснабжения при ее передаче к электроподвижному составу, в том числе технические потери энергии рекуперации, в зависимости от различных вариантов установки выпрямительно-инверторных преобразователей на тяговых подстанциях участка.

Ключевые слова: расход электроэнергии, рекуперация, тяга поездов, тяговые подстанции, выпрямительно-инверторные преобразователи, потери энергии.

Vasiliy T. Cheremisin, Mikhail M. Nikiforov, Alexander S. Vilgelm

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

ASSESSMENT OF THE MOSCOW CENTRAL RING ENERGY EFFICIENCY POTENTIAL THROUGH THE USE OF RECTIFIER-INVERTER CONVERTERS

Abstract. This article presents the results of changes calculations in the energy efficiency indicators of the Moscow Central Ring, such as the specific consumption of electricity released for traction by trains of traction substation meters, specific recovery, technical losses of electricity in the traction power supply system when it is transferred to electric rolling stock, including technical recuperation energy loss, depending on various installation options of rectifier-inverter converters in traction substations part.

Keywords: power consumption, recovery, traction of trains, traction substations, rectifier-inverter converters, energy losses.

Улучшение показателей энергетической эффективности в границах полигона Московского центрального кольца (МЦК) является актуальной задачей. Для оценки возможности увеличения доли реализованной энергии, вырабатываемой при использовании рекуперативного торможения электропоездами [1 – 5], за счет применения на участке перспективных средств накопления [6] и преобразования энергии специалистами Омского государственного университета путей сообщения были выполнены расчеты показателей энергетической эффективности данного участка для различных вариантов установки выпрямительно-инверторных преобразователей (ВИПов) на тяговых подстанциях постоянного тока с целью определения их оптимального количества и мест установки.

С этой целью была создана расчетная модель работы системы тягового электроснабжения полигона МЦК в условиях действующей организации движения поездов. На основании результатов выполненных натурных экспериментов были проанализированы показатели работы на участке электропоездов постоянного тока ЭС2Г: скоростные режимы, кривые токо-

потребления и рекуперации, расход энергии и объемы рекуперации за поездку и по перегонам в отдельности. При создании расчетной модели был использован также суточный исполненный график движения поездов за экспериментальные сутки и на его основе выполнены электрические расчеты, по результатам которых стало возможным определять основные показатели энергоэффективности работы системы тягового электроснабжения в границах полигона МЦК.

К основным рассматриваемым в работе показателям энергоэффективности относятся следующие:

- удельный расход электроэнергии, отпущенной на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций;
- удельная рекуперация по счетчикам электропоездов;
- технические потери электроэнергии в системе тягового электроснабжения при ее передаче к электроподвижному составу [7, 8];
- технические потери энергии рекуперации в системе тягового электроснабжения [9].

Полигон МЦК получает питание от пяти тяговых подстанций [10]. В настоящей работе рассмотрены все комбинации установки от одного до пяти ВИПов на тяговых подстанциях МЦК и дана оценка возникающего при этом эффекта.

Существует пять вариантов установки одного ВИПа на тяговые подстанции полигона МЦК: 1 – на тяговую подстанцию Андроновка, 2 – на тяговую подстанцию Окружная, 3 – на тяговую подстанцию Москва-Киевская, 4 – на тяговую подстанцию Покровско-Стрешнево, 5 – на тяговую подстанцию Белокаменная. Данные варианты с расчетными значениями суточного эффекта в натуральном выражении от установки одного ВИПа на полигоне МЦК представлены в таблице 1.

Из данных таблицы 1 видно, что наибольший потенциал возврата энергии рекуперации по ВИПу имеет тяговая подстанция Андроновка (1-й вариант) – 9 396 кВт·ч в сутки. В этом случае абсолютный расход энергии на полигоне МЦК в сутки сократится на 9,7 % (14 588 кВт·ч) и составит 136 076 кВт·ч.

Значения основных составляющих энергетической эффективности для пяти вариантов установки одного ВИПа представлены на диаграммах: на рисунке 1 – удельный расход электроэнергии, отпущенной на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций и удельная рекуперация, на рисунке 2 – технические потери электроэнергии в СТЭ при ее передаче к ЭПС и технические потери энергии рекуперации в СТЭ.

Таблица 1 – Величины суточного эффекта в натуральном выражении (кВт·ч) от установки одного ВИПа на полигоне МЦК

Объем возврата энергии по ВИПам тяговых подстанций	Вариант установки ВИПов на тяговые подстанции				
	1	2	3	4	5
Андроновка	9396	0	0	0	0
Окружная	0	7857	0	0	0
Москва-Киевская	0	0	5392	0	0
Покровско-Стрешнево	0	0	0	1865	0
Белокаменная	0	0	0	0	1666
Итого	9396	7857	5392	1865	1666
Расход энергии по тяговым подстанциям	136076	136318	137345	142299	143850
Сокращение расхода по тяговым подстанциям за счет ВИПов	14588	14346	13319	8365	6814

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

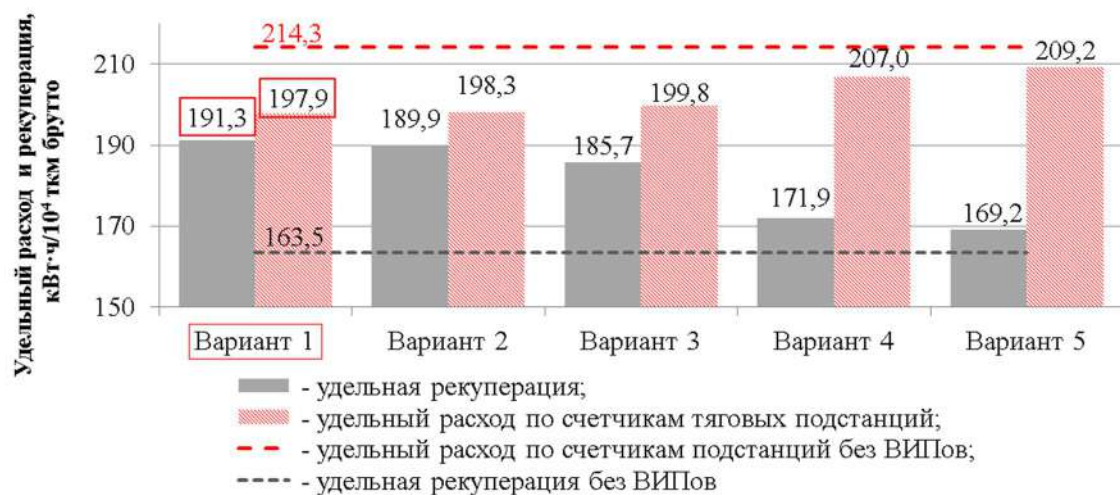


Рисунок 1 – Диаграмма значений удельного расхода электроэнергии, отпущенной на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций, и удельной рекуперации для вариантов установки одного ВИПа на тяговые подстанции МЦК

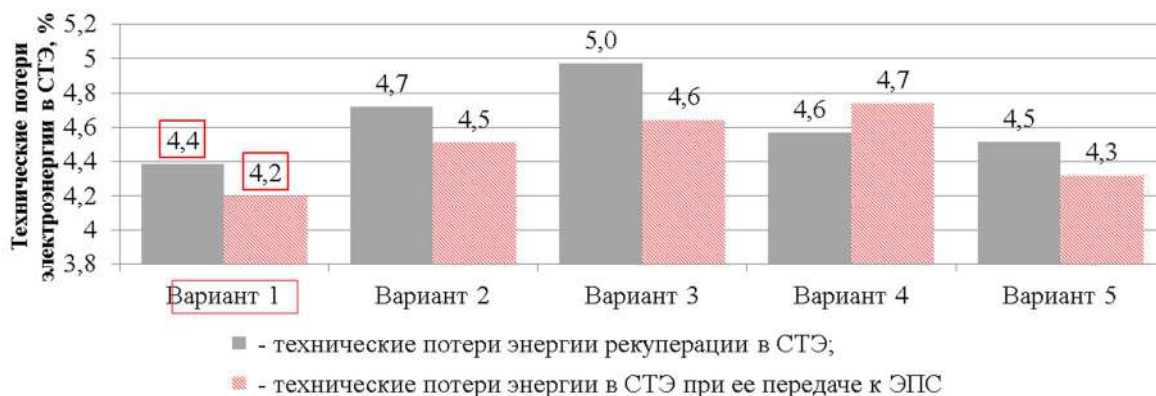


Рисунок 2 – Диаграмма значений технических потерь электроэнергии в СТЭ при ее передаче к ЭПС и технических потерь энергии рекуперации в СТЭ для вариантов установки одного ВИПа на тяговые подстанции МЦК

Из рисунка 1 видно, что установка одного ВИПа на тяговой подстанции Андроновка (1-й вариант) позволит увеличить величину удельной рекуперации по участку до 191,3 кВт·ч/10⁴ ткм брутто, или на 22,1 % относительно уровня удельной рекуперации для текущих условий – без ВИПов на тяговых подстанциях. Это позволит сократить также величину удельного расхода электроэнергии, отпущенной на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций до значения 197,9 кВт·ч/10⁴ ткм брутто, или на 9,7 % относительно уровня удельного расхода по тяговым подстанциям для текущих условий – без ВИПов. Это достигается за счет увеличения величины реализованной энергии рекуперации до 97,3 % от абсолютной величины (131 518 кВт·ч). В данном случае нереализованной остается лишь 3 604 кВт·ч энергии рекуперации в сутки.

Из рисунка 2 видно, что установка ВИПа на тяговой подстанции Андроновка (1-й вариант) является оптимальным вариантом и с точки зрения таких показателей, как технические потери электроэнергии в СТЭ при ее передаче к ЭПС и технические потери энергии рекуперации в СТЭ, которые имеют наименьшие значения из рассмотренных вариантов установки одного ВИПа на полигоне МЦК – 4,20 и 4,39 % соответственно.

Установка двух ВИПов на пяти тяговых подстанциях полигона МЦК может быть осуществлена десятью различными вариантами. Все варианты, а также величины суточного эффекта в натуральном выражении от установки двух ВИПов на полигоне МЦК представлены в таблице 2, из данных которой видно, что наибольший потенциал возврата энергии ре-

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

куперации по ВИПам имеют тяговые подстанции Андроновка и Окружная (1-й вариант) – 10 707 кВт·ч в сутки. В этом случае абсолютный расход энергии на полигоне МЦК в сутки сократится на 9,7 % (14 563 кВт·ч) и составит 136 101 кВт·ч.

Значения основных показателей энергетической эффективности для десяти вариантов установки двух ВИПов представлены на диаграммах: на рисунке 3 – удельный расход электроэнергии по счетчикам тяговых подстанций и удельная рекуперация, на рисунке 4 – технические потери электроэнергии.

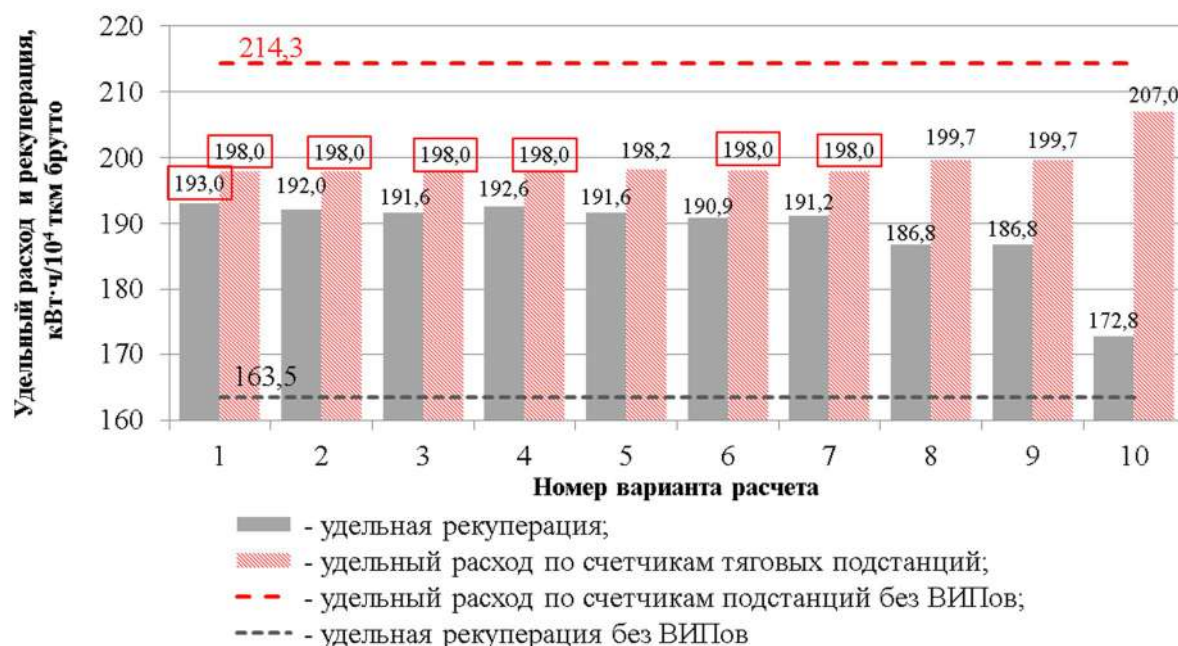


Рисунок 3 – Диаграмма значений удельного расхода электроэнергии, отпущенной на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций и удельной рекуперации для десяти вариантов установки двух ВИПов на тяговые подстанции МЦК

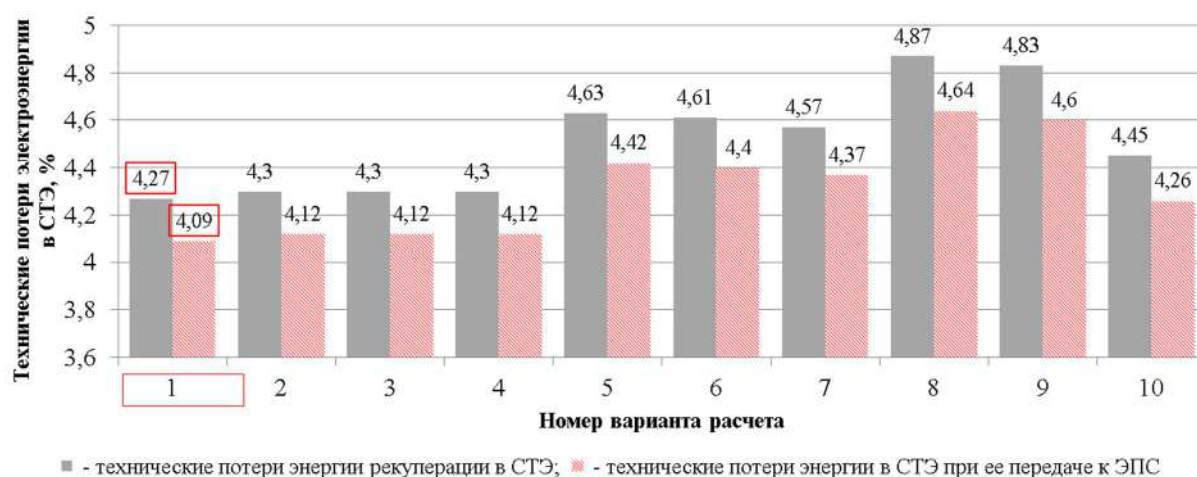


Рисунок 4 – Диаграмма значений технических потерь электроэнергии в СТЭ при ее передаче к ЭПС и технических потерь энергии рекуперации в СТЭ для десяти вариантов установки двух ВИПов на тяговые подстанции МЦК

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Таблица 2 – Величины суточного эффекта в натуральном выражении (кВт·ч) от установки двух ВИПов на полигоне МЦК

Объем возврата энергии по ВИПам тяговых подстанций, кВт·ч	Вариант установки ВИПов на тяговые подстанции									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Андроновка	8049	9083	9099	9420	0	0	0	0	0	0
Окружная	2658	0	0	0	7981	7455	7428	0	0	0
Москва-Киевская	0	859	0	0	996	0	0	5131	4925	0
Покровско-Стрешнево	0	0	564	0	0	948	0	973	0	1293
Белокаменная	0	0	0	898	0	0	1279	0	1222	1267
Итого	10707	9942	9663	10318	8977	8403	8707	6104	6147	2560
Расход энергии по тяговым подстанциям, кВт·ч	136101	136111	136099	136103	136250	136148	136134	137294	137269	142305
Сокращение расхода по тяговым подстанциям за счет ВИПов, кВт·ч	14563	14553	14565	14561	14414	14516	14530	13370	13395	8359

Из рисунка 3 видно, что установка двух ВИПов на тяговые подстанции Андроновка и Окружная (1-й вариант) позволит увеличить величину удельной рекуперации по участку до $193,0 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/10^4 \text{ ткм}$ брутто, или на 23,2 % относительно уровня удельной рекуперации для текущих условий – без ВИПов на тяговых подстанциях. Это позволит также сократить величину удельного расхода электроэнергии, отпущенной на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций, до значения $198,0 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/10^4 \text{ ткм}$ брутто, или на 9,7 % относительно уровня удельного расхода по тяговым подстанциям для текущих условий – без ВИПов. Это достигается за счет увеличения величины реализованной энергии рекуперации до 98,2 % от абсолютной величины ($132\,708 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$). В данном случае нереализованной остается лишь $2\,414 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ энергии рекуперации в сутки.

Из рисунка 4 видно, что установка ВИПов на тяговых подстанциях Андроновка и Окружная (1-й вариант) является оптимальным вариантом с точки зрения таких показателей, как технические потери электроэнергии в СТЭ при ее передаче к ЭПС и технические потери энергии рекуперации в СТЭ, которые имеют наименьшие значения из рассмотренных вариантов установки ВИПов на полигоне МЦК – 4,09 и 4,27 % соответственно.

Существует десять вариантов установки трех ВИПов на пяти тяговых подстанциях полигона МЦК. Все варианты, а также величины суточного эффекта в натуральном выражении от установки трех ВИПов на полигоне МЦК представлены в таблице 3, из которой видно, что наибольший потенциал возврата энергии рекуперации по ВИПам имеет вариант с установкой ВИПов на тяговые подстанции Андроновка, Окружная и Москва-Киевская (1-й вариант) – $11\,651 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ в сутки. В этом случае абсолютный расход энергии на полигоне МЦК в сутки сократится на 9,64 % ($14\,521 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$) и составит $136\,143 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$.

При этом наибольшее сокращение расхода энергии по тяговым подстанциям соответствует вариантам установки ВИПов на тяговые подстанции Андроновка, Окружная и Покровско-Стрешнево (вариант 2), а также Андроновка, Окружная и Белокаменная (вариант 3) – $136\,123$ и $136\,128 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ соответственно.

Значения основных показателей энергетической эффективности для десяти вариантов установки трех ВИПов представлены на диаграммах: на рисунке 5 – удельный расход электроэнергии, отпущенной на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций, и удельная

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

рекуперация, на рисунке 6 – технические потери электроэнергии в СТЭ при ее передаче к ЭПС и технические потери энергии рекуперации в СТЭ.

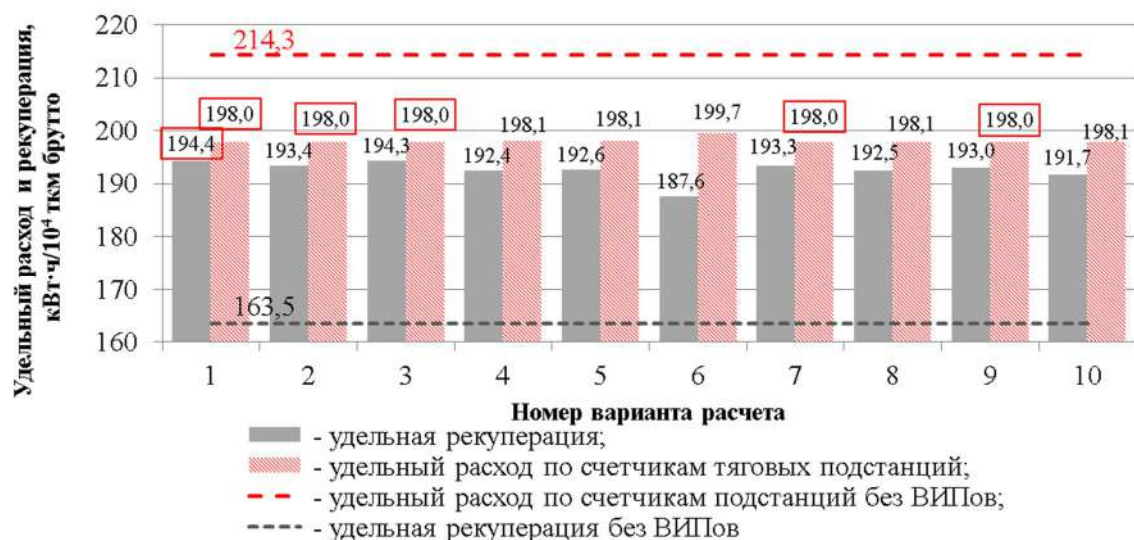


Рисунок 5 – Диаграмма значений удельного расхода электроэнергии, отпущенной на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций, и удельной рекуперации для десяти вариантов установки трех ВИПов на тяговые подстанции МЦК

Таблица 3 – Величины суточного эффекта в натуральном выражении (кВт·ч) от установки трех ВИПов на полигоне МЦК

Объем возврата энергии по ВИПам тяговых подстанций, кВт·ч	Вариант установки ВИПов на тяговые подстанции									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Андроновка	8009	7913	8205	0	0	0	9309	9027	9412	0
Окружная	3057	2618	2604	8046	7965	0	0	0	0	7436
Москва-Киевская	585	0	0	521	558	5096	805	864	0	0
Покровско-Стрешнево	0	485	0	960	0	420	0	438	527	441
Белокаменная	0	0	818	0	1215	1218	762	0	707	1202
Итого	11651	11016	11627	9527	9738	6734	10876	10329	10646	9079
Расход энергии по тяговым подстанциям, кВт·ч	136143	136123	136128	136197	136174	137298	136136	136156	136127	136157
Сокращение расхода по тяговым подстанциям за счет ВИПов, кВт·ч	14521	14541	14536	14467	14490	13366	14528	14508	14537	14507

Из рисунка 5 видно, что установка трех ВИПов на тяговые подстанции Андроновка, Окружная и на любую из трех остальных – Москва-Киевская (1-й вариант), Покровско-Стрешнево (2-й вариант), Белокаменная (3-й вариант) – приведет к сокращению удельного расхода электроэнергии, отпущенной на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций, до значения 198,0 кВт·ч/10⁴ ткм брутто, или на 9,6 % относительно уровня удельного расхода по тяговым подстанциям для текущих условий – без ВИПов.

Установка трех ВИПов на тяговые подстанции Андроновка, Окружная и на Покровско-Стрешнево или Белокаменную позволит увеличить величину удельной рекуперации по участку до 193,4 или 194,3 кВт·ч/10⁴ ткм брутто соответственно. Это достигается за счет уве-

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

личения величины реализованной энергии рекуперации до 98,4 и 98,9 % от абсолютной величины (132 988 и 133 584 кВт·ч) соответственно. В данном случае нереализованной остается лишь 2 134 или 1 538 кВт·ч энергии рекуперации в сутки соответственно.

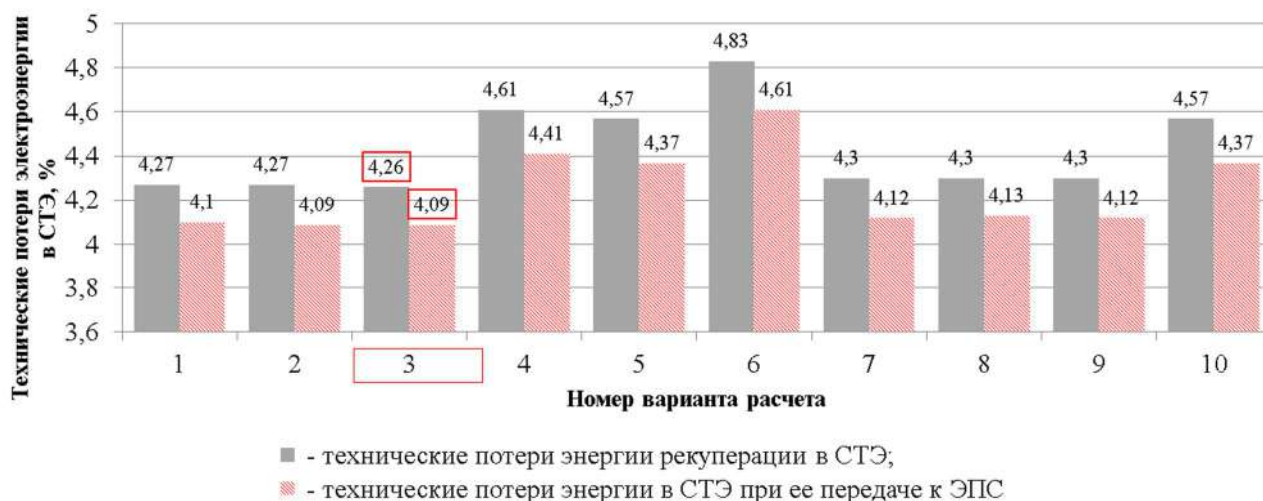


Рисунок 6 – Диаграмма значений технических потерь электроэнергии в СТЭ при ее передаче к ЭПС и технических потерь энергии рекуперации в СТЭ для десяти вариантов установки трех ВИПов на тяговые подстанции МЦК

Из рисунка 6 видно, что установка ВИПов на тяговых подстанциях Андроновка, Окружная и Белокаменная (3-й вариант), является оптимальным вариантом, так как технические потери электроэнергии в СТЭ при ее передаче к ЭПС и технические потери энергии рекуперации в СТЭ имеют наименьшие значения из рассмотренных вариантов установки ВИПов на полигоне МЦК – 4,09 и 4,26 % соответственно.

Варианты установки четырех ВИПов на тяговые подстанции МЦК с величинами суточного эффекта в натуральном выражении представлены в таблице 4, из данных которой видно, что наибольшую эффективность имеет вариант установки четырех ВИПов на тяговые подстанции Андроновка, Окружная, Покровско-Стрешнево, Белокаменная (2-й вариант), так как в этом случае абсолютный расход энергии на полигоне МЦК в сутки сократится на 9,63 % (14 512 кВт·ч) и составит 136 152 кВт·ч.

Значения основных показателей энергетической эффективности для четырех вариантов установки четырех ВИПов представлены на диаграммах: на рисунке 7 – удельный расход электроэнергии, отпущенной на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций, и удельная рекуперация, на рисунке 8 – технические потери электроэнергии в СТЭ при ее передаче к ЭПС и технические потери энергии рекуперации в СТЭ.

Таблица 4 – Величины суточного эффекта в натуральном выражении (кВт·ч) от установки четырех ВИПов на полигоне МЦК

Объем возврата энергии по ВИПам тяговых подстанций	Вариант установки ВИП на тяговые подстанции			
	1	2	3	4
Андроновка	7952	8215	9330	0
Окружная	3140	2622	0	8050
Москва-Киевская	465	0	871	495
Покровско-Стрешнево	444	444	417	412
Белокаменная	0	702	715	1222
Итого	12001	11983	11333	10179
Расход энергии по тяговым подстанциям	136169	136152	136164	136201
Сокращение расхода по тяговым подстанциям за счет ВИПов	14495	14512	14500	14463

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Из рисунка 7 видно, что установка четырех ВИПов на тяговые подстанции Андроновка, Окружная, Покровско-Стрешнево, Белокаменная (2-й вариант) позволит увеличить величину удельной рекуперации по участку до 194,8 кВт·ч/10⁴ ткм брутто, или на 24,3 % относительно уровня удельной рекуперации для текущих условий – без ВИПов на тяговых подстанциях. Это позволит также сократить величину удельного расхода электроэнергии, отпущенной на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций, до значения 198,05 кВт·ч/10⁴ ткм брутто, или на 9,6 % относительно уровня удельного расхода по тяговым подстанциям для текущих условий – без ВИПов. Это достигается за счет увеличения величины реализованной энергии рекуперации до 99,1 % от абсолютной величины (133 917 кВт·ч). В данном случае нереализованной остается лишь 1 205 кВт·ч энергии рекуперации в сутки.

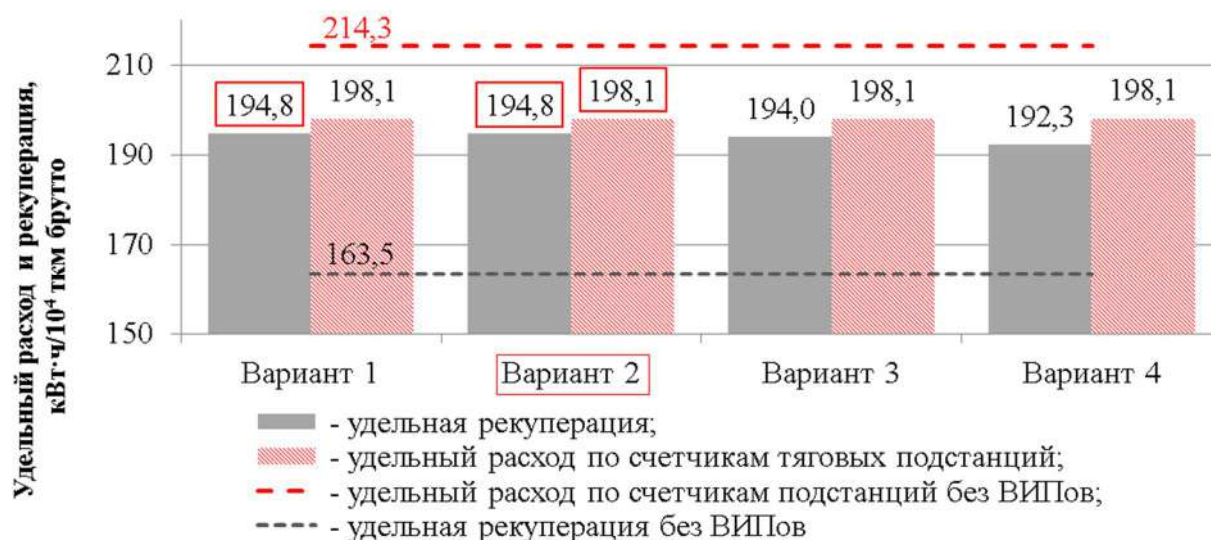


Рисунок 7 – Диаграмма значений удельного расхода электроэнергии, отпущенной на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций, и удельной рекуперации для четырех вариантов установки четырех ВИПов на тяговые подстанции МЦК

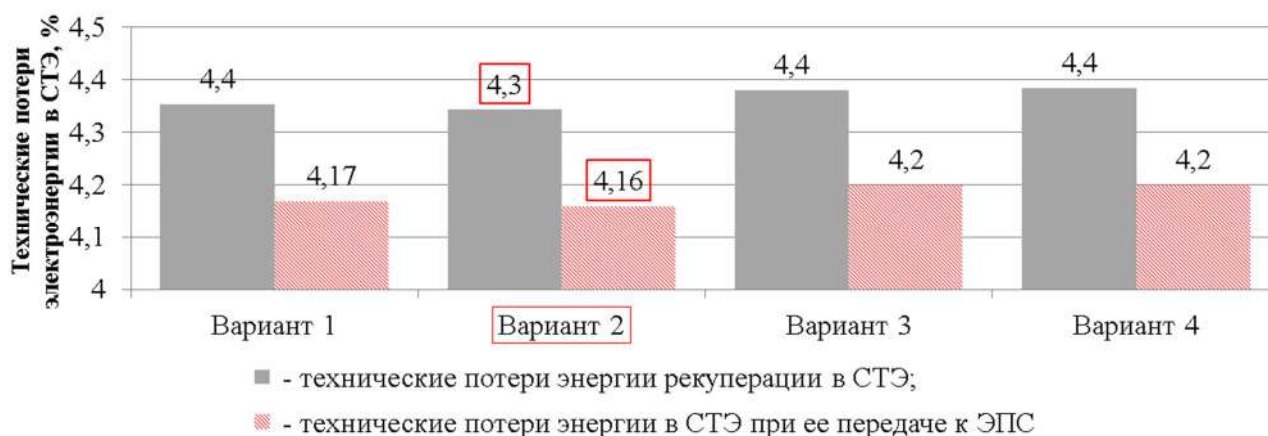


Рисунок 8 – Диаграмма значений технических потерь электроэнергии в СТЭ при ее передаче к ЭПС и технических потерь энергии рекуперации в СТЭ для четырех вариантов установки четырех ВИПов на тяговые подстанции МЦК

Из рисунка 8 видно, что установка ВИПов на тяговых подстанциях по варианту 2 является оптимальным вариантом с точки зрения таких показателей, как технические потери электроэнергии в СТЭ при ее передаче к ЭПС и технические потери энергии рекуперации в СТЭ, которые имеют наименьшие значения из рассмотренных вариантов установки четырех ВИПов на полигоне МЦК, – 4,16 и 4,34 % соответственно.

Установка ВИПов на всех пяти тяговых подстанциях приведет к сокращению абсолютного расхода энергии на полигоне МЦК в сутки на 9,63 % (14 675 кВт·ч) и составит 135 989 кВт·ч. Это позволит увеличить величину удельной рекуперации по участку до 196,6 кВт·ч/10⁴ ткм брутто, или на 25,4 % относительно уровня удельной рекуперации для текущих условий – без ВИПов на тяговых подстанциях. Это позволит также сократить величину удельного расхода электроэнергии, отпущенной на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций, до значения 197,8 кВт·ч/10⁴ ткм брутто, или на 9,7 % относительно уровня удельного расхода по тяговым подстанциям для текущих условий – без ВИПов. Технические потери электроэнергии в СТЭ при ее передаче к ЭПС и технические потери энергии рекуперации в СТЭ, которые имеют наименьшие значения из рассмотренных вариантов установки четырех ВИПов на полигоне МЦК – 4,17 и 4,35 % соответственно.

Подводя итог выполненным работам, можно сделать вывод о том, что установка ВИПов на полигоне МЦК приводит к увеличению реализованной энергии рекуперации до значений 86,1 – 99,1 % в зависимости от количества ВИПов и выбора мест их установки, что соответствует доле энергии рекуперации от расхода на тягу по счетчикам ЭПС 47,0 – 54,2 % и величине удельной рекуперации 169,2 – 194,8 кВт·ч.

При этом наиболее предпочтительным представляется вариант установки одного ВИПа на тяговой подстанции Андроновка, что позволит при минимальных финансовых затратах сократить величину удельного расхода электроэнергии, отпущенной на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций, на 9,7 % относительно уровня удельного расхода по тяговым подстанциям для текущих условий без использования ВИПов. Суточная экономия энергии, отпущенной на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций, в данном случае может достигнуть 14,6 тыс. кВт·ч.

Список литературы

1. Вильгельм, А. С. Экспериментальные исследования по оценке потенциала повышения энергетической эффективности тяги поездов за счет применения рекуперативного торможения [Текст] / А. С. Вильгельм, А. Н. Ларин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2011. – № 1(5). – С. 50 – 56.
2. Повышение энергетической эффективности рекуперативного торможения на полигоне постоянного тока: Монография [Текст] / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров и др. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2016. – 176 с.
3. Черемисин, В. Т. Эффективность использования энергии рекуперации на железных дорогах постоянного и переменного тока: Монография [Текст] / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2018. – 216 с.
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 / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 1(25). – С. 60 – 70.
5. 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. – М. – 2018. – № 1(74). – С. 34 – 45.
6. Вильгельм, А. С. К вопросу о выборе накопителя на участках постоянного тока с применением рекуперативного торможения [Текст] / А. С. Вильгельм // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2013. – С. 160 – 167.
7. Никифоров, М. М. Оценка технологических потерь электроэнергии в системе тягового электроснабжения постоянного тока [Текст] / М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм, А. В. Язов // Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности

и на транспорте: Материалы науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2012. – С. 40 – 45.

8. Assessment of train traction electric energy losses / Cheremisin V.T., Nikiforov M.M., Ushakov S.Y. // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon-2018 / 2019. С. 8602528.

9. 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.

10. Вильгельм, А. С. Пути повышения энергоэффективности на Малом кольце Московской железной дороги с использованием инверторов [Текст] / А. С. Вильгельм, В. Л. Незевак, В. Т. Черемисин // Транспорт Урала/ Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2014. – № 3(42). – С. 90 – 94.

References

1. Vilgelm A. S., Larin, A. N. Experimental researches according to potential of increase of power efficiency of draught of trains at the expense of application of recuperative braking [Eksperimental'nyye issledovaniya po otsenke povysheniya effektivnosti energeticheskoy effektivnosti]. *Izvestiya Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2011. no. 1(5). С. 50 – 56.

2. Cheremisin V. T., Nikiforov M. M., Kashtanov A. L., Vilgelm A. S. Increase of recuperative braking power efficiency at sites of a direct current [Povysheniye energeticheskoy effektivnosti rekuperativnogo tormozheniya na poligone postoyannogo toka]. *Monografiya – Scientific monograph*, Omsk State Transport University. Omsk, 2016; 176 p.

3. Cheremisin V. T., Nikiforov M. M., Vilgelm A. S. Efficiency of recuperation energy using on the railways of direct and alternating current [Effektivnost' ispol'zovaniya energii rekuperatsii na zheleznykh dorogakh postoyannogo i peremennogo toka]. *Monografiya – Scientific monograph*, Omsk State Transport University. Omsk, 2018; 216 p.

4. Cheremisin V. T., Nikiforov M. M., Vilgelm A. S. Methodology for evaluating the energy efficiency of regenerative braking application and energy recovery use [Metodologiya otsenki energeticheskoi effektivnosti primeneniya rekuperativnogo tormozheniya i ispol'zovaniya energii rekuperatsii]. *Izvestiya Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*. 2016, no. 1 (25), pp. 60 – 70.

5. Cheremisin V. T., Nikiforov M. M., Vilgelm A. S. Method for Estimating the Use of Regenerative Energy / *Mir transporta – World of transport and transportation*, Vol. 16, Iss. 1, pp. 34–45 (2018).

6. Vilgelm A. S. To the question of the storage of the storage at the direct current sites with the application of recoverable braking [K voprosu o vybere nakopitelya na uchastkakh postoyannogo toka s primeneniym rekuperativnogo tormozheniya]. *Materialy nauch.-prakt. konf. «Innovatsionnyye proyekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte»* (Materials of scientific-practical. conf. «Innovative projects and technologies in education, industry and transport»). – Omsk, 2013. pp. 160 – 167.

7. Nikiforov M. M., Vilgelm A. S., Yazov A. V. Estimation of technological losses of electric power in the DC traction power supply system [Ocenka tekhnologicheskikh poter' ehlektroenergii v sisteme tyagovogo ehlektrosnabzheniya postoyannogo toka]. *Materialy nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj Dnyu Rossijskoj nauki: «Innovatsionnye proyekty i novye tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte»* (Materials of the scientific-practical conference dedicated to the Day of Russian Science: «Innovative projects and new technologies in education, industry and transport»). Omsk, 2012, pp. 40 – 45.

8. Assessment of train traction electric energy losses / Cheremisin V. T., Nikiforov M. M., Ushakov S.Y. // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon-2018 / 2019. С. 8602528.

9. Vilgelm A. S., Nikiforov M. M. Energy recovery influence on the level of losses in traction power supply system [Vliyaniye energii rekuperatsii na uroven' poter' v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya]. *Transport Urala – Transport of Urals*, 2017. no. 2 (53), pp. 55 – 60.

10. Vilgelm A. S., Nezevak V. L., Cheremisin V. T. The ways of the efficient energy use's increase on the internal ring of the Moscow railway with the use of inverters [Puti povysheniya jenergojeffektivnosti na malom kol'ce Moskovskoj zheleznoj dorogi s ispol'zovaniem invertorov]. *Transport Urala – Transport of Ural*, 2014, no. 3 (42), pp. 90 – 94.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Черемисин Василий Титович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-34-19.

E-mail: cheremisinvt@gmail.com

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 Омского государственного университета путей сообщения.

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, старший научный сотрудник научно-производственной лаборатории «Энергосберегающие технологии и электромагнитная совместимость», доцент.

Тел.: (381-2) 44-39-23.

E-mail: vilgelm87@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Черемисин, В. Т. Оценка потенциала повышения энергоэффективности Московского центрального кольца за счет применения выпрямительно-инверторных преобразователей [Текст] / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск – 2019. – № 3 (39). – С. 57 – 67.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Cheremisin Vasilii Titovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Dr. Sci. Tech., professor, Head of department «Rolling stock electric railways», OSTU.

Phone: (3812) 31-34-19.

E-mail: cheremisinvt@gmail.com

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, Omsk State Transport University.

Тел.: (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.

Cand.Tech.Sci, senior researcher associate of research-and-production laboratory «Energy saving up technologies and electromagnetic compatibility», Assistant Professor.

Phone: (3812) 44-39-23.

E-mail: vilgelm87@gmail.com

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Cheremisin V. T., Nikiforov M. M., Vilgelm A. S. Assessment of the Moscow Central Ring energy efficiency potential through the use of rectifier-inverter converters. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2019, vol. 3, no. 39, pp. 57 – 67 (In Russian).

Е. К. Хусаинов, Ю. В. Кондратьев

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

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСТАВОК ЗАЩИТЫ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА В ВЫНУЖДЕННОМ РЕЖИМЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОРОТКОЗАМЫКАТЕЛЯ КЗКС-3,3

Аннотация. Целью статьи является рассмотрение вопроса расчета и выбора уставок срабатывания короткозамыкателя КЗКС-3,3 при организации защиты контактной сети постоянного тока в вынужденном режиме. Измерительным органом короткозамыкателя является модуль напряжения. При выполнении условий срабатывания именно модуль напряжения собирает цепь на включение коммутационного аппарата короткозамыкателя. Важным является вопрос выбора оптимального места установки короткозамыкателей и уставки срабатывания по напряжению. Определена исходная информация, необходимая для проведения расчета уставок. Приведены порядок расчета токов короткого замыкания и схемы замещения для наиболее распространенных схем питания и секционирования контактной сети. Для токовых защит быстродействующих выключателей фидеров контактной сети приведены формулы определения зон чувствительности. Для выбора оптимального места установки короткозамыкателя и выбора уставки срабатывания по напряжению из допустимого диапазона построена потенциальная диаграмма участка контактной сети. Анализ, проведенный на основании потенциальной диаграммы, позволяет сделать вывод об эффективности организации защиты контактной сети в вынужденном режиме с использованием короткозамыкателей.

Ключевые слова: контактная сеть, короткозамыкатель, потенциальная диаграмма, уставка по напряжению, токовая защита, устройства защиты, тяговая подстанция.

Yermek K. Khusainov, Yuri V. Kondratiev

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

CONTACT NETWORK PROTECTION SETTINGS METHODOLOGY DC IN FORMED MODE USING SHORT-CUTTER KZKS-3,3

Abstract. The purpose of the article is to consider the issue of calculating and selecting the settings for the operation of the short-circuit switch KZKS-3.3 when organizing the protection of a direct current contact network in emergency mode. The shorting circuit is measured by the voltage module. When the triggering conditions are met, it is the voltage module that collects the circuit to turn on the switching device of the short circuit. The important question is to choose the optimal installation location of the short-circuit switches and the voltage trip settings. The initial information necessary for the calculation of the settings is determined. The calculation procedure and equivalent circuits for the most common power supply circuits and sectioning of the contact network are given. For current protection of high-speed circuit-breaker feeders, contact formulas are given for determining the sensitivity zones. To select the optimal installation location of the short-circuit and select the voltage pick-up setting from the allowable range, a potential diagram of the contact network section is constructed. The analysis based on the potential diagram allows us to conclude that the organization of protection of the contact network in emergency mode using short circuits is effective.

Keywords: contact network, short circuit, potential diagram, voltage setting, current protection, protection devices, traction substation.

В ходе эксплуатации системы тягового электроснабжения постоянного тока, как в любой сложной системе, возникает необходимость технического обслуживания оборудования. Обслуживание проводится как периодически в соответствии с планом производства работ, составленным на основании нормативных документов, так и внепланово – для ликвидации аварийных замечаний и последствий повреждения.

В статье [1] рассмотрен вариант организации защиты контактной сети при выводе в ремонт оборудования распределительных устройств РУ-3,3 кВ тяговых подстанций (ТПС) и постов секционирования (ПСК) с использованием короткозамыкателя КЗКС-3,3 (далее – короткозамыкатель). Вынужденная схема питания и секционирования с использованием короткозамыкателей изображена на рисунке 1. Короткозамыкатели устанавливаются по одному на

каждый путь при схеме с включением секционных разъединителей «А» и «Б». Большое число короткозамыкателей считается излишним, так как рационально устанавливать устройство в точке с минимальным расчетным током короткого замыкания при нормальной схеме. В большинстве случаев такая точка находится под шинами тяговой подстанции с выведенным в ремонт РУ-3,3 кВ. Принцип действия короткозамыкателя заключается в следующем: при коротком замыкании в защищаемой зоне контактной сети срабатывает реле напряжения, реагирующее на снижение напряжения ниже уставки. Далее реле напряжения собирает цепь на включение короткозамыкателя. Короткозамыкатель перемещает место короткого замыкания в зону, которая надежно защищается быстродействующим выключателем ПСК, ликвидируя, таким образом, «мертвые» зоны. Более подробно принцип рассмотрен в статье [1].

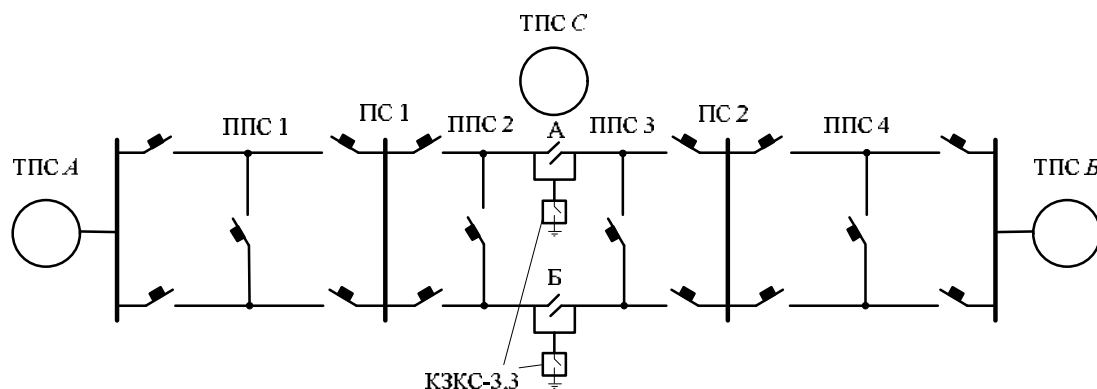


Рисунок 1 – Вынужденная схема питания и секционирования участка ТПС А – ТПС В

Вопрос защиты контактной сети постоянного тока от минимальных токов короткого замыкания при помощи короткозамыкателей уже рассматривался в источниках [2 – 5]. Однако применение короткозамыкателей ограничивалось из-за их повреждения вследствие перехода тяговых электродвигателей электропоездов в генераторный режим и продолжительной подпитки ими места короткого замыкания. Ранее ВНИИЖТом разработан бесконтактный дуговой короткозамыкатель для заземления групп опор контактной сети. Позднее дополненный потенциальным датчиком короткозамыкатель получил название БКЗ-3,3. Усовершенствованное устройство стали использовать в качестве защитного аппарата при удаленных коротких замыканиях в контактной сети. Основные отличия КЗКС-3,3 от БКЗ-3,3 перечислены в статье [1]. Главное отличие – отсутствие дуги при срабатывании коммутационного аппарата. Отличительной особенностью короткозамыкателя является отсутствие нижней границы регулирования уставки срабатывания U_y . Короткозамыкатель БКЗ-3,3 устойчиво срабатывает, если минимальное напряжение в контактной сети не ниже 800 В.

Важным является вопрос выбора места установки короткозамыкателей и уставки срабатывания U_y . В статье [2] делается вывод том, что для определения места установки короткозамыкателей и уставки срабатывания U_y необходимо провести анализ потенциальных диаграмм при коротких замыканиях в расчетных точках защиты. Перед построением потенциальных диаграмм необходимы следующие исходные данные: схема питания и секционирования контактной сети; значение сопротивления ТПС; типы быстродействующих выключателей (БВ) и их уставки; параметры сопротивлений тяговой сети и питающего фидера. Стоит отметить, что для остальных БВ ТПС, ПСК и пунктов параллельного соединения участка (ППС), для которого ведется расчет уставок защит при вынужденном режиме, расчетные схемы и формулы соответствуют приведенным в работах [6, 7]. Необходимый состав защит представлен в источниках [8, 9].

Сопротивление тяговой подстанции вычисляют по формуле [6]

$$R_{\pi} = \rho + R_{c,y} + R_{o,\phi} \quad (1)$$

где ρ – внутреннее сопротивление ТПС, Ом; $R_{с.у}$ – сопротивление сглаживающего устройства, Ом; $R_{о.ф}$ – сопротивление отсасывающего фидера, Ом.

Внутреннее сопротивление ТПС вычисляют по формуле [6]

$$\rho = \frac{AX_* U_n}{(1 - AX_*) n_T I_n}.$$

где A – коэффициент относительного наклона внешней характеристики тягового преобразователя; U_n – номинальное напряжение на шинах выпрямленного тока, В; I_n – номинальный ток одного тягового преобразователя, А; n_T – число включенных в работу тяговых преобразователей; X_* – суммарное индуктивное сопротивление, включенное в каждый из линейных проводов вторичных обмоток тягового преобразователя, выраженное в относительных единицах.

Величину X_* вычисляют по формуле [6]:

$$X_* = \frac{S_T n_T}{S_c} + \frac{(1 \pm \alpha_3) u_{кп} S_T n_T}{100 S_{пн} n_{пн}} + \frac{(1 \pm \alpha_3) u_{кп}}{100}, \quad (3)$$

где S_T , $S_{пн}$ – номинальные мощности первичных обмоток соответственно тягового преобразователя и силового (понижающего) трансформаторов, МВ·А; S_c – мощность короткого замыкания на вводах в тяговую подстанцию, МВ·А; $u_{кп}$, $u_{кп}$ – напряжения короткого замыкания соответственно преобразовательного и понижающего трансформаторов, %; α_3 – заводской допуск на величину напряжения короткого замыкания; $n_{пн}$ – число включенных в работу понижающих трансформаторов.

Расчетное напряжение $U_{рас}$ ТПС вычисляют по формуле [6]

$$U_{рас} = \frac{(1 \pm \alpha_n) U_n}{1 - AX_*} + K_{нп} n_T I_n R_{пн}, \quad (4)$$

где α_n – допуск на величину отклонения напряжения на вводах в тяговую подстанцию; $K_{нп}$ – коэффициент загрузки неповрежденных путей.

Далее определяем значения токов смежных ТПС I_A , I_B и суммарного тока I_K в месте короткого замыкания по формулам [6]:

$$I_A = \frac{(U_{Арас} - U_{дл}) \left(1 + \frac{R_{AB}}{R_B} \right) - (U_{Врас} - U_{дл}) \frac{R_{AB}}{R_B}}{R_A + R_{AB} \left(1 + \frac{R_A}{R_B} \right)}; \quad (5)$$

$$I_B = \frac{(U_{Врас} - U_{дл}) \left(1 + \frac{R_{AB}}{R_A} \right) - (U_{Арас} - U_{дл}) \frac{R_{AB}}{R_A}}{R_B + R_{AB} \left(1 + \frac{R_B}{R_A} \right)}; \quad (6)$$

$$I_K = I_A + I_B, \quad (7)$$

где $U_{Арас}$, $U_{Врас}$ – расчетные напряжения смежных ТПС А и В, В; $U_{дл}$ – падение напряжения в электрической дуге в месте повреждения, В; R_A , R_B , R_{AB} – результирующие сопротивления схемы замещения межподстанционной зоны при заданных схеме питания и месте короткого замыкания, Ом.

Для упрощения расчетов допускается принимать расчетные значения $U_{A,рас}$, $U_{B,рас}$ смежных ТПС A и B одинаковыми: $U_{A,рас} = U_{B,рас} = U_{рас}$.

Токи ТПС A и B вычисляют по формулам [6]:

$$I_A = \frac{(U_{рас} - U_D)}{R_A + R_{AB} \left(1 + \frac{R_A}{R_B}\right)}; \quad (8)$$

$$I_B = \frac{(U_{рас} - U_D)}{R_B + R_{AB} \left(1 + \frac{R_B}{R_A}\right)}. \quad (9)$$

Значение падения напряжения в дуге U_D вычисляют по формуле [6]

$$U_D = 1350 L_y n_{из} b, \quad (10)$$

где L_y – длина пути утечки по поверхности одного изолятора, м; $n_{из}$ – число изоляторов в гирлянде; b – коэффициент, учитывающий возможность развития дуги по наикратчайшему пути в воздухе.

Значения результирующих сопротивлений схемы замещения, представленной на рисунке 2, вычисляют по формулам [6]:

$$R_A = R_{п.А} + R_{тс.А}; \quad (11)$$

$$R_B = R_{п.В} + R_{тс.В}; \quad (12)$$

$$R_{AB} = R_{тс.АВ} + R_{ТГЗ}, \quad (13)$$

где $R_{п.А}$, $R_{п.В}$ – сопротивления тяговых подстанций A и B ; $R_{тс.А}$ – сопротивление части схемы замещения тяговой сети (контактной сети и рельсов), по которой протекает ток I_A ТПС A , Ом; $R_{тс.В}$ – сопротивление части схемы замещения тяговой сети (контактной сети и рельсов), по которой протекает ток I_B ТПС B , Ом; $R_{тс.АВ}$ – сопротивление части схемы замещения тяговой сети (контактной сети и рельсов), по которой протекает сумма токов $I_K = I_A + I_B$, Ом; $R_{ТГЗ}$ – сопротивление троса группового заземления, Ом.

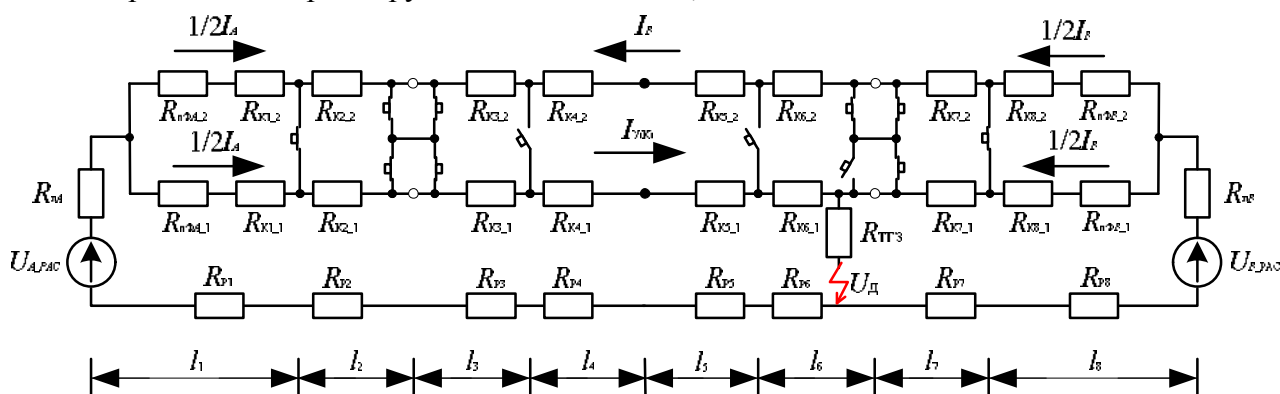


Рисунок 2 – Схема замещения определения минимального тока короткого замыкания при выборе уставок защит поста секционирования при вынужденном режиме

На рисунке 2 введены следующие обозначения: $R_{пф.А.1}$, $R_{пф.А.2}$ – сопротивления питающих линий ТПС A ; $R_{Кj.1}$, $R_{Кj.2}$ – сопротивления контактной сети участка l_j ; $R_{рj}$ – сопротивления рельсовой цепи участка l_j .

При использовании короткозамыкателя для обеспечения требований защиты контактной сети необходимо выбирать схемы, при которых модуль напряжения должен срабатывать при повреждении в зоне нечувствительности основных токовых защит БВ ТПС, ПСК и ППС.

Рассмотрим подробно параллельную схему питания двухпутного электрифицированного участка при вынужденном режиме, изображенную на рисунке 1. Зоны нечувствительности ПСК и ППС находятся вблизи смежного ПСК, и самой удаленной точкой являются шины ПСК.

В большинстве случаев при выводе в ремонт РУ-3,3 кВ ТПС пункты параллельного соединения, находящиеся между ПСК, отключают по причине нечувствительности защит БВ к короткому замыканию у удаленного ПСК. Еще одним преимуществом применения вынужденного режима с использованием короткозамыкателей является наличие включенных ППС между ПСК.

При проведении анализа потенциальной диаграммы участка важно правильно определить зону чувствительности токовых защит БВ ПСК и ППС. Зону чувствительности токовых защит ТПС не проверяют, так как протяженность зоны защиты и расчетная схема выбора уставок БВ остались прежними. Метод определения зоны чувствительности немногим отличается от соотношения, приведенного в работе [2], и учитывает сопротивление троса группового заземления. Протяженность зоны чувствительности токовой защиты вычисляется по формуле

$$L_{зч} = \frac{(R_{AB} - R_{ГЗ})}{r_{к.с}}, \quad (14)$$

где $L_{зч}$ – протяженность зоны чувствительности токовой защиты, км; $r_{к.с}$ – удельное сопротивление контактной сети, Ом/км.

Известно, что при определении уставок БВ допускается каскадное действие защит. При организации вынужденного режима наиболее удаленной точкой короткого замыкания для БВ ПСК 1 являются шины смежного поста секционирования ПСК 2. По условию каскадности действия защит сначала отключается БВ ПСК 2, далее – БВ ППС 3, затем – БВ ППС 2, а после – БВ ПСК 1, тем самым выделяется поврежденная секция.

Зона чувствительности токовой защиты БВ постов секционирования определяется в соответствии с расчетными схемами короткого замыкания при вынужденных режимах питания межподстанционной зоны, приведенными в источнике [6]. Схема выбора уставок защит поста секционирования при вынужденном режиме изображена на рисунке 2. Ток короткого замыкания для параллельной схемы питания определяется как сумма тока фидера смежного пути участка, находящегося между постами секционирования, и токов фидеров поста секционирования, находящихся «за спиной». В этом случае I_k условно принимается равным току уставки быстродействующего выключателя поста секционирования I_y . Выразим I_y через формулы (8) и (9) [6]:

$$I_y = \frac{(U_{рас} - U_D)}{R_A + R_{AB} \left(I + \frac{R_A}{R_B} \right)} + \frac{(U_{рас} - U_D)}{R_B + R_{AB} \left(I + \frac{R_B}{R_A} \right)}. \quad (15)$$

Для определения протяженности зоны чувствительности токовой защиты БВ необходимо вычислить значение R_{AB} . Преобразуя выражение (15), получаем квадратное уравнение:

$$\left(2 + \frac{3R_A}{2R_B} \right) R_{AB}^2 + 2(R_A + R_B) R_{AB} + \left(R_A R_B - \frac{2(U_{рас} - U_D)}{I_y} \right) = 0. \quad (16)$$

Так как значение сопротивления R_{AB} должно быть только положительным, то вычисляем только один корень уравнения:

$$R_{AB} = \frac{-2(R_A + R_B) + \sqrt{(2(R_A + R_B))^2 - 4\left(2 + \frac{3R_A}{2R_B}\right)\left(R_A R_B - \frac{2(U_{\text{рас}} - U_D)}{I_y}\right)}}{2\left(2 + \frac{3R_A}{2R_B}\right)}, \quad (17)$$

Значения сопротивления R_A и R_B при определении R_{AB} для ПСК вычисляют по формулам:

$$R_A = R_{\text{пА}} + \frac{(r_{\text{пф.А}} l_{\text{пфА}} + r_{\text{кС}}(l_1 + l_2))}{2} + r_{\text{п}}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6); \quad (18)$$

$$R_B = R_{\text{пВ}} + r_{\text{кС}}(l_3 + l_4 + l_5 + l_6) + \frac{(r_{\text{пф.В}} l_{\text{пф.В}} + r_{\text{кС}}(l_7 + l_8))}{2} + r_{\text{п}}(l_7 + l_8). \quad (19)$$

Зона чувствительности токовой защиты БВ ППС определяется в соответствии с расчетной схемой короткого замыкания при вынужденных режимах питания межподстанционной зоны, приведенной в источнике [6]. Схема замещения для выбора уставок защит ППС при вынужденном режиме изображена на рисунке 3.

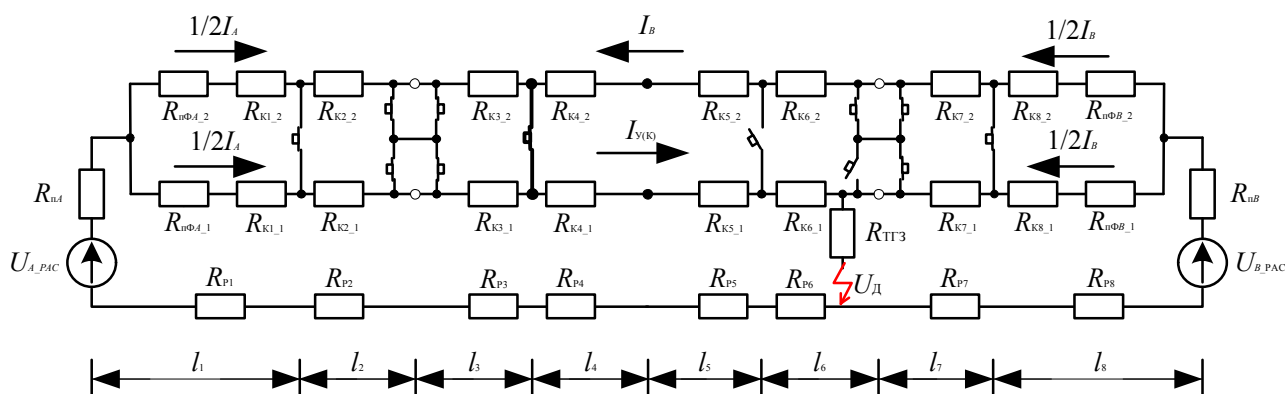


Рисунок 3 – Схема замещения определения минимального тока короткого замыкания при выборе уставок защит пункта ППС при вынужденном режиме

Протяженность зоны чувствительности токовой защиты БВ ППС, как и для ПСК, определяется по формуле (15) с некоторыми изменениями в вычислении тока уставки быстродействующего выключателя:

$$I_y = \frac{\frac{1}{2}(U_{\text{рас}} - U_D)}{R_A + R_{AB}\left(1 + \frac{R_A}{R_B}\right)} + \frac{(U_{\text{рас}} - U_D)}{R_B + R_{AB}\left(1 + \frac{R_B}{R_A}\right)}. \quad (20)$$

Вычисляем значение R_{AB} . Преобразуя выражение (20), получаем квадратное уравнение:

$$\left(2 + \frac{3R_A}{2R_B}\right)R_{AB}^2 + 2(R_A + R_B)R_{AB} + \left(R_A R_B - \frac{\frac{3}{2}(U_{\text{рас}} - U_{\text{д}})}{I_y}\right) = 0. \quad (21)$$

Сопротивление R_{AB} должно иметь только положительное значение:

$$R_{AB} = \frac{-2(R_A + R_B) + \sqrt{(2(R_A + R_B))^2 - 4\left(2 + \frac{3R_A}{2R_B}\right)\left(R_A R_B - \frac{\frac{3}{2}(U_{\text{рас}} - U_{\text{д}})}{I_y}\right)}}{2\left(2 + \frac{3R_A}{2R_B}\right)}. \quad (22)$$

Значения сопротивления R_A и R_B при определении R_{AB} для ППС вычисляют по формулам:

$$R_A = R_{\text{пА}} + \frac{(r_{\text{пф.А}}l_{\text{пф.А}} + r_{\text{к.с}}(l_1 + l_2 + l_3))}{2} + r_{\text{п}}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6); \quad (23)$$

$$R_B = R_{\text{пВ}} + r_{\text{к.с}}(l_4 + l_5 + l_6) + \frac{(r_{\text{пф.В}}l_{\text{пф.В}} + r_{\text{к.с}}(l_7 + l_8))}{2} + r_{\text{п}}(l_7 + l_8). \quad (24)$$

Для построения потенциальной диаграммы необходимо определить уровни напряжения в нескольких точках защищаемой зоны. В большинстве случаев достаточно уровней напряжения на шинах тяговых подстанций, постов секционирования, пунктов параллельного соединения и в удаленной точке зоны защиты. Расчеты необходимо проводить отдельно для каждого пути. При равенстве сечений контактных сетей расчеты проводятся только для одного пути.

Напряжение на шинах тяговой подстанции в режиме короткого замыкания $U_{\text{к.з.ТПС}}$ определяется по расчетной схеме. Ток короткого замыкания $I_{\text{к}}$ вычисляется по формуле (8):

$$U_{\text{к.з.ТПС}} = U_{\text{рас}} - I_{\text{к}}R_{\text{п}}. \quad (25)$$

Уровень напряжения на шинах поста секционирования ПСК1 при коротком замыкании под шинами поста секционирования ПСК2 определяется по формуле (18). Для определения напряжения на шинах поста секционирования ПСК2 при коротком замыкании под шинами поста секционирования ПСК1 значения зеркально отображаются относительно тяговой подстанции С:

$$U_{\text{к.з.ПС}} = U_{\text{к.з.ТПС}} - I_{\text{к}} \left(\frac{(r_{\text{пф.А}}l_{\text{пф.А}} + r_{\text{к.с}}(l_1 + l_2))}{2} + r_{\text{п}}(l_1 + l_2) \right). \quad (26)$$

Уровень напряжения у пункта параллельного соединения ППС 2 при коротком замыкании под шинами поста секционирования ПС2 определяется по формуле

$$U_{\text{к.з.ППС}} = U_{\text{к.з.ТПС}} - I_{\text{к}} \left(\frac{(r_{\text{пф.А}}l_{\text{пф.А}} + r_{\text{к.с}}(l_1 + l_2 + l_3))}{2} + r_{\text{п}}(l_1 + l_2 + l_3) \right). \quad (27)$$

Для определения напряжения у пункта параллельного соединения ППС 3 при коротком замыкании под шинами поста секционирования ПСК1 значения зеркально отображаются относительно тяговой подстанции С по рисунку 4.

Потенциальная диаграмма при коротком замыкании по расчетным схемам выбора уставок защит БВ ПСК при вынужденном режиме изображена на рисунке 4. Как видно из приведенной диаграммы, оптимальным местом установки короткозамыкателя КЗКС-3,3 является место пересечения кривых напряжения, так как при установке в этой точке верхние пределы уровней напряжения имеют минимально возможное значение при условии их равенства. В нашем случае это пересечение совпало с координатой ТПС С, оборудование РУ-3,3 кВ которой выведено в ремонт. Однако при расположении точки пересечения потенциальных диаграмм в месте, отличном от координат ТПС, в любом случае наиболее подходящим местом установки являются координаты линейных объектов СТЭ (ТПС, ПСК, ППС).

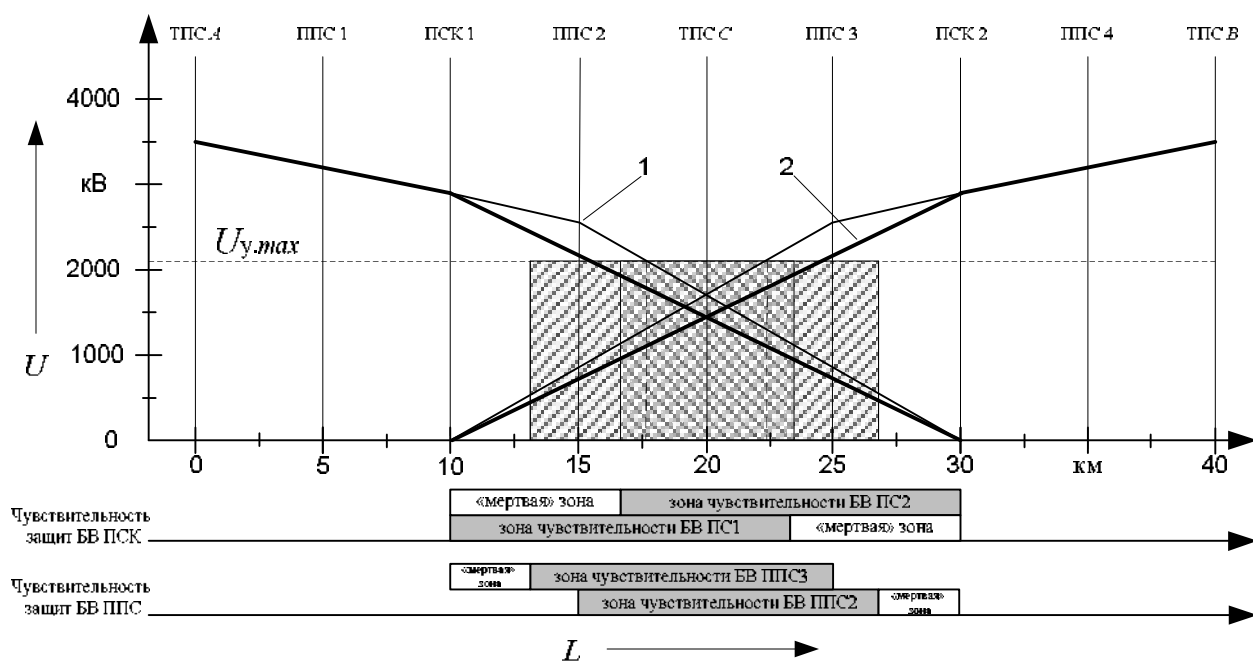


Рисунок 4 – Потенциальная диаграмма уровней напряжения при коротких замыканиях при вынужденном режиме: 1 – кривая напряжения при схеме с включенными БВ ППС; 2 – кривая напряжения при схеме с отключенными БВ ППС

При организации вынужденного режима питания и секционирования контактной сети с включенными БВ ППС 2 и ППС 3 местом рекомендуемой установки короткозамыкателя является область, выделенная двухсторонней штриховкой, ограниченная прерывистыми линиями по вертикали, при отключенных БВ ППС 2 и ППС 3 – область, выделенная двухсторонней штриховкой, ограниченная сплошными линиями по вертикали.

Верхний предел срабатывания $U_{y\max}$ короткозамыкателя определяется исходя от требования отстройки от режимов нормальной работы системы тягового электроснабжения постоянного тока. В соответствии с рекомендациями работы [6] защита от коротких замыканий должна быть отстроена от максимальных нагрузок нормального режима работы, скачков тока при проследовании поездом секционного изолятора или изолирующего сопряжения, а также от повреждений, отключаемых выключателем локомотива или выключателями смежных участков. Уставка срабатывания $U_{y\max}$ должна отвечать следующему условию [6]:

$$U_{y\max} \leq \frac{U_{\min}}{k_3 k_B}, \quad (28)$$

где $U_{\min}$ – наименьшее допустимое напряжение в контактной сети в нормальном режиме, В; k_3 , k_B – коэффициенты запаса и возврата.

Коэффициент запаса k_3 принимают не менее чем от 1,1 до 1,3. Коэффициент возврата k_B принимают от 1,1 до 1,15. Коэффициенты выбраны в соответствии с рекомендациями работы [6].

Согласно источнику [10] минимально допустимое значение напряжения $U_{\min}$ на токоприемнике электроподвижного состава – 2700 В. Для проверки отстройки полученного значения U_{y_max} на потенциальной диаграмме проводят линию параллельную оси абсцисс, образуя тем самым зону срабатывания короткозамыкателя.

Предложенная методика расчета и выбора уставок срабатывания короткозамыкателя и построенная на основании расчета потенциальная диаграмма позволяют определить допустимый диапазон изменения уставок по напряжению с учетом параметров места повреждения, обеспечить чувствительности защит и выявить места установки короткозамыкателей, удовлетворяющие необходимым условиям.

Список литературы

1. Кондратьев, Ю. В. Обеспечение защиты контактной сети постоянного тока при вынужденных режимах [Текст] / Ю. В. Кондратьев, В. А. Кващук, Е. К. Хусаинов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 4 (36). – С. 87 – 95.
2. Защита контактной сети постоянного тока от минимальных токов короткого замыкания при помощи короткозамыкателей [Текст] / Ю. Г. Санников, О. С. Катунин и др. // Вестник ВНИИЖТа / ВНИИЖТ. – М. – 1989. – № 8. – С. 18 – 21.
3. Кучма К. Г. Защита от токов короткого замыкания в контактной сети [Текст] / К. Г. Кучма, Г. Г. Марквардт, В. Н. Пупынин – М.: Трансжелдориздат, 1960. – 259 с.
4. Сердинов, С. М. Повышение надежности устройств электроснабжения электрифицированных железных дорог [Текст] / С. М. Сердинов – М.: Транспорт, 1985. – 301 с.
5. Харинов, В. Ф. Защита контактной сети постоянного тока от коротких замыканий [Текст] / В. Ф. Харинов. – М.: Транспорт, 1987. – 95 с.
6. СТО РЖД 07.021.5-2018. Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки. Часть 5. Методика выбора уставок защит в системе тягового электроснабжения постоянного тока [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2018. – 107 с.
7. Векслер, М. И. Защита тяговой сети постоянного тока от токов короткого замыкания [Текст] / М. И. Векслер. – М.: Транспорт, 1976. – 120 с.
8. СТО РЖД 07.021.1-2015. «Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки. Часть 1. Общие принципы и правила построения защит, блокировок и автоматики в системах тягового электроснабжения» [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2015. – 33 с.
9. СТО РЖД 07.021.2-2015. «Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки. Часть 2. Методика выбора алгоритмов действия, уставок блокировок и выдержек времени автоматики в системе тягового электроснабжения» [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2015. – 13 с.
10. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2011. – 255 с.

References

1. Kondratiev Yu. V., Kvashchuk V. A., Khusainov Ye. K. Ensuring the protection of the contact network of direct current under forced modes [Obespecheniye zashchity kontaktnoy seti postoyannogo toka pri vynuzhdennykh rezhimakh]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2018, no. 4 (36), pp. 87–95.
2. Sannikov Yu. G., Katunin O. S., Kryukov I. S., Farafonov A. V. Protection of a direct-current contact network from minimum short-circuit currents with the help of short-circuits [Zash-

chita kontaktной seti postoyannogo toka ot minimal'nykh tokov korotkogo замыкания pri pomoshchi korotkozamykateley]. *Vestnik VNIIZHT*, 1989. no. 8, pp. 18 – 21.

3. Kuchma K. G., Marquardt G. G., Pupynin V. N. *Zashchita ot tokov korotkogo замыкания v kontaktной seti* (Protection against short circuit currents in the contact network). M.: Transdeldorizdat, 1960, 259 p.

4. Serdinov S. M. *Povysheniye nadezhnosti elektrosnabzheniya elektrifitsirovannykh zheleznikh dorog* (Increase of reliability of power supply devices of electrified railways). Moscow: Transport, 1985, 301 p.

5. Kharikov V. F. *Zashchita kontaktной seti postoyannogo toka ot korotkikh замыканий* (Protecting the contact network of direct current from short-circuits). Moscow: Transport, 1987, 95 p.

6. *STO RZHD 07.021.5-2018 «Zashchita system elektrosnabzheniy azheleznoy dorogi ot korotkikh замыканий i peregruzki. Chast'5. Metodika vybora ustavok zashchit v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka»* (STR RZD 07.021.5-2018 «Protection of power supply systems of the railway from short circuits and overload. Part 5. Method of selection of protection settings in the DC traction system»). Moscow, JSCo «Russian Railways», 2018, 107 p.

7. Wexler M. I. *Zashchita tyagovoy seti postoyannogo toka ot tokov korotkogo замыкания* (Protection of traction DC network against short-circuit currents). Moscow: Transport, 1976, 120 p.

8. *STO RZHD 07.021.1-2015 «Zashchita system elektrosnabzheniya zheleznoy dorogi ot korotkikh замыканий i peregruzki. Chast'1 Obshchiye printsipy i pravila postroyeniya zashchitnykh blokirovok i avtomatiki v sistemakh tyagovogo elektrosnabzheniya »* (SRT RZD 07.021.1-2015 «Protection of power supply systems of the railway from short circuits and overload. Part 1. General principles and rules for constructing protections, locks and automatics in traction power supply systems»). Moscow, JSCo «Russian Railways», 2015, 33 p.

9. *STO RZHD 07.021.2-2015 «Zashchita system elektrosnabzheniya zheleznoy dorogi ot korotkikh замыканий i peregruzki. Chast' 2. Metodika vybora algoritmov deystviya ustavok blokirovok i vyderzhek vremeni avtomatiki v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya»* (STR RZD 07.021.2-2015 «Protection of power supply systems of the railway from short circuits and overload. Part 2. The method of choosing action algorithms, blocking settings and time delays of automation in the traction power supply system»). Moscow, JSCo «Russian Railways», 2015, 13 p.

10. *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznikh dorog Rossiyskoy Federatsii* (Rules of technical operation of railways of the Russian Federation), Moscow, Russian Railways, 2011, 255 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Кондратьев Юрий Владимирович

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.: (3812) 31-34-46.

E-mail: Juvk.omgups.egt@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Khusainov Yermek Kenzhebulatovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Postgraduate student of the department "Electricity supply of railway transport", OSTU.

Tel.: (3812) 44-27-61.

E-mail: husainov0908@rambler.ru

Kondratiev Yuri Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Candidate of Technical Sciences, associate professor of the department "Electricity supply of railway transport", OmGUPS.

Tel.: (3812) 31-34-46.

E-mail: Juvk.omgups.egt@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Хусаинов, Е. К. Методика определения уставок защиты контактной сети постоянного тока в вынужденном режиме с использованием короткозамыкателя КЗКС-3,3 [Текст] / Е. К. Хусаинов, Ю. В. Кондратьев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 3 (39). – С. 68 – 78.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Khusainov Ye. K., Kondratiev Yu. V. Contact network protection settings methodology DC in forced mode using short-cutter KZKS-3,3. Journal of transsib railway studies, 2019, vol. 3, no. 39, pp. 68 – 78 (In Russian).

УДК 629.4.016.12:004.94

П. А. Сахаров

Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ), г. Гомель, Беларусь

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОГЛОЩАЮЩИХ АППАРАТОВ НА СИЛЫ МЕЖДУ ВАГОНАМИ ПОЕЗДА

Аннотация. Рассмотрено влияние силовых характеристик поглощающих аппаратов на величину максимальных продольных сил, возникающих между вагонами. С помощью компьютерной программы MSC.ADAMS выполнено имитационное моделирование маневрового соударения вагонов и переходных процессов в движущемся поезде. Определены зависимости максимальных сил столкновения вагонов при различных скоростях движения от формы силовых характеристик упругих элементов. Произведена оценка работы различных амортизаторов при трогании поезда с места, электрическом торможении и движении через переломы продольного профиля пути. Показано, что амортизаторы с быстро нарастающей линией нагрузки приводят к возникновению и распространению вдоль поезда больших сил ударного характера, а при пологой характеристике – к их снижению за счет увеличения амплитуды упругих колебаний, распространяемых вдоль поезда. Для снижения продольных сил в поезде предложено использовать высокоэнергоемкие поглощающие аппараты, скорость нарастания силы в которых существенно зависит от скорости сжатия амортизатора.

Ключевые слова: модель поезда, поглощающий аппарат, силовая характеристика, продольная сила, маневровое соударение вагонов, однородный состав.

Pavel A. Sakharov

Belarusian State University of Transport (BelsUT), Gomel, Belarus

ESTIMATION OF THE INFLUENCE OF DAMPING DEVICES FORCE CHARACTERISTICS ON THE FORCES BETWEEN TRAIN CARS

Abstract. The paper considers the influence of the force characteristics of the damping apparatus on the value of the maximal longitudinal forces arising between the cars. Using the computer program MSC.ADAMS, we performed the simulation of shunting collisions of cars and train transient movement modes. The dependences of the maximal forces at cars' collision at various velocities on the shape of the elastic elements' force characteristics are determined. The operation of various shock dampers for the case of the train starting off electric braking and movement through the parts of the longitudinal track profile was estimated. It is shown that shock dampers with a rapidly growing line of load lead to the emergence and propagation of large shock forces along the train, while a slow growth of the force leads to their reduction due to the amplitude increase in elastic vibrations propagated along the train length. We propose to use high-energy-damping devices to reduce the longitudinal forces in the train, which are characterized by the force slew rate substantially depending on the compression velocity of the shock damper.

Keywords: train model, damping apparatus, force characteristic, longitudinal force, shunting collision of cars, uniform composition.

Движение поездов связано с возникновением больших динамических сил между вагонами. Наибольших значений продольные силы достигают при переходных процессах в период трогания, торможения или движения по сложному профилю пути; они оказывают существенное влияние на устойчивость движения вагонов. Особенно актуален этот вопрос для тяжеловесного движения, тенденция к развитию которого прослеживается во всем мире [1].

Большие масса и длина поезда способствуют появлению больших значений продольных сил, которые могут при неблагоприятных обстоятельствах привести к сходу подвижного состава с рельсов. Снижению больших значений продольных сил содействует как грамотное обоснованное управление движением поезда, так и характеристики вагонов, в частности, параметры их поглощающих аппаратов. Проводится обширная работа по совершенствованию последних, много научных статей посвящено исследованию конструктивных особенностей и характеристик амортизаторов удара, их влияния на движение поезда.

В диссертационной работе [2] автором рассмотрены новые конструкции фрикционных поглощающих аппаратов, энергоемкость которых повышается за счет дополнительных поверхностей трения, а стабильность работы и улучшение эксплуатационных показателей – за счет использования во фрикционной части упругой распорной системы вместо клиновой. На основе имитационного моделирования продольной нагруженности вагонов сделан вывод о том, что использование модернизированных поглощающих аппаратов приводит к снижению продольных нагрузок по сравнению с серийными амортизаторами до 30 %, их работа более эффективна при маневровых соударениях и переходных режимах движения, а вероятность параметрического отказа ниже на 60 %.

Перспективы совершенствования поглощающих аппаратов железнодорожных вагонов рассмотрены в работе [3]. Отмечается возможность повышения их надежности за счет получения рабочей характеристики аппарата с высокой степенью заполнения. Перспективным в этом направлении указывается применение упругих элементов из высокопрочных полиуретановых эластомеров. Модернизация таких поглощающих аппаратов рассмотрена в статье [4]. Представлены результаты статических стендовых и копровых испытаний, а также испытаний по соударению вагонов. Сделан вывод о возможности повышения энергоемкости амортизатора путем увеличения хода аппарата до 120 мм и силы начальной затяжки до 70 – 200 кН. Утверждается, что данные изменения возможны без существенного изменения конструкции.

Моделирование работы поглощающих аппаратов представлено в работах [5, 6]. В работе [5] рассмотрено моделирование гидрогазовых поглощающих аппаратов с учетом влияния температурных и других физических явлений. Отмечается достаточно большая энергоемкость таких аппаратов и значительный коэффициент рассеивания энергии. Предлагается использовать математическую модель аппарата и алгоритм программной реализации при моделировании пространственных колебаний рельсовых экипажей. Сравнительная характеристика турбулентной и ламинарной модели эластомерного амортизатора удара, представленная в работе [6], позволила сделать вывод о меньшем расхождении расчетных данных последней с экспериментальными значениями, на основании чего авторы рекомендуют использовать ламинарную модель для поглощающих аппаратов такого типа.

Оценить зависимость характеристик аппаратов с полимерными элементами от температуры окружающей среды позволяет модель, предложенная в источнике [7]. Путем экспериментальных исследований авторы определили начальную затяжку аппарата при различных температурах и установили влияние температурного фактора на эффективность работы полимерных элементов. Значительное увеличение энергоемкости полимерных поглощающих аппаратов различных конструктивных исполнений в сравнении с фрикционными амортизаторами отмечается в работе [8]. Показано, что соударение вагонов со скоростью 12 км/ч приводит к росту продольных сил не более 2500 кН.

Оценка влияния эксплуатационных факторов на эффективность работы поглощающих аппаратов автосцепки рассмотрена в работах [9, 10]. В диссертационной работе [9] разработана математическая модель фрикционно-полимерного аппарата, учитывающая влияние температуры окружающей среды, скорости соударения, релаксации полимеров и фактора износа. Сделан вывод о том, что наибольшее влияние на показатели работы амортизатора удара оказывает низкая температура, при которой силы между вагонами могут повышаться до 30 %. Статистическое распределение продольных сил сжатия, действующих на грузовой

вагон с учетом эксплуатационных факторов, представлено в работе [10] и позволяет более точно оценить эффективность работы поглощающих аппаратов.

Сравнительная оценка работы различных амортизаторов представлена в источнике [11]. Анализ результатов моделирования показал, что максимальные продольные силы в поезде, возникающие в период трогания и торможения, снижаются на 15 – 20 % при использовании фрикционно-полимерных поглощающих аппаратов по сравнению с пружинно-фрикционными, а аналогичные значения для гидрополимерных амортизаторов ниже на 30 – 40 %.

Целью настоящей статьи является определение наиболее оптимальных с точки зрения минимизации продольных сил в поезде характеристик поглощающих аппаратов. Для достижения поставленной цели построены математическая и компьютерная модели движения поезда, описание которых приведено в источнике [12]. Схема действия сил на локомотив и вагоны представлена на рисунке 1. На схеме использованы следующие обозначения: n – количество вагонов в составе поезда; m_l , m_k – масса локомотива и k -го вагона соответственно ($k = 1, 2, \dots, n$); g – ускорение свободного падения; v – скорость движения локомотива; T_k – силы, действующие со стороны междвагонных соединений; α_l , α_k – уклон пути, по которому движется локомотив и k -й вагон; W_k – силы сопротивления движению k -го вагона; N_l , N_k – нормальные реакции рельсов на локомотив и k -й вагон; R – сила сопротивления движению локомотива (включая тормозную силу при использовании режима электрического торможения); F – сила тяги локомотива.

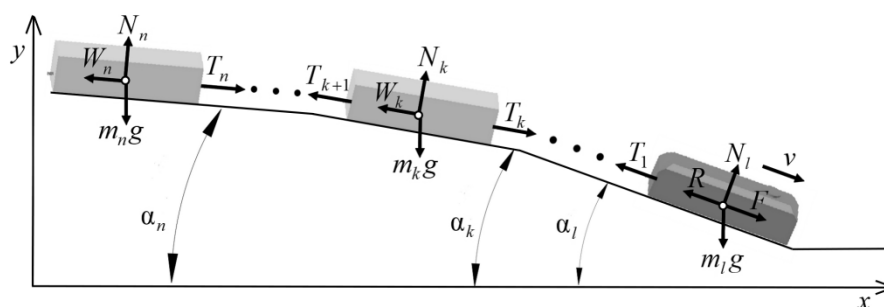


Рисунок 1 – Схема действия сил на локомотив и вагоны поезда

Для учета влияния зазоров в автосцепных устройствах сила взаимодействия между вагонами определяется в соответствии с выражением

$$T = \begin{cases} \left(C_n \left| q - \frac{\delta}{2} \right|^{n_n} + T_{0n} \right) \operatorname{sgn}(\dot{q}), & q \in \left[-h - \frac{\delta}{2}; -\frac{\delta}{2} \right) \cup \left(\frac{\delta}{2}; h + \frac{\delta}{2} \right], \text{ если } q\dot{q} \geq 0; \\ 0, & q \in \left[-\frac{\delta}{2}; \frac{\delta}{2} \right]; \\ \left(C_p \left| q - \frac{\delta}{2} \right|^{n_p} + T_{0p} \right) \operatorname{sgn}(\dot{q}), & q \in \left(-h - \frac{\delta}{2}; -\frac{\delta}{2} \right) \cup \left(\frac{\delta}{2}; h + \frac{\delta}{2} \right), \text{ если } q\dot{q} < 0, \end{cases} \quad (1)$$

где C_n , C_p – коэффициент жесткости аппарата при нагрузке и разгрузке соответственно;

q , $\dot{q}$ – сжатие и скорость сжатия аппарата;

n_n , n_p – показатель степени при нагрузке и разгрузке;

h – максимальный ход поглощающих аппаратов междвагонного соединения;

δ – суммарный зазор в междвагонном соединении;

T_{0n} , T_{0p} – сила начальной затяжки поглощающего аппарата при нагрузке и разгрузке.

При сжатии поглощающего аппарата сила увеличивается по линии нагрузки, характеристики которой в соответствии с формулой (1) зависят от показателя степени n_n . В представленной работе рассмотрено влияние данного показателя на продольные силы, возникающие между вагонами. Максимальный ход поглощающих аппаратов принят 90 мм (180 мм для

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

двух аппаратов междвагонного соединения). Коэффициенты жесткости C_n подобраны таким образом, чтобы сила закрытия всех аппаратов была одинаковой, равной 2800 кН. На рисунке 2 показаны некоторые линии нагрузки поглощающих аппаратов при $T_{0н} = 0$.

Значения максимальной энергоемкости амортизаторов удара в зависимости от n_n и $T_{0н}$ представлены в таблице.

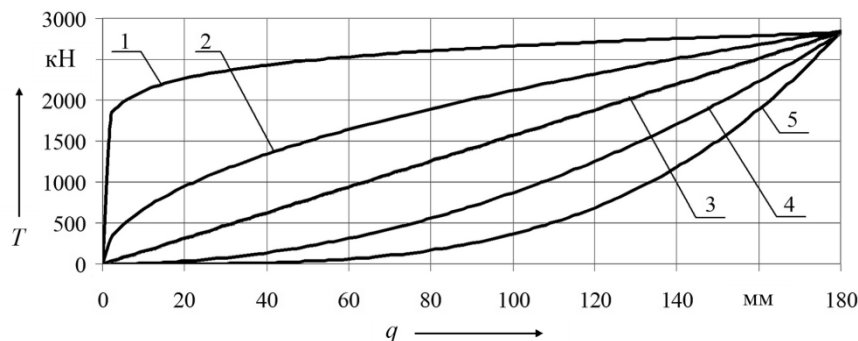


Рисунок 2 – Линии нагрузки поглощающих аппаратов при показателе степени:
1 – 0,1; 2 – 0,5; 3 – 1,0; 4 – 2,0; 5 – 3,5

Максимальная энергоемкость поглощающих аппаратов междвагонного соединения, кДж

Сила начальной затяжки поглощающих аппаратов, кН	Показатель степени n_n								
	0,1	0,3	0,5	0,75	1	1,5	2	2,75	3,5
0	462	389	341	292	254	203	169	135	114
200	463	400	352	306	272	225	193	162	141
400	468	407	362	322	291	248	218	188	169

Проведено моделирование столкновения двух вагонов массой 100 т, оборудованных поглощающими аппаратами, характеристики которых представлены в таблице. Рассматривалось соударение неподвижного вагона и движущегося по прямому горизонтальному участку пути с начальными скоростями 0,5, 1, 2, 3 м/с. Для скоростей 1 и 2 м/с на рисунке 3 показаны графики изменения силы в поглощающих аппаратах с $T_{0н} = 0$. При скорости 1 м/с минимальные силы возникли в поглощающих аппаратах с показателем степени более единицы, а при скорости 2 м/с – в аппаратах с n_n от 0,5 до 2.

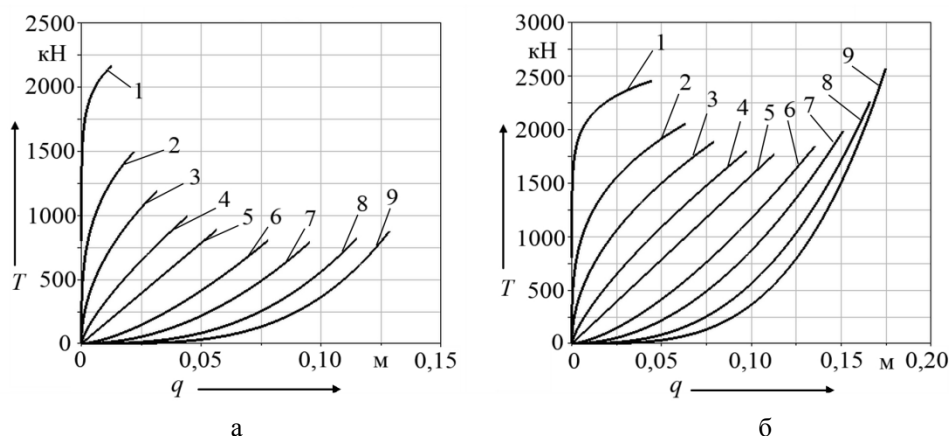


Рисунок 3 – Изменение сил сжатия амортизаторов вагонов, соударяющихся с начальными скоростями 1 м/с (а) и 2 м/с (б), при показателе степени n_n : 1 – 0,1; 2 – 0,3; 3 – 0,5; 4 – 0,75; 5 – 1,0; 6 – 1,5; 7 – 2,0; 8 – 2,75; 9 – 3,5

Зависимости максимальных продольных сил в автосцепках соударяющихся вагонов от показателя степени n_n их амортизаторов представлены на рисунке 4. Анализ представленных зависимостей показал следующее:

при скоростях соударения менее 1 м/с (соответствует воспринимаемой энергии 25 кДж) наименьшие силы возникают в аппаратах с n_n более 1;

при столкновении вагонов со скоростью 2 м/с (100 кДж) графики изменения максимальных сил зависят от величины начальной затяжки $T_{0н}$, существенно увеличивающей энергоемкость аппаратов с высоким n_n . Для $T_{0н} = 0$ силы минимальны при показателе степени от 0,5 до 1,5, для $T_{0н} = 200$ кН – от 0,5 до 2,75, а для $T_{0н} = 400$ кН – при n_n более 1;

скорость столкновения вагонов 3 м/с (225 кДж) приводит к сжатию поглощающих аппаратов на величину конструкционного хода при показателе степени более 1,25; 1,5; 2 соответственно для аппаратов с начальной затяжкой 0, 200, 400 кН. Минимальные силы возникают в аппаратах с $n_n = 0,5$.

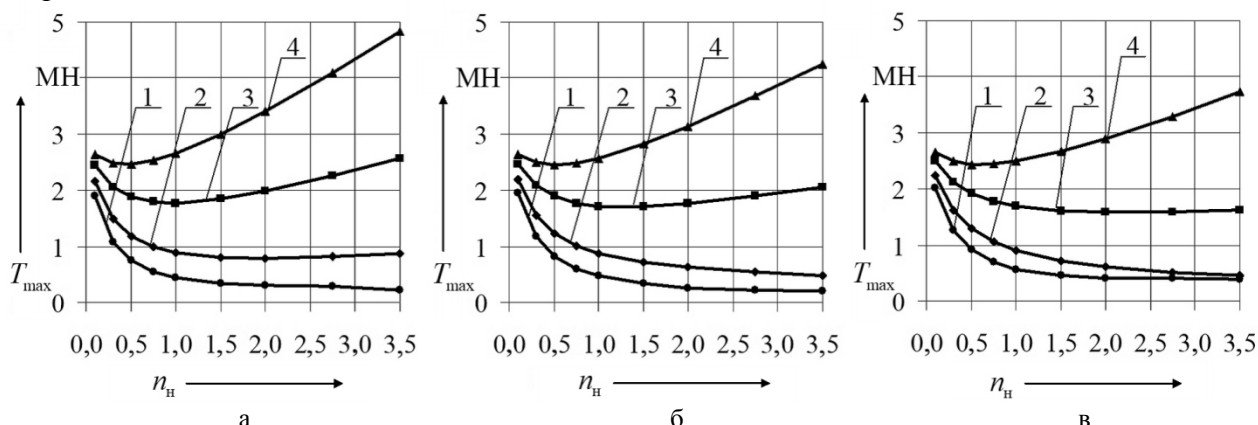


Рисунок 4 – Максимальные силы между вагонами, оборудованными поглощающими аппаратами с силой начальной затяжки 0 (а), 200 кН (б), 400 кН (в), при скорости столкновения вагонов: 1 – 0,5 м/с; 2 – 1 м/с; 3 – 2 м/с; 4 – 3 м/с

На основании анализа результатов моделирования можно сделать вывод о том, что оптимальность формы нагрузочной характеристики с точки зрения минимизации продольных сил между вагонами зависит от величины воспринимаемой поглощающим аппаратом энергии. Если вводимая энергия невелика, то наименьшая продольная сила возникнет в аппаратах с высоким показателем степени n_n (при вогнутом вверх графике линии нагрузки). По мере увеличения воспринимаемой энергии оптимальное значение показателя степени постепенно снижается, принимая значение 0,5 (выпуклый вверх график линии нагрузки) при энергии соударения вагонов 225 кДж. Данные выводы сделаны на основании анализа работы поглощающих аппаратов с максимальным ходом 90 мм и требуют уточнения для амортизаторов с другим максимальным ходом.

Соударение движущихся вагонов с неподвижными происходит во время их роспуска с горок. Максимальная скорость соударения регламентируется стандартом [13] и не должна превышать 5 км/ч (1,4 м/с). Однако фактически этот показатель значительно выше [14] и в отдельных случаях скорость может достигать 10 – 16 км/ч. Для обеспечения сохранности грузов и подвижного состава при маневровых операциях целесообразно на вагоны устанавливать поглощающие аппараты с высокой энергоемкостью, показатель степени n_n которых близок к 0,5.

Для оценки работы поглощающих аппаратов с рассматриваемыми силовыми характеристиками в процессе движения поезда проведено имитационное моделирование. Исследована модель поезда массой 9000 т (100 вагонов по 90 т) при движении через переломы профиля пути в режиме выбега, при трогании его с места и торможении локомотивом на прямом горизонтальном участке пути, а также при движении через перелом 10 % в режиме электродинамического торможения. Большое влияние на продольную нагруженность состава при этом оказывают зазоры в межвагонных соединениях. Увеличение зазоров до 40 – 80 мм приводит к возникновению сил ударного характера, превышающих управляющее воздействие (силу тяги или торможения) на величину до 50 % и более [15]. На основании представленных в работе [16] результатов исследований можно судить о наличии в автосцепках вагонов зазоров от 45 до 65 мм. Для сопоставления эффективности работы исследуемых поглощающих аппа-

ратов (с $T_{0н} = 200$ кН) в наиболее сложных эксплуатационных условиях рассмотрена модель поезда с зазорами между вагонами 65 мм. Данные зазоры характерны для вагонов, находящихся в длительной эксплуатации.

Трогание с места состава рассмотрено для случая резкого увеличения силы тяги от нуля до 500 кН. Рассчитаны значения продольных сил в поезде при переходном процессе длительностью 50 с. Изменение максимальных сил растяжения в составе от момента начала действия внешней силы представлено на рисунке 5. Для каждого типа поглощающего аппарата время начала действия силы тяги смещено относительно предыдущего на 30 с, что обеспечило наглядность графического отображения результатов.

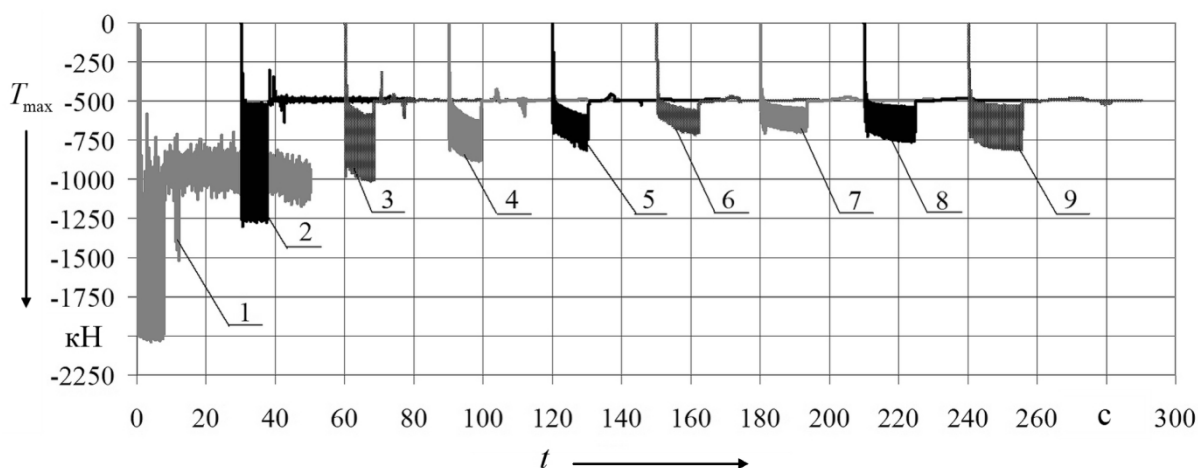


Рисунок 5 – Изменение максимальных сил растяжения в поезде при резком трогании с места и показателей степени амортизаторов n_n : 1 – 0,1; 2 – 0,3; 3 – 0,5; 4 – 0,75; 5 – 1,0; 6 – 1,5; 7 – 2,0; 8 – 2,75; 9 – 3,5

На основании представленных на рисунке 5 графиков можно сделать вывод о том, что минимальные продольные силы возникли в поезде, оборудованном амортизаторами удара с показателем степени 1,5. При уменьшении (или увеличении) показателя степени относительно значения 1,5 происходит рост продольных сил ударного характера, соответствующий этому отклонению.

Моделирование движения поезда в режиме электрического торможения локомотивом с начальной скорости 80 км/ч и тормозной силой 500 кН дало схожие с предыдущими расчетами результаты с той лишь разницей, что в поезде при этом возникли сжимающие продольные усилия, а не растягивающие. Объясняется это тем, что при моделировании трогания и торможения зазоры в автосцепках в момент начала действия внешней силы принимались выбранными наполовину и их влияние на результаты расчетов в обоих случаях было одинаковым.

Согласно исследованиям, результаты которых приведены в статье [17], плавное изменение тормозной силы способствует снижению продольной нагруженности в поезде, особенно при движении через переломы продольного профиля пути. Для более полной оценки работы исследуемых амортизаторов рассмотрено движение поезда через перелом профиля 10 ‰ в режиме электрического торможения при плавном увеличении тормозной силы от 0 до 500 кН в течение 10 с. Результаты расчетов представлены в виде графиков изменения максимальных сжимающих сил на рисунке 6. Как и в предыдущих вычислительных экспериментах, наилучшим образом проявили себя поглощающие аппараты с показателями степени от 1 до 2.

Рассмотрено влияние переломов профиля пути на силы между вагонами движущегося в режиме выбега поезда при различных поглощающих аппаратах. Моделирование движения с площадки на подъем 10 ‰ и далее на площадку (при радиусе сопряжения элементов в вертикальной плоскости 15 км) показало, что наименее склонны к возникновению и росту продольных ударных сил в данных условиях амортизаторы удара с наибольшим показателем степени. Так, максимальные силы сжатия при $n_n = 3,5$ составили 239 кН, а растяжения –

316 кН. Соответствующие показатели для $n_n = 1,0$ выросли до 462 и 594 кН, а при $n_n = 0,1$ достигли значений 1817 и 1934 кН.

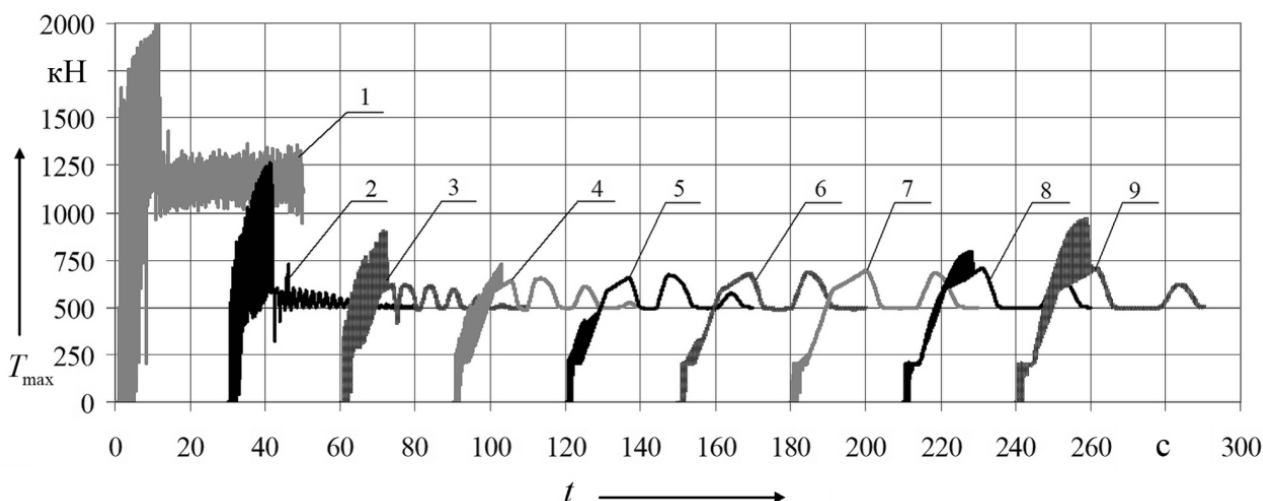


Рисунок 6 – Изменение максимальных сжимающих сил в поезде при плавном торможении на переломе профиля пути 10 % и показателе степени амортизаторов n_n : 1 – 0,1; 2 – 0,3; 3 – 0,5; 4 – 0,75; 5 – 1,0; 6 – 1,5; 7 – 2,0; 8 – 2,75; 9 – 3,5

Зависимости максимальных продольных сил от показателя степени амортизаторов для рассмотренных режимов движения представлены на рисунках 7 и 8. Анализ результатов моделирования неустановившегося движения поезда показал, что в большинстве случаев наименьшие продольные силы ударного характера возникают в вагонах, оборудованных амортизаторами с вогнутыми вверх линиями силовых нагрузочных характеристик, т. е. при n_n более 1,5. При высоких показателях степени амортизаторы преобразуют энергию внешних воздействий в продольные упругие колебания в большей степени, чем поглощающие аппараты с $n_n < 1$, что приводит к большим сжатиям и растяжениям поезда по длине при переходных процессах движения и способствует снижению ударных сил. В то же время составы, оборудованные амортизаторами с $n_n < 1$, склонны к возникновению нарастающих от головы к хвосту поезда ударных сил и оттяжке хвостовой части вагонов.

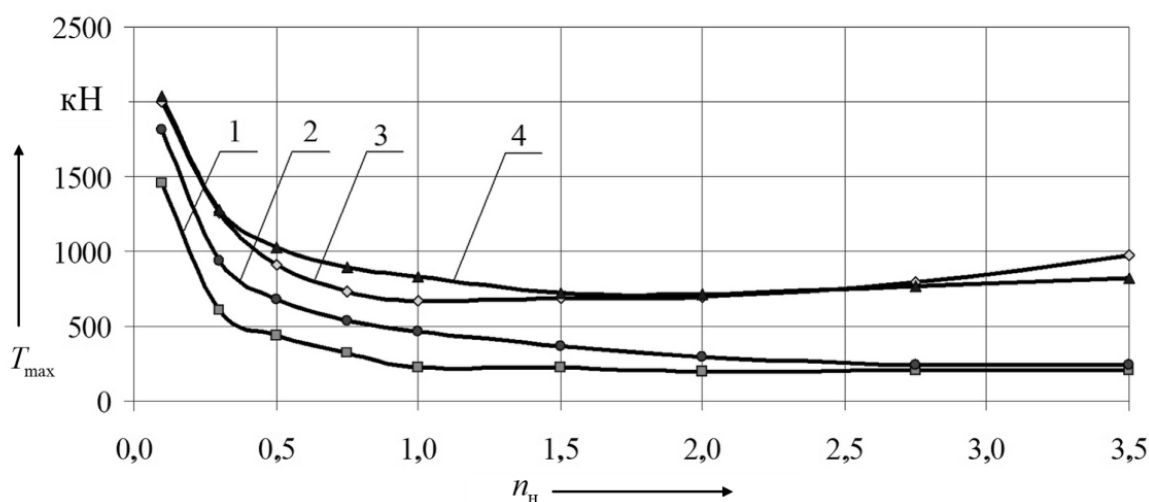


Рисунок 7 – Зависимость максимальных сил сжатия в поезде от показателя степени n_n амортизаторов при резком трогании с места (1); движении через переломы профиля 10 % в режиме выбега (2); плавном торможении на переломе профиля 10 % (3); резком торможении на площадке (4)

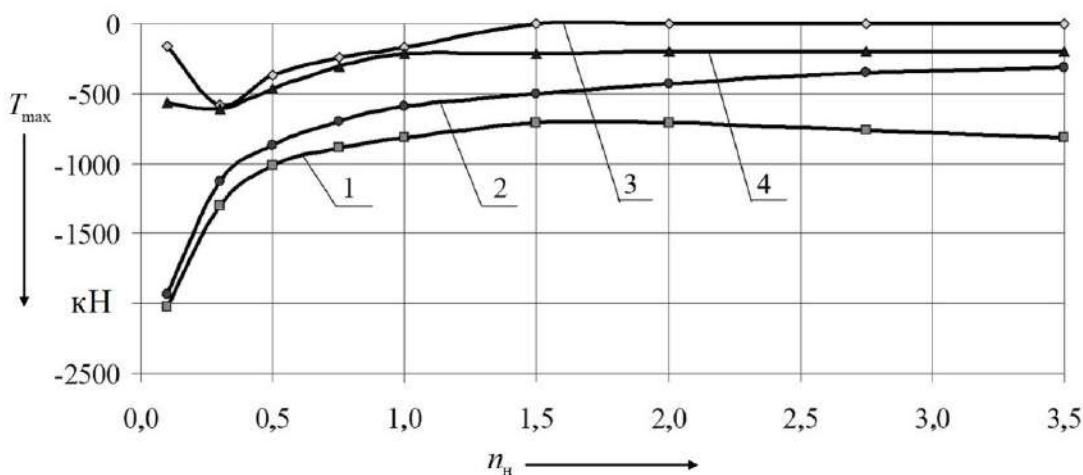


Рисунок 8 – Зависимость максимальных сил растяжения в поезде от показателя степени n_n амортизаторов при резком трогании с места (1); движении через переломы профиля 10 ‰ в режиме выбега (2); плавном торможении на переломе профиля 10 ‰ (3); резком торможении на площадке (4)

Таким образом, результаты исследований показали, что при переходных процессах движущегося поезда и маневровых соударениях с невысокими скоростями (до 1 м/с) продольные силы между вагонами минимальны при амортизаторах с показателем степени $n_n > 1$. Однако при высоких скоростях соударения, характерных для роспуска вагонов с горки, преимущественно обладают поглощающие аппараты с $n_n < 1$, отличающиеся большей энергоемкостью. При ударах с энергией более 225 кДж в амортизаторах с показателем степени выше 1,5 – 2,3 (в зависимости от силы начальной затяжки поглощающего аппарата) возникают силы, превышающие предельно допустимое значение 3 МН. Ввиду сказанного выше можно рекомендовать к использованию высокоэнергоемкие поглощающие аппараты, угол наклона силовой характеристики которых зависит от скорости сжатия амортизатора, а показатель степени n_n близок к единице. Не рекомендуются силовые характеристики очень большой, а также малой жесткости, так как при неустановившихся режимах движения первые способствуют росту продольных сил ударного характера, а вторые – распространению упругих продольных сил вдоль поезда и увеличению длительности их действия.

Список литературы

1. Захаров, С. М. Развитие тяжеловесного движения в мире [Текст] / С. М. Захаров, К. П. Шенфельд // Вестник науч.-исслед. ин-та ж.-д. трансп. / Науч.-исслед. ин-т ж.-д. трансп. – М. – 2013. – № 4. – С. 9 – 18.
2. Васильев, А. С. Повышение эффективности фрикционных поглощающих аппаратов автосцепки за счет применения эластомерных распорных узлов [Текст]: Автореферат дис... канд. техн. наук: 05.22.07 / Васильев Алексей Сергеевич. – Брянск, 2013. – 19 с.
3. Перспективы совершенствования поглощающих аппаратов железнодорожных вагонов [Текст] / Г. В. Артюх, Е. И. Иванов и др. // Защита металлургических машин от поломок: Межвуз. темат. сб. науч. тр. / Приазовский гос. техн. ун-т. – Мариуполь, 2012. – Вып. 14. – С. 174 – 179.
4. О некоторых результатах испытаний поглощающего аппарата эластомерного типа разработки ДИИТа [Текст] / Е. П. Блохин, В. Н. Плахотник и др. // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского нац. ун-та ж.-д. трансп. им. академика В. Лазаряна / Днепропетровский нац. ун-т ж.-д. трансп. им. академика В. Лазаряна. – Днепропетровск. – 2005. – № 8. – С. 23 – 25.
5. Манашкин, Л. А. Поглощающий аппарат с переменной массой рабочего тела [Текст] / Л. А. Манашкин, С. В. Мямлин // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского нац. ун-та ж.-д. трансп. им. академика В. Лазаряна / Днепропетровский нац. ун-т ж.-д. трансп. им. академика В. Лазаряна. – Днепропетровск. – 2005. – № 8. – С. 70 – 78.

6. Кеглин, Б. Г. Совершенствование математической модели эластомерного амортизатора удара [Текст] / Б. Г. Кеглин, М. Г. Войновский // Вестник Брянского гос. техн. ун-та / Брянский гос. техн. ун-т. – Брянск. – 2013. – № 1. – С. 27 – 35.
7. Болдырев, А. П. Разработка математической модели и расчет характеристик поглощающего аппарата автосцепки с полимерными элементами при различных температурах окружающей среды [Текст] / А. П. Болдырев, П. Д. Жиров // Вестник Брянского гос. техн. ун-та / Брянский гос. техн. ун-т. – Брянск. – 2010. – № 4. – С. 55 – 58.
8. Wu Q., Yang X., Cole C., Luo S. Modelling polymer draft gears, *Vehicle System Dynamics*, 2016, vol. 54, no. 9, pp. 1208 – 1225.
9. Жиров, П. Д. Оценка влияния эксплуатационных факторов на эффективность работы поглощающих аппаратов автосцепки [Текст]: Автореферат дис... канд. техн. наук: 05.22.07 / Жиров Павел Дмитриевич. – Брянск, 2012. – 19 с.
10. Жиров, П. Д. Расчет статистического распределения нагрузок, действующих на грузовой вагон, и оценка критериев эффективности с учетом эксплуатационных факторов [Текст] / П. Д. Жиров // Вестник Брянского гос. техн. ун-та / Брянский гос. техн. ун-т. – Брянск. – 2011. – № 3. – С. 38 – 42.
11. Халаев, А. А. Эффективность применения полимерных материалов в поглощающих аппаратах автосцепки [Текст] / А. А. Халаев, Э. А. Фатьков // Вестник науч.-исслед. ин-та ж.-д. трансп. / Науч.-исслед. ин-т ж.-д. трансп. – М., 2009. – № 2. – С. 39 – 42.
12. Shimanovsky A., Sakharau P. Investigation of the Longitudinal Track Profile Influence on the Forces Acting in the Train Inter-car Connections Using the MSC.ADAMS Software, *CEUR Workshop Proceedings*, 2019, vol. 2353, pp. 555 – 569.
13. ГОСТ 22235 – 2010. Вагоны грузовые магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Общие требования по обеспечению сохранности при производстве погрузочно-разгрузочных и маневровых работ [Текст]. – Введ. 2011.05.01. – М.: Стандартинформ, 2011. – 18 с.
14. Васильев, А. С. Экспериментальные исследования современных фрикционных амортизаторов удара подвижного состава железных дорог [Текст] / А. С. Васильев, А. П. Болдырев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук / Самарский научный центр Российской академии наук. – Самара. – 2013. – Т. 15. – № 4-2. – С. 507 – 510.
15. Шимановский, А. О. Влияние зазоров в автосцепных устройствах на продольные силы в межвагонных соединениях однородного поезда [Текст] / А. О. Шимановский, П. А. Сахаров // Механика машин, механизмов и материалов / Объединенный ин-т машиностроения Национальной академии наук Беларуси. – Минск. – 2019. – № 2 (47). – С. 42 – 50.
16. Blochinas E., Dailyska S., Lingaitis L., Ursuliak L. Nestacionarieji ir kvazistatiniai geležinkelio traukinių judėjimo režimai, Vilnius, 2016, 168 p.
17. Сахаров, П. А. Исследование продольных сил в грузовых поездах при движении через переломы профиля пути в режиме электрического торможения [Текст] / П. А. Сахаров // Вестник Белорусского гос. ун-та транспорта: Наука и транспорт / Белорусский гос. ун-т транспорта. – Гомель. – 2019. – № 1 (38). – С. 59 – 62.

References

1. Zakharov S. M., Shenfel'd K. P. Global development of heavy-haul railway traffic [Razvitie tiazhelovesnogo dvizheniia v mire]. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Vestnik of the Railway Research Institute*, 2013, no. 4, pp. 9 – 18.
2. Vasil'ev A. S. *Povyshenie effektivnosti friktsionnykh pogloshchaiushchikh apparatov avtostsepi za schet primeneniia elastomernykh raspornykh uzlov* (Increase of efficiency of friction draft gear of auto coupling due to application of elastomeric spacers). Extended Abstract of Ph. D. Sc. Thesis, Bryansk, 2013, 19 p.
3. Artiukh G. V., Ivanov E. I., Sergienko Iu. V., Korchagina T. V., Lysenko V. V. Prospects of perfection of suctive vehicles of railway carriages [Perspektivy sovershenstvovaniia pogloshchaiushchikh apparatov zheleznodorozhnykh vagonov]. *Zashchita metallurgicheskikh mashin ot*

polomok: mezhvuzovskii tematicheskii sbornik nauchnykh trudov – Protection of metallurgical machines from breakdowns: interuniversity thematic collection of scientific works, 2012, Vol. 14, pp. 174 – 179.

4. Blokhin E. P., Plakhotnik V. N., Savchuk O. M., Zabolotnyi A. N., Bubnov V. M., Kabachnyi V. P. Some Test Results of the Absorbing Apparatus Elastomeric Type Development of DIIT [O nekotorykh rezul'tatakh ispytaniy pogloshchaiushchego apparata elastomernogo tipa razrabotki DIITa]. *Nauka i progress transporta. Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta imeni akademika V. Lazariana – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2005, no. 8, pp. 23 – 25.

5. Manashkin L. A., Miamlin S. V. Absorbing Device with Variable Mass of the Working Fluid [Pogloshchaiushchii apparat s peremennoi massoi rabocheho tela]. *Nauka i progress transporta. Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta imeni akademika V. Lazariana – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2005, no. 8, pp. 70 – 78.

6. Keglin B. G., Voinovskii M. G. Mathematical model of perfection Elastomeric shock absorbers [Sovershenstvovanie matematicheskoi modeli elastomernogo amortizatora udara]. *Vestnik Brianskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Bryansk state technical university*, 2013, no. 1, pp. 27 – 35.

7. Boldyrev A. P., Zhirov P. D. Development of mathematical model and calculation of characteristics of spring buffer with polymeric components at different environmental temperatures [Razrabotka matematicheskoi modeli i raschet kharakteristik pogloshchaiushchego apparata avtostseпки s polimernymi elementami pri razlichnykh temperaturakh okruzhaiushchei sredy]. *Vestnik Brianskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Bryansk state technical university*, 2010, no. 4, pp. 55 – 58.

8. Wu Q., Yang X., Cole C., Luo S. Modelling polymer draft gears, *Vehicle System Dynamics*, 2016, vol. 54, no. 9, pp. 1208 – 1225.

9. Zhirov P. D. *Otsenka vliianiia ekspluatatsionnykh faktorov na effektivnost' raboty pogloshchaiushchikh apparatov avtostseпки* (Assessment of the impact of operational factors on the efficiency of the absorbing devices of the automatic coupling). Extended Abstract of Ph. D. Sc. Thesis, Bryansk, 2012, 19 p.

10. Zhirov P. D. Calculation of statistical distribution of longitudinal loadings acting on a freight car, and an estimation of criteria of efficiency with the account and without operational factors [Raschet statisticheskogo raspredeleniia nagruzok, deistvuiushchikh na gruzovoi vagon, i otsenka kriteriev effektivnosti s uchetom ekspluatatsionnykh faktorov]. *Vestnik Brianskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Bryansk state technical university*, 2011, no. 3, pp. 38 – 42.

11. Khalaev, A. A., Fat'kov E. A. Efficiency of polymer materials application in auto-coupling absorbing devices [Effektivnost' primeneniia polimernykh materialov v pogloshchaiushchikh apparatakh avtostseпки]. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Vestnik of the Railway Research Institute*, 2009, no. 2, pp. 39 – 42.

12. Shimanovsky A., Sakharau P. Investigation of the Longitudinal Track Profile Influence on the Forces Acting in the Train Inter-car Connections Using the MSC.ADAMS Software, *CEUR Workshop Proceedings*, 2019, vol. 2353, pp. 555 – 569.

13. *Vagony gruzovye magistral'nykh zheleznnykh dorog kolei 1520 mm. Obshchie trebovaniia po obespecheniiu sokhrannosti pri proizvodstve pogruzochno-razgruzochnykh i manevrovnykh rabot, GOST 22235-2010* (Freight cars for 1520 mm gauge main line railways. General requirements for safety in loading-unloading and shunting operations, State Standart 22235-2010). Moscow, Standartinform, 2011, 18 p.

14. Vasil'ev A. S., Boldyrev A. P. The Experimental Studies of Modern Frictional Blow Shock-Absorbers of the Railroads Rolling Stock [Eksperimental'nye issledovaniia sovremennykh frik-

tsionnykh amortizatorov udara podvizhnogo sostava zheleznykh dorog]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk – Academic Journal "Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences"*, 2013, Vol. 15, no. 4-2, pp. 507 – 510.

15. Shimanovsky A. O., Sakharov P. A. Effect of Gap Clearances in Automatic Coupling Devices on Longitudinal Forces in Intercar Connections of Homogeneous Train [Vliianie zazorov v avtostsepykh ustroystvakh na prodol'nye sily v mezhvagonnykh soedineniiakh odnorodnogo poezda]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov – International Scientific and Technical Journal "Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials"*, 2019, no. 2 (47), pp. 42 – 50.

16. Blochinas E., Dailydka S., Lingaitis L., Ursuliak L. Nestacionarieji ir kvazistatiniai geležinkelio traukinių judėjimo režimai, Vilnius, 2016, 168 p.

17. Sakharov P. A. Investigation of the Longitudinal Forces on the Freight Trains Moving Through the Changes of the Longitudinal Track Profile in the Mode of Electric Braking [Issledovanie prodol'nykh sil v gruzovykh poezdakh pri dvizhenii cherez perelomy profilia puti v rezhime elektricheskogo tormozheniia]. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: Nauka i transport – Bulletin of the Belarusian State University of Transport: Science and Transport*, 2019, no. 1 (38), pp. 59 – 62.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Сахаров Павел Анатольевич

Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ).

Кирова ул., д. 34, г. Гомель, 246653, Беларусь.

Аспирант кафедры «Техническая физика и теоретическая механика», БелГУТ.

Тел.: +375 (0232) 95-29-41.

E-mail: sahpa@mail.ru

INFORMATION ABOUT AUTHOR

Sakharov Pavel Anatolyevich

Belarusian State University of Transport (BelSUT), 34, Kirova st., Gomel, 246653, Belarus.

PhD student of Technical Physics and Theoretical Mechanics Department, BelSUT.

Phone: +375 (0232) 95-29-41.

E-mail: sahpa@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Сахаров, П. А. Оценка влияния параметров силовых характеристик поглощающих аппаратов на силы между вагонами поезда [Текст] / П. А. Сахаров // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 3 (39). – С. 78 – 88.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Sakharov P. A. Estimation of the Influence of Damping Devices Force Characteristics on the Forces Between Train Cars. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2019, vol. 3, no. 39, pp. 78 – 88 (In Russian).

УДК 621.311

В. П. Ступицкий, И. А. Худогов, В. А. Тихомиров, О. В. Лобанов
Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНОЙ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Аннотация. Эксплуатационная надежность хозяйства электрификации и электроснабжения и связанная с ней безопасность движения в основном определяются техническим состоянием контактной сети – элемента, который чрезвычайно сложно каким-либо образом резервировать. Состояние устройств контактной сети Восточно-Сибирской железной дороги косвенно характеризуется периодами электрификации участков. Оборудование контактной сети, введенное в эксплуатацию в 1960 – 1970 гг., выработало свой проектный ресурс, не в достаточной мере обладает требуемой нагрузочной способностью и снижает надежность работы электрифицированного участка.

В статье представлено, что целью повышения надежности работы электрооборудования в процессе эксплуатации устройств электроснабжения является прогнозирование состояния ее элементов, в частности,

металлических опор контактной сети, как объекта исследования. Корректно оценить состояние и ресурс устройств контактной сети позволит применение на практике новейших систем диагностики с использованием математического аппарата и методов моделирования.

Показано, что, проводя мониторинг различных параметров, характеризующих опору, можно вовремя обнаружить изменение технического состояния объекта исследования и провести техническое обслуживание в тот промежуток времени, когда возникают отклонения параметров от допустимых пределов.

Обобщены статистические данные о состоянии опорного хозяйства на ВСЖД, приведены основные виды повреждений металлических опорных и поддерживающих конструкций. Показано, что выявляются новые виды повреждений металлических конструкций, не классифицирующиеся ранее, что качественная и количественная оценка состояния металлических опор контактной сети, которые имеют различные повреждения конструкции, возможна с использованием методов моделирования, имитации и оценки состояния конструкций.

В качестве независимой полнофункциональной среды для моделирования, имитации и оценки результатов анализа характеристик металлических опор модели М6/10 использована система FEMAP – независимая система автоматизированного проектирования от компании Siemens PLM.

Ключевые слова: контактная сеть, диагностика, металлическая опорная конструкция, дефект, повреждение, моделирование, метод конечных элементов.

Valerii P. Stupitskiy, Igor' A. Khudonogov, Vladimir A. Tikhomirov, Oleg V. Lobanov

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

DETERMINATION OF RESIDUAL BEARING CAPACITY OF METAL STRUCTURES OF THE CONTACT NETWORK

Abstract. The operational reliability of the electrification and power supply system and the associated traffic safety is mainly determined by the technical condition of the contact network-an element that is extremely difficult to reserve in any way. The state of the contact network devices of the East Siberian railway is indirectly characterized by periods of electrification of sections. The equipment of the contact network, put into operation in the 1960s and 1970s, has developed its design life, does not have the required load capacity enough and reduces the reliability of the electrified section.

The article shows that the purpose of improving the reliability of electrical equipment in the operation of power supply devices is to predict the state of its elements, in particular the metal supports of the contact network, as an object of study. Correctly assess the state and resource of the contact network devices will allow the use of the latest diagnostic systems by personnel in practice, using mathematical apparatus and modeling methods.

It is shown that by monitoring various parameters characterizing the support, it is possible to detect a change in the technical condition of the object of study in time and to carry out maintenance in the period of time when there are deviations of parameters beyond unacceptable limits.

The statistical data on the state of the support economy at the VSZHD are summarized, the main types of damage to metal support and supporting structures are given. It is shown that new types of damage to metal structures, not classified earlier, are revealed, that qualitative and quantitative assessment of the state of metal supports of the contact network, which have various structural damage is possible using methods, modeling, simulation and evaluation of the state of structures.

FEMAP, an independent computer-aided design system from Siemens PLM, is used as an independent full-featured environment for modeling, simulation and evaluation of the results of the analysis of the characteristics of metal supports of the M6/10 model

Keywords: contact network, diagnostics, metal support structure, defect, damage, modeling, finite element method.

Контактная сеть – сложное техническое сооружение электрифицированных железных дорог. Контактная сеть не имеет резерва, что обуславливает повышенные требования к ней. Перед обслуживающим контактную сеть персоналом стоит сложная и ответственная задача: постоянно содержать устройства контактной сети и воздушных линий в технически исправном состоянии. Устройства контактной сети и воздушных линий, подвергаясь воздействиям различных факторов, должны успешно им противостоять, обеспечивая бесперебойное движение поездов с установленными весовыми нормами и интервалами между поездами при требуемых нормах скорости движения. В настоящее время во многих хозяйствах электроснабжения ОАО «РЖД» истекает ресурс контактной сети, что в основном объясняется боль-

шими масштабами электрификации железных дорог [1]. Данная проблема является очень серьезной и требует принятия незамедлительных решений. В связи с этим возникает необходимость переходить от обслуживания по нормам к обслуживанию по состоянию. Одним из основных элементов контактной сети являются опоры. Отказ опоры контактной сети и потери ею несущей способности могут сопровождаться непредсказуемыми последствиями, которые оказывают влияние на безопасность движения поездов. В соответствии с нормативно-технической документацией срок эксплуатации металлических опор контактной сети составляет 50 лет. Согласно данным по распределению срока службы металлических опор контактной сети на ВСЖД у 54 % парка опор ВСЖД срок эксплуатации превышен, 46 % опор имеют срок службы до 50 лет и менее 1 % составляют опоры со сроком службы от 41 до 50 лет. Правильно оценить состояние и остаточный ресурс устройств контактной сети без привлечения специализированных организаций – сложнейшая задача для персонала дистанций электроснабжения. Существующие методы диагностики металлических опор контактной сети не позволяют определить состояние их несущей способности. В условиях ограниченных ресурсов поддержание работоспособного состояния системы электроснабжения возможно только за счет освоения и применения на практике персоналом новейших систем диагностики, математического анализа и моделирования.

По состоянию на 01.01.2018 по ВСЖД количество металлических опор контактной сети составляло 10897, из них 2025 являются дефектными, а 8872 бездефектные (рисунок 1).

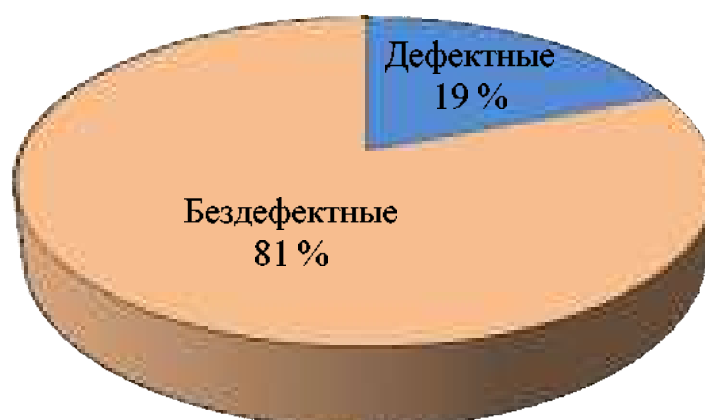


Рисунок 1 – Диаграмма распределения бездефектных и дефектных металлических опор на 01.01.2018

Металлические опорные и поддерживающие конструкции в процессе эксплуатации воспринимают постоянные и переменные нагрузки и подвергаются воздействию окружающей среды. Под влиянием кислорода, воды, химически активных элементов, содержащихся в воздухе, происходит коррозия элементов металлоконструкций [2].

Оценка состояния металлических опор, фундаментов, жестких поперечин и поддерживающих устройств производится по наличию, виду и размерам повреждений на этих конструкциях.

К основным видам повреждений металлических опорных и поддерживающих конструкций относят разрушение защитного покрытия, сплошную равномерную коррозию, местную коррозию металла, расслоение металла в поясах, раскосах, связях, косынках, прокладках, фланцах, трещины, погнутости [3].

Особого внимания заслуживает рассмотрение такого повреждения, как погнутость элементов металлических конструкций контактной сети. В качестве объекта исследования возьмем металлическую опору М6/10.

На рисунке 2 показано повреждение в виде погнутоści силового уголка и раскоса металлической опоры.



Рисунок 2 – Повреждение в виде погнутоści силового уголка и раскоса металлической опоры

Повреждения металлических опор могут иметь место при фактических нагрузках выше расчетных значений и в результате дефектов, появившихся в процессе изготовления опор, их транспортировки, монтажа или в условиях эксплуатации. Превышение нагрузок, действующих на опору, против расчетных нагрузок может наступить в результате редко встречающихся стихийных явлений (ураганов, сильного гололеда «пляски проводов») и в результате ошибок проектирования, изыскательских работ и строительства линий. Далеко не все повреждения металлических конструкций, которые могут быть выявлены в процессе эксплуатации, подходят под классификацию повреждений металлических конструкций, а значит, нет четкого плана действий, как необходимо бороться с данными повреждениями, поэтому качественный анализ данных видов повреждений и достоверная оценка технического состояния конструкции являются весьма сложной задачей для работников дистанции электроснабжения [4].

Данная статья посвящена одному из перспективных направлений развития НТР холдинга «РЖД» – разработке автономных бортовых систем и универсальных диагностических комплексов с возможностью их работы в составе пассажирских поездов со скоростями до 160 км/ч в целях снижения стоимости оценки состояния железнодорожной инфраструкту-

ры, переходу от регламентного принципа технического обслуживания, ремонта и замены изношенных объектов железнодорожной инфраструктуры к ресурсному.

При рассмотрении продольных горизонтальных нагрузок необходимо учитывать вид контактной подвески (КП): полукомпенсированная, компенсированная, некомпенсированная, работу компенсаторов, средних анкеровок, тип консолей: поворотная, неповоротная, полуповоротная, работу фиксаторов. Кроме этого в условиях Восточной Сибири (ВС) необходимо учитывать характеристики грунта. В ВС около 120 типов грунтов, имеющих различные механические, электрические и химические характеристики, которые создают горизонтальные и вертикальные моменты на уровне условного обреза фундамента [5]. Главной задачей, которая может быть решена, является качественная и количественная оценка состояния металлических опор контактной сети, которые имеют различные повреждения конструкции. Рассматриваемую проблему предлагается решать путем применения новых методов диагностики, моделирования, имитации и оценки состояния конструкций, которые уже нашли применения во многих сферах производства.

Таким методом может быть метод конечных элементов (МКЭ) – один из самых распространенных и эффективных методов прикладной математики для численного решения физических задач, которые могут быть описаны дифференциальными уравнениями или системами дифференциальных уравнений. Указанный метод применяется при проектировании изделий машиностроения, строительных конструкций и сооружений, в решении задач термодинамики, гидравлики и электродинамики. Этот метод универсален и может использоваться в моделировании любых процессов, описываемых дифференциальными уравнениями.

Металлические опорные конструкции, а именно опоры контактной сети, ригели жестких поперечин, прожекторные мачты, молниеотводы, стойки, представляют собой решетчатые пространственные фермы, у которых элементы решетки (раскосы, стойки, связи) приварены непосредственно к поясам без косынок. Опорные и поддерживающие конструкции способны воспринимать расчетную нагрузку в том случае, если элементы их будут прямолинейными, не будет опасных коррозионных разрушений и отклонений от расчетных параметров металлических конструкций КС [6, 7].

Для оценки несущей способности ферменной конструкции обычно определяются следующие внутренние силовые факторы, возникающие в определенных условиях восприятия внешних механических нагрузок [8]: продольные (осевые) силы в стержнях N и механические нормальные напряжения в поперечных сечениях стержней σ . Данные внутренние силовые факторы принято считать фактически действующими и сравнивать с определенными предельными значениями. В качестве основного предельного значения чаще всего используется предел прочности (временное сопротивление) σ_b , который определяется по справочнику в зависимости от материала.

Кроме того, стержни ферменной конструкции, работая на сжатие, могут потерять устойчивость. В связи с этим в качестве еще одного предельного значения используется критическая сила потери устойчивости сжатого стержня $N_{кр}$.

Таким образом, оценку несущей способности ферменной конструкции можно проводить с помощью двух условий:

$$|\sigma| \leq \sigma_b; \quad (1)$$

$$|N| \leq N_{кр}. \quad (2)$$

В растянутых стержнях, где $N > 0$, достаточно выполнения одного условия (1). В сжатых стержнях ($N < 0$) должны выполняться оба условия – (1) и (2).

Модель опоры М 6/10 с расчетными параметрами приведена на рисунке 3.

Необходимо отметить, что консоль и кронштейн были смоделированы формально, они необходимы для задания плеч сил, которые оказывают воздействие непосредственно на опору, поэтому внутренние нагрузки, которые будут возникать в конструкциях опоры, не учитывались.

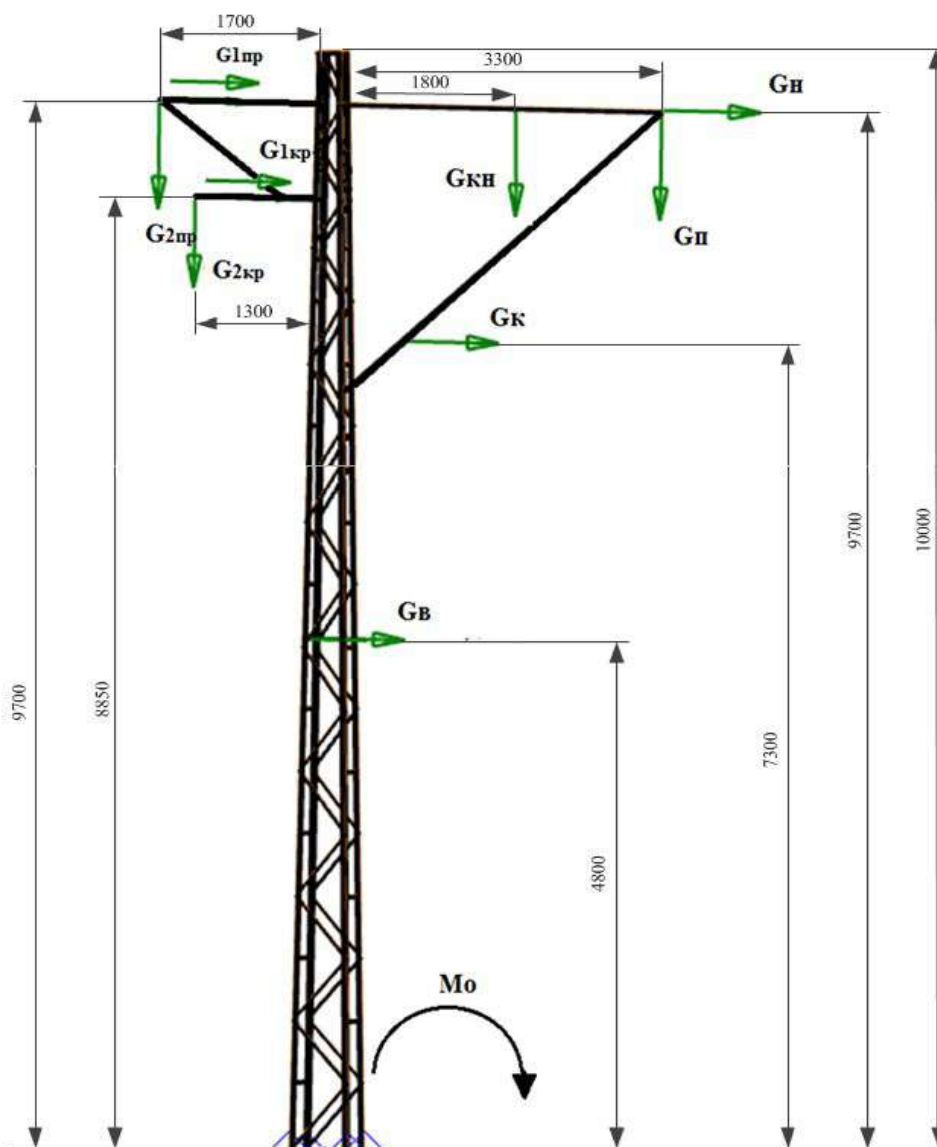


Рисунок 3 – Схема опоры М 6/10 с расчетными параметрами

Для расчета несущей способности металлической опоры контактной сети в САПР Femap необходимо предварительно построить трехмерную модель данной опоры. Опора построена в программе «Компас-3D» по чертежу в соответствии с типовым проектом 1954 года (рисунок 4) [9].

Расчет такой опоры был проведен при механических нагрузках, которые создавали бы максимальный изгибающий момент относительно уровня условного обреза фундамента опоры, чтобы он был близок к номинальному. Так как номинальный изгибающий момент относительно уровня условного обреза фундамента опоры М 6/10 равен 6 тс·м, то расчетным будет изгибающий момент, который будет стремиться к данному значению [10]. Только при номинальном изгибающем моменте будет возможна качественная оценка состояния конструкции металлической опоры.

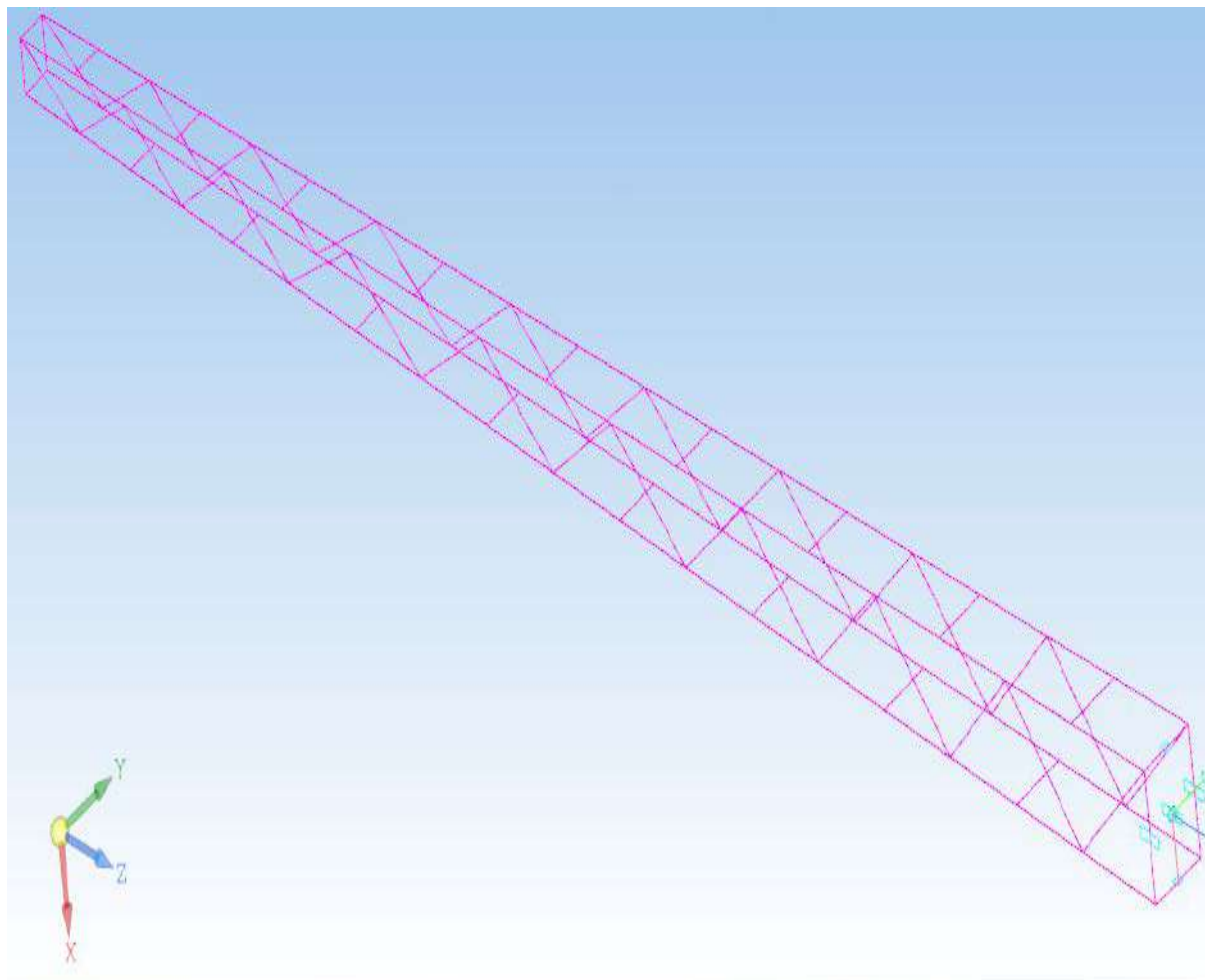


Рисунок 4 – Трехмерная модель опоры М6/10

При расчетах была взята промежуточная опора на прямом участке пути. Тип контактной подвески – М-120 + 2МФ100, компенсированная, с полевой стороны опоры находится трехфазная ЛЭП 10 кВ, выполненная некомпенсированными проводами АС-50/8 [11].

Далее трехмерная модель была транслирована (импортирована) из программы «Компас-3D» в САПР FEMAP, где была построена до полноценной конечно-элементной модели (рисунок 5), которая включает в себя характеристики материала, форму и размеры сечений, условия кинематического закрепления, внешние силы. В качестве характеристик материала использовались величины, взятые из справочной литературы и соответствующие марке стали, из которой была изготовлена опора, 09Г2С.

В САПР FEMAP была смоделирована конечно-элементная сетка путем замены ломаных на уголки сортамента 60×60×5, 45×45×5 и 30×30×5. Общий вид конечно-элементной модели представлен на рисунке 5. Здесь выполнены построения консоли и кронштейна опоры, которые необходимы для точек приложения сил; они были построены путем замены ломаных швеллером № 12 ($h = 120$ мм). Важно отметить, что в проведенных расчетах консо-

ли и кронштейны не входили в конструктивно-силовую схему опоры и были построены условно.

Значения силы были заданы таким образом, чтобы создавался изгибающий момент в основании опоры величиной около 5,9 тс·м, что является расчетной нагрузкой для рассматриваемой опоры. Расчетная нагрузка учитывает запас по прочности.

После вычислений, выполненных программой FEMAP, получены и проанализированы результаты расчетов нагрузок и напряжений, представленные на рисунках 6 и 7.

Из рисунка 6 видно, что стержни, работающие на сжатие, имеют фиолетовый окрас, соответственно максимальное нормальное напряжение имеет отрицательные значения на шкале, а стержни, работающие на растяжение, имеют уже синий окрас, соответственно у них значения максимального нормального напряжения положительные.

У работников дистанции электроснабжения часто возникают вопросы о том, какие элементы конструкции работают на сжатие, а какие на растяжение. Повреждения сжатых и растянутых стержней по-разному нормируются [3], поэтому при использовании моделирования в САПР FEMAP любой конструкции дается наглядное представление о расположении сжатых и растянутых стержней, что значительно упрощает нормирование повреждений типа «погнутость».

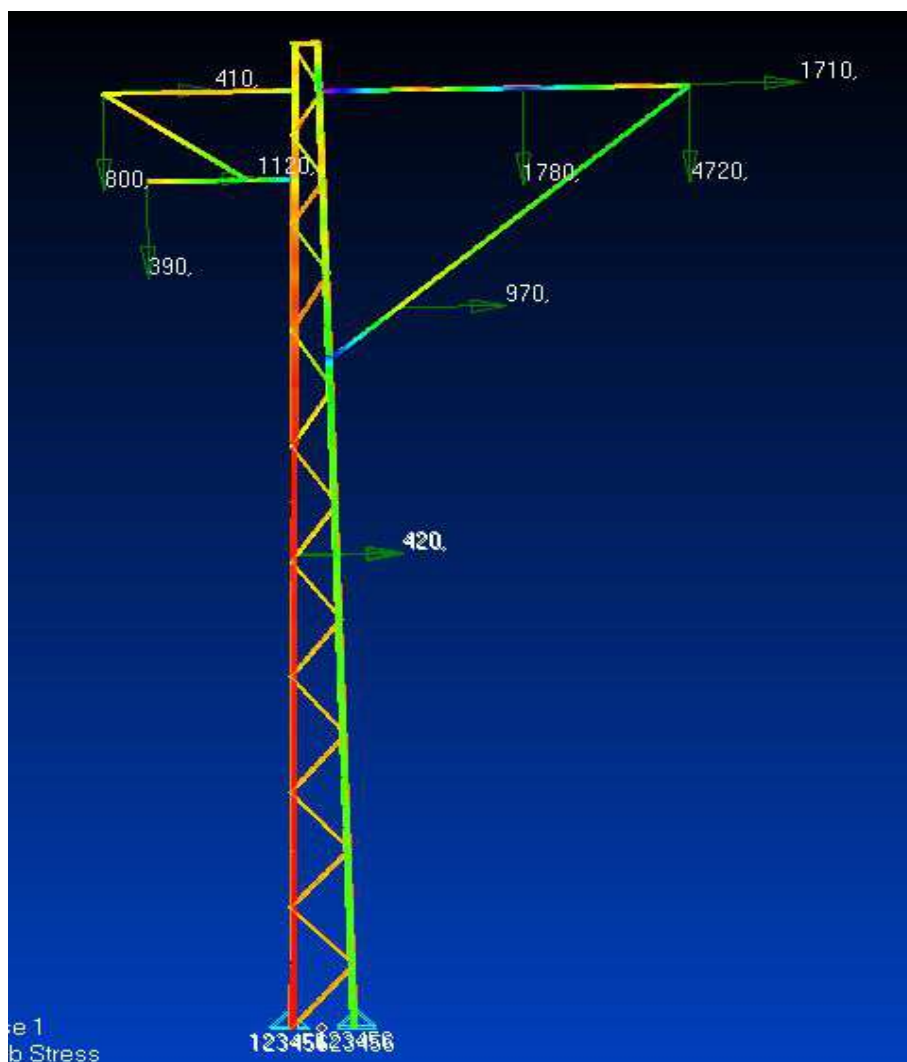


Рисунок 5 – Общий вид конечно-элементной модели

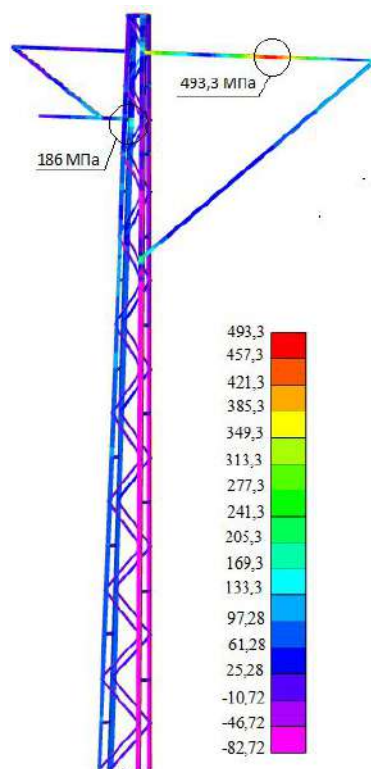


Рисунок 6 – Максимальное нормальное напряжение, МПа

В ходе анализа расчетной модели, представленной рисунком 6, можно заключить, что максимальное значение нормального напряжения в несущей конструкции составляет 187 МПа (напряжение 493 МПа, возникающее в консоли, не учитываем). Предел прочности σ_b стали 09Г2С составляет 430 МПа, таким образом, условие прочности (1) выполняется.

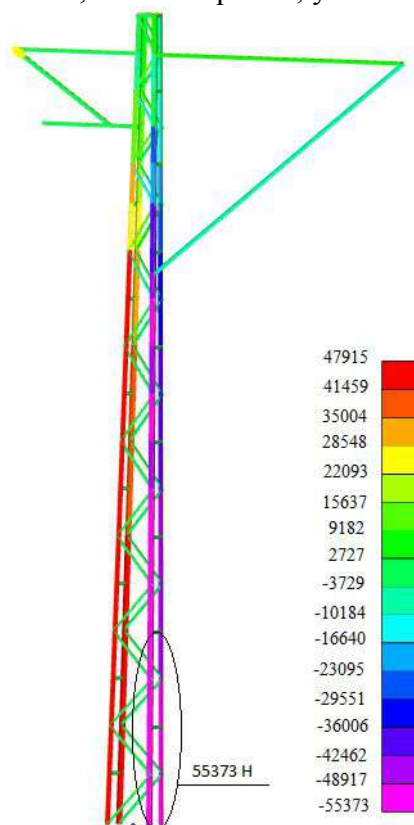


Рисунок 7 – Продольная сила в стержнях опоры, Н

Из рисунка 7 видно, что максимальное значение сжимающей силы составляет 55373 Н и приходится на нижние стержни опоры. Определим критическую силу потери устойчивости сжатого стержня по формуле Эйлера:

$$N_{кр} = \frac{k\pi^2 EI_{\min}}{l^2}, \quad (3)$$

где k – коэффициент, учитывающий опорные условия;

E – модуль упругости материала, МПа;

$I_{\min}$ – минимальный момент инерции сечения, мм⁴;

l – длина стержня, мм.

Коэффициент k принимаем равным 1, что соответствует шарнирным опорам стержня. Допущение о том, что стержень установлен на шарнирах, идет в увеличение запаса устойчивости и поэтому считается приемлемым.

Момент инерции сечения берем по сортаменту для уголков стальных горячекатаных равнополочных. Следует брать минимальное значение момента инерции, т. е. относительно диагональной оси v , как показано на рисунке 8.

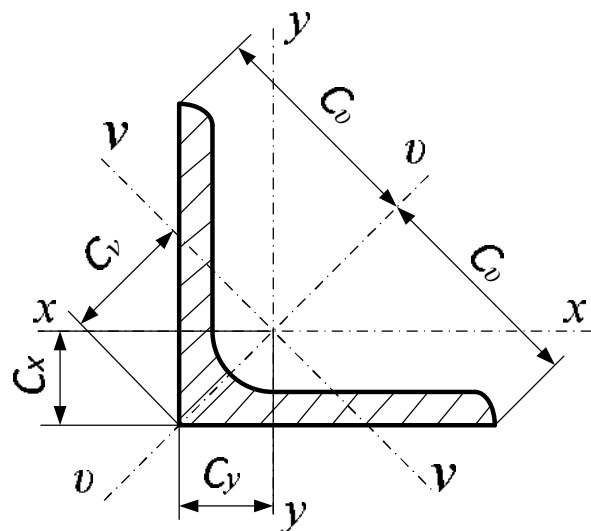


Рисунок 8 – Поперечное сечение стержня

Для уголка сортамента 60×60×5
 $I_{\min} = 8,03 \cdot 10^4 \text{ мм}^4$.

Длина стержня l составляет 650 мм.

В соответствии с формулой (3) значение критической силы для нижнего стержня

$$N_{кр} = \frac{1 \cdot 3,14^2 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 8,03 \cdot 10^8}{650^2} = 3,9 \cdot 10^5 \text{ Н} \\ = 390 \text{ кН.}$$

Условие устойчивости сжатого стержня (2) также выполняется.

Таким образом, смоделированная и рассчитанная опора М6/10 соответствует двум условиям по оценке несущей способности – (1) и (2) ферменной конструкции, а значит, при номинальном изгибающем моменте является устойчивой конструкцией, которая спо-

собна воспринимать заданные механические нагрузки. Наибольшая продольная сила возникает в нижней части конструкции, поэтому в первую очередь при визуальном осмотре опоры необходимо уделять внимание состоянию части опоры, которая находится в месте условного обреза фундамента. Исходя из результатов расчетов конструкция данной опоры имеет запас по несущей способности в пределах 20 – 30 % относительно технических условий по проектированию опор контактной сети.[3].

Список литературы

1. Худоногов, И. А. Мониторинг электрооборудования тяговых подстанций [Текст]/ И. А. Худоногов, А. Г. Туйгунова // Транспортная инфраструктура сибирского региона: Материалы всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием: В 2 т. / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2016. – Т. 1. – С. 645 – 648.
2. Ступицкий, В. П. Проектирование контактной сети [Текст]/ В. П. Ступицкий / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2010. – 63 с.
3. Указания по техническому обслуживанию и ремонту опорных конструкций контактной сети № К-146-08 [Текст]. – М.: Транспорт, 2008. – 120 с.
4. Ерохин, Е. А. Устройство, эксплуатация и техническое обслуживание контактной сети и воздушных линий [Текст] / Е. А. Ерохин / УМЦЖДТ. – М., 2007. – 404 с.

5. Чекулаев, В. Е. Повышение надежности работы контактной сети и воздушных линий [Текст]/ В. Е. Чекулаев, А. И. Зайцев. – М.: Транспорт, 1992. – 128 с.
6. Горошков, Ю. И. Контактная сеть [Текст]/ Ю. И. Горошков, Н. А. Бондарев. – М.: Транспорт, 2011. – 400 с.
7. Беляев, И. А. Устройства контактной сети на зарубежных дорогах [Текст]/ И. А. Беляев. – М.: Транспорт, 1991. – 192 с.
8. Кудрявцев, А. А. Несущая способность опорных конструкций контактной сети [Текст]/ А. А. Кудрявцев. – М.: Транспорт, 1988. – 160 с.
9. Фрайфельд, А. В. Проектирование контактной сети [Текст]/ А. В. Фрайфельд. – М.: Транспорт, 2014. – 328 с.
10. Михеев, В. П. Контактные сети и линии электропередачи: Учебник [Текст]/ В. П. Михеев. – М.: Транспорт, 2006. – 415 с.
11. Воронин, А. В. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст]/ А. В. Воронин. – М.: Транспорт, 2010. – 296 с.

References

1. Khudonogov I.A., Tuigunova A.G. Monitoring of electric equipment of traction substations [Monitoring elektrooborudovaniia tiagovykh podstantsii]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Transportnaia infrastruktura sibirskogo regiona»* (Proceedings of the all-Russian scientific and practical conference with international participation «Transport infrastructure of the Siberian region»). Irkutsk, 2016, Volume 1. Pp. 645-648.
2. Stupitskiy V.P. *Proektirovanie kontaktnoi seti* (Design of a contact network). Irkutsk: ISTU Publ., 2010. 67 p.
3. *Ukazaniia po tekhnicheskomu obsluzhivaniu i remontu opornykh konstrukttsii kontaktnoi seti : № K-146-08* (Instructions for maintenance and repair of support structures of the contact network: № K-146-08). Ministry of railways Russian Federation, Department of electrification and power supply. Moscow: Transport Publ., 2008. 120 p.
4. Erokhin E.A. *Ustroistvo, ekspluatatsiia i tekhnicheskoe obsluzhivanie kontaktnoi seti i vozdushnykh linii* (Device, operation and maintenance of the contact network and air lines). Moscow: UMTS of education on railway transport, 2007. 404 p.
5. Chekulaev V.E., Zaitsev A.I. *Povyshenie nadezhnosti raboty kontaktnoi seti i vozdushnykh linii* (Improving the reliability of the contact network and air lines). Moscow: Transport Publ., 1992. 128 p.
6. Goroshkov Yu.I., Bondarev N.A. *Kontaktnaia set'* (Contact network.) Moscow: Transport Publ., 2011. 400 p.
7. Belyaev I.A. *Ustroistva kontaktnoi seti na zarubezhnykh dorogakh* (Contact network devices on foreign roads). Moscow: Transport Publ., 1991. – 192 p.
8. Kudriavtsev A.A. *Nesushchaia sposobnost' opornykh konstrukttsii kontaktnoi seti* (The bearing capacity of the supporting structures of the contact network). Moscow: Transport Publ., 1988. – 160 p.
9. Freifeld A.V. *Proektirovanie kontaktnoi seti* (Contact network design). Moscow: Transport Publ., 2014. 328 p.
10. Mikhayev V. P. *Kontaktnye seti i linii elektroperedachi: uchebnik dlia vuzov* (Contact networks and power lines: a textbook for universities). Moscow: Transport Publ., 2006, 415 p.
11. Voronin A.V. *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorog* (Electricity supply of electrified Railways). Moscow: Transport Publ., 2010. 296 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ступицкий Валерий Петрович

Иркутский государственный университет путей
сообщения (ИрГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Valerii Petrovich Stupitskiy

Irkutsk State Transport University (ISTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the de-
partment «Electrical Power Industry of Transport», ISTU.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

«Электроэнергетика транспорта», ИрГУПС.

Тел.: 8-950-144-16-87.

E-mail: doka\$vp@mail.ru

Худонов Игорь Анатольевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

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

Доктор технических наук, профессор кафедры «Электроэнергетика транспорта», ИрГУПС.

Тел.: 8-964-273-47-79.

E-mail: Hudonogovi@mail.ru

Тихомиров Владимир Александрович

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроэнергетика транспорта», ИрГУПС.

Тел.: 8-924-603-45-82.

E-mail: svat_irk@mail.ru

Лобанов Олег Викторович

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

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

Инженер кафедры «Электроэнергетика транспорта», ИрГУПС.

Тел.: 8-904-126-91-33.

E-mail: oleg.6965@mail.ru

Phone: 8-950-144-16-87.

E-mail: doka\$vp@mail.ru

Igor' Anatol'evish Khudonogov

Irkutsk State Transport University (ISTU).

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

Doctor of Technical Sciences, Professor of the department «Electrical Power Industry of Transport», ISTU.

Phone: 8-964-27-347-79.

E-mail: Hudonogovi@mail.ru

Vladimir Aleksandrovich Tikhomirov

Irkutsk State Transport University (ISTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor, Head of the department «Electrical Power Industry of Transport», ISTU.

Phone: 8-924-603-45-82.

E-mail: svat_irk@mail.ru

Oleg Viktorovich Lobanov

Irkutsk State Transport University (ISTU).

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

Engineer of the department «Electrical Power Industry of Transport», ISTU.

Phone: 8-904-126-91-33.

E-mail: oleg.6965@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Ступицкий, В. П. Определение остаточной несущей способности металлических конструкций контактной сети [Текст] / В. П. Ступицкий, И. А. Худонов и др. // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 3 (39). – С. 88 – 99.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Stupitskiy V. P., Khudonogov I. A., Tikhomirov V. A., Lobanov O. V. Determination of residual bearing capacity of metal structures of the contact network. Journal of Transsib Railway Studies, 2019, vol. 3, no. 39, pp. 88 – 99 (In Russian).

УДК 621.336.2

А. Н. Смердин, В. В. Томилов, В. М. Павлов

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

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗОЧНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТОКОПРИЕМНИКОВ МАГИСТРАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Аннотация. В статье изложены современные подходы к определению максимально допустимого длительного тока магистральных токоприемников на стоянке и в движении. Рассмотрены особенности методик, позволяющих достоверно учесть эксплуатационные факторы при проведении испытаний в лабораторных условиях. Описана математическая модель для исследования распределения токовой нагрузки в аварийном режиме обрыва токоведущего шунта.

Ключевые слова: токоприемник, испытания, температура нагрева, лабораторный комплекс, контактный провод, шунт, контактная вставка, тепловизор.

Alexander N. Smerdin, Valeriy V. Tomilov, Vyacheslav M. Pavlov
Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation,

IMPROVEMENT METHODS OF CHECKING OF ELECTRICAL DUTY INDICATORS OF ROLLING STOCKS PANTOGRAPHS

Abstract. The article outlines modern approaches to determining the maximum permissible continuous current of current collectors when stopping and in motion. The features of techniques that reliably take into account operational factors when conducting tests in laboratory conditions are considered. A mathematical model is given for studying the distribution of current load in emergency mode of breaking a current-carrying shunt.

Keywords: current collector, tests, heating temperature, laboratory complex, contact wire, shunt, contact strip, thermocam.

Современные условия эксплуатации электроподвижного состава характеризуются высокими требованиями к системе токосъема. Причина заключается в увеличении скоростей поездов и массы грузов, перевозимых грузовым подвижным составом.

Точка контакта провода с токоприемником постоянно меняет свое положение вдоль пути, что допускает значительное увеличение токовых нагрузок на контактный провод при движении электроподвижного состава.

Относительно токоприемника точка контакта перемещается в границах ширины полоза контактного провода. Достижение и превышение допустимых значений температуры контактных элементов при установившемся режиме обусловлено их естественной теплоотдачей. Специальных систем охлаждения полозов на существующих токоприемниках обычно не предусматривается.

Одной из основных причин нарушения теплового режима эксплуатации контактных элементов является неравномерность их нагрева [1, 2]. Равномерное распределение токовой нагрузки по контактным элементам полоза является сложной и важной задачей, а поиск технических решений по ее обеспечению является весьма актуальной задачей.

В Омском государственном университете путей сообщения (ОмГУПС) регулярно проводятся лабораторные исследовательские испытания магистральных токоприемников постоянного и переменного тока (рисунок 1) [3]. Целью испытаний является определение максимально допустимых значений длительного тока в режиме стоянки и при движении в соответствии с требованиями ГОСТ 32204-2013 [4].

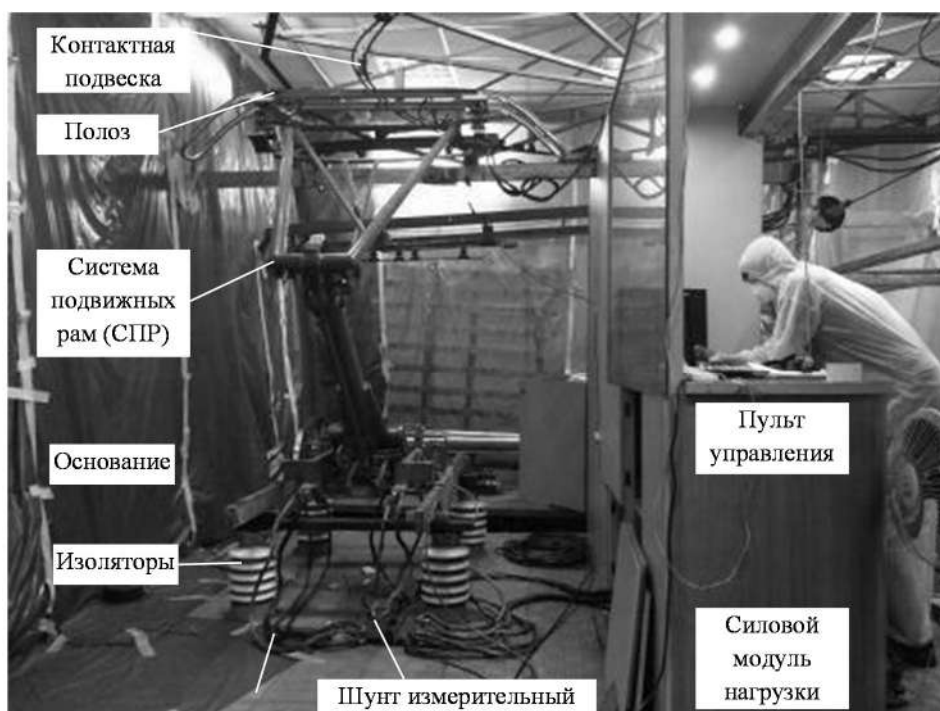


Рисунок 1 – Комплекс ОмГУПС для исследования устройств токосъема

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Рост энергетических показателей электроподвижного состава (ЭПС) за последние 10 лет обусловил необходимость модернизации комплекса для исследования устройств токосъема [5]. Изменение нагрузочной способности комплекса для испытания токоприемников (рисунок 2) подтверждается документами, выданными Государственным региональным центром стандартизации, метрологии и испытаний в Омской области. Имеющийся запас нагрузочной способности по току комплекса позволяет проводить испытания токоприемников, рассчитанных на ток до 4000 А.

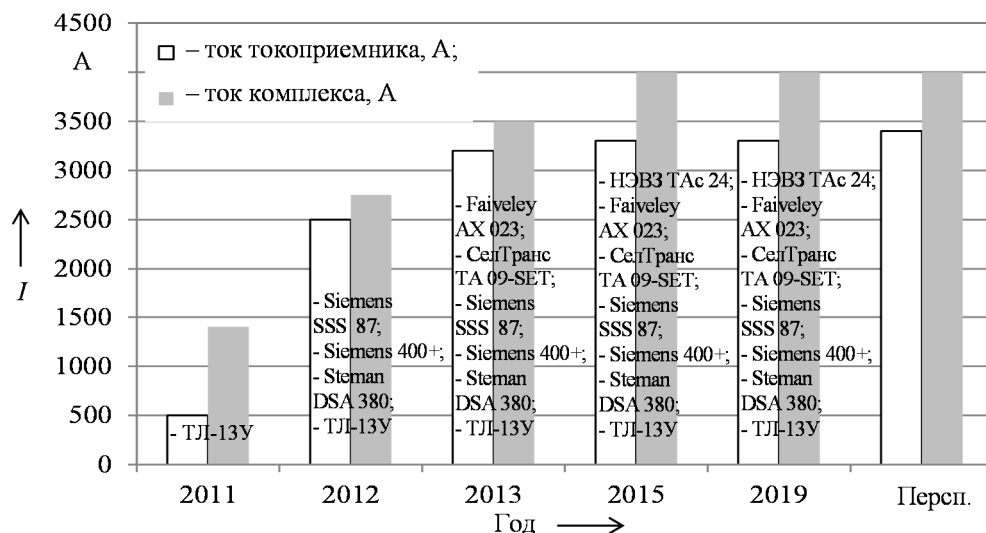


Рисунок 2 – Изменение допустимой токовой нагрузки испытательного комплекса ОмГУПС

Контроль за показателями окружающей среды осуществляется непрерывно в соответствии со стандартом [4]. Применяемые средства измерения – измерительные шунты, токовые клещи, тепловизоры, пирометры, термодатчики, тензометрические датчики и преобразователи напряжения, динамометры, тахогенератор, дифманометр-термоанемометр – также подвергаются периодической поверке [6].

Перед испытаниями токоприемники проходят контроль параметров и характеристик, после чего осуществляется приработка поверхности полозов на стенде в течение 30 мин без токовой нагрузки.

Согласно методике испытаний токоприемников в режиме стоянки активное нажатие установлено на минимальную величину 90 Н для токоприемника тяжелого типа и 70 Н – для легкого типа токоприемника. Токосъем осуществляется с поверхности одного контактного провода МФ-85 (рисунок 3).

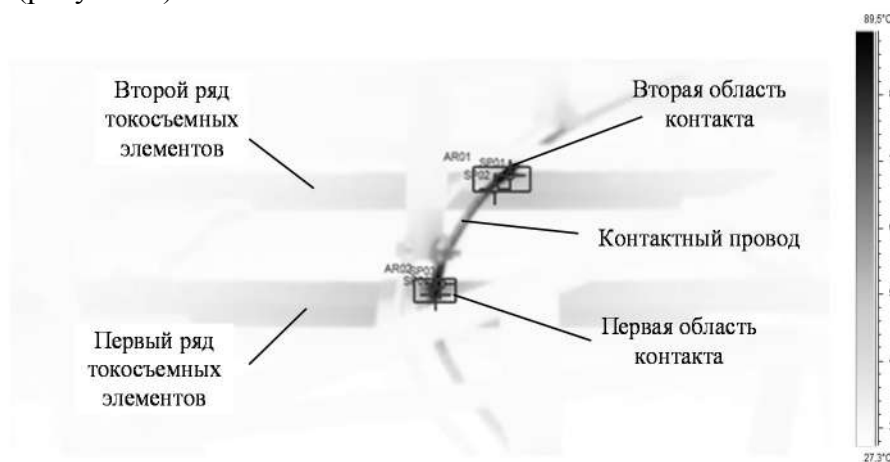


Рисунок 3 – Термограмма контактного провода и токосъемных элементов токоприемника при протекании тока 80 А в режиме стоянки

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Наибольшую температуру имеет точка контакта провода и токосъемных элементов токоприемника. Температура определялась с помощью стационарного и переносного тепловизоров с учетом степени черноты объектов [7]. Испытания завершаются после достижения установившегося режима, когда согласно стандарту [4] температура провода в течение 10 мин не увеличивается более чем на 2 °С. На рисунке 4 приведены графики нагрева контактного провода и токосъемных элементов токоприемника тяжелого типа с номинальным значением тока 200 А.

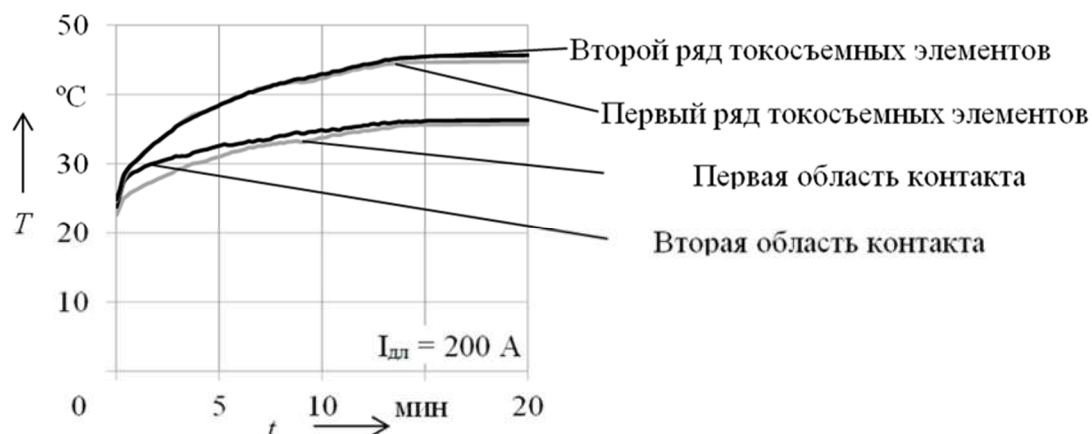


Рисунок 4 – Изменение температуры контактного провода и токосъемных элементов в точках контакта в режиме стоянки

Значение тока, протекающего в контакте, в течение эксперимента не должно изменяться более чем на 10 %. Полученные зависимости температуры контактного провода и токосъемных элементов токоприемника от снимаемого тока на стоянке указывают на имеющийся значительный резерв повышения допустимого значения тока (рисунок 5).

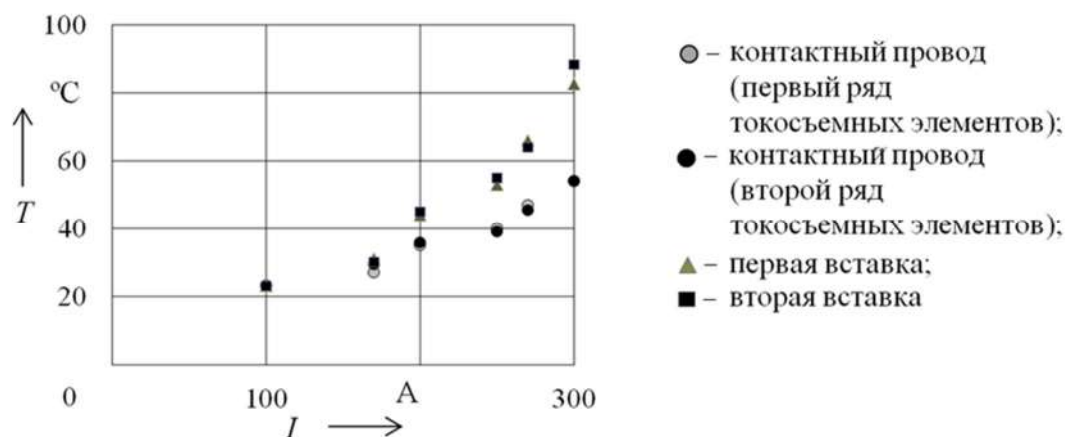


Рисунок 5 – Зависимость температуры нагрева контактного провода и контактных вставок токоприемников тяжелого типа от тока нагрузки в режиме стоянки

В ходе испытаний было установлено, что температура точек контакта переднего и заднего рядов токосъемных элементов с контактным проводом различается. Данное наблюдение позволило сделать предположение о неравномерном нажатии по рядам токосъемных элементов [8].

В свою очередь разница нажатия обусловлена конструкцией узлов подрессоривания. После остановки токоприемника первый ряд токосъемных элементов по ходу движения остается прижатым сильнее, что приводит к меньшему электрическому сопротивлению в зоне контакта, чем на втором ряду, прижатом меньше. Протекание тока по параллельным электрическим цепям вызывает выделение тепла большее там, где выше значение тока, что в свою очередь определяется различиями сопротивлений участков цепи. Измерение токов,

протекающих по шунтам, показало разницу в 54 А между первым и вторым полозами сразу после остановки токоприемника, первый полоз нагружен в 1,59 раза больше, чем второй.

Особенности токораспределения по рядам токосъемных элементов, выявленные в ходе расчетов и исследовательских испытаний [11, 12], необходимо учитывать при нормировании показателей назначения перспективных токоприемников, чтобы во время эксплуатации не произошло перегрузки контакта.

Наибольший интерес в ходе определения максимальных значений токовой нагрузки представляют собой испытания при движении со скоростью 40 – 60 км/ч [9].

Встречный воздушный поток обеспечивается аэродинамической установкой суммарной мощностью 32 кВт и кластером осевых вентиляторов, конфигурация которого определяется особенностями поля скоростей и давлений набегающего потока воздуха. Величина отклонений контактного провода в плане пути на комплексе соответствует эксплуатационным значениям и составляет $\pm 0,3$ м относительно центра полоза токоприемника.

Продолжительность каждого режима составляет не менее 20 мин с непрерывным контролем температуры тепловизором. Статическое нажатие в контакте устанавливается в соответствии со стандартом [4].

Для проверки нагрева тепловизор устанавливается таким образом, чтобы были видны поверхности полозов (рисунок 6). Для оценки распределения температуры нагрева вдоль полозов на термограммах выделяются площадки шириной 30 мм, средняя температура каждой из них регистрируется в течение всего эксперимента.

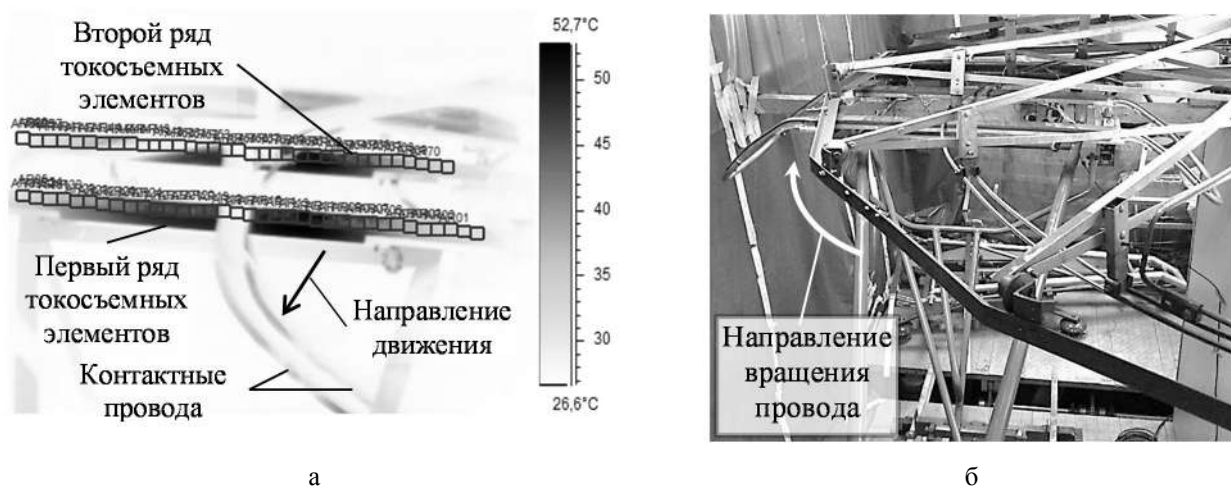


Рисунок 6 – Термограмма (а) и внешний вид (б) полозов токоприемника тяжелого типа, установленного на испытательном стенде

Непрерывный контроль полоза токоприемника сверху – одно из значительных преимуществ комплекса ОмГУПС для исследования устройств токосъема, имитирующего токосъем с контактного провода. При испытаниях на действующей линии или испытательном полигоне установка тепловизора может быть осуществлена на крыше ЭПС без возможности оценки верхней части полоза. В мировой практике оценка температуры поверхности полозов осуществляется на стационарном посту в момент прохода электровоза мимо него [10].

В соответствии с зависимостями, приведенными на рисунке 7, распределение температуры нагрева первого и второго рядов токосъемных элементов неравномерное. Первый ряд нагревается сильнее, кроме того, заметно неравномерное распределение температуры вдоль полозов. Максимумы нагрева обусловлены ухудшением скользящего контакта при прохождении «жестких точек» на токопроводе стенда.

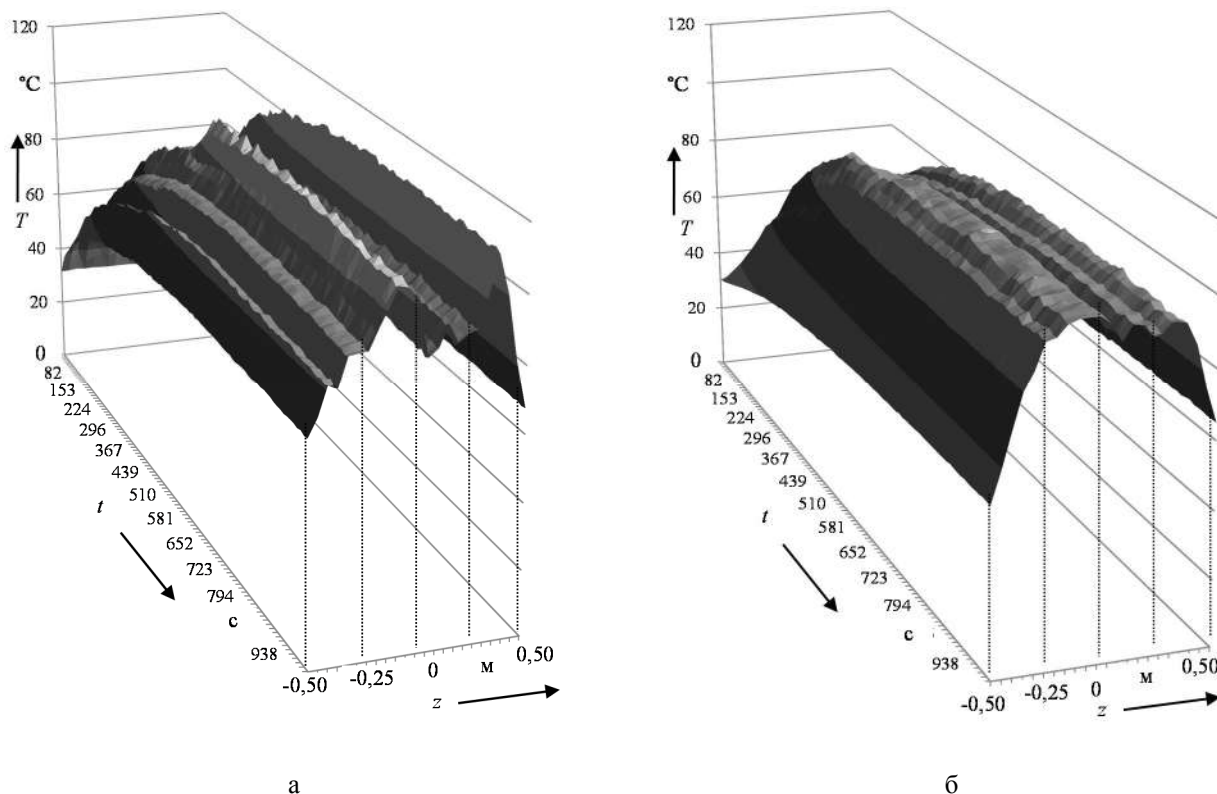


Рисунок 7 – Зависимость нагрева полозов токоприемника тяжелого типа при сьеме тока 3300 А:
а – первый по ходу движения полоз; б – второй полоз

Наиболее нагретая площадка (рисунок 6, а) согласно стандартной методике [4] определяет наибольшую температуру полоза. Графики достижения установившегося значения температуры для токоприемников тяжелого типа имеют вид показательной функции (рисунок 8), что свидетельствует о стабильности токовой нагрузки и параметров окружающей среды в ходе эксперимента.

Распределение температуры по рядам токосъемных элементов в установившемся режиме для максимальных значений тока приведено на рисунке 9. Анализ показал, что на поверхностях полозов имеются точки, температура которых значительно выше средних значений. Сглаживание экстремумов путем обеспечения качественного токосъема, постоянства контактного нажатия, равноэластичности подвески и других нормативных показателей в части регулировки позволит увеличить нагрузочную способность токоприемника без внесения значительных изменений в конструкцию.

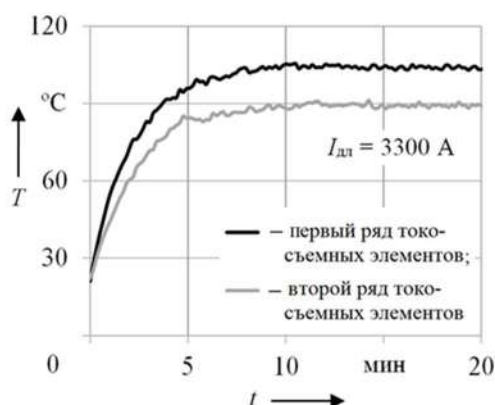


Рисунок 8 – Зависимости нагрева токосъемных элементов токоприемников тяжелого типа от времени нагрева

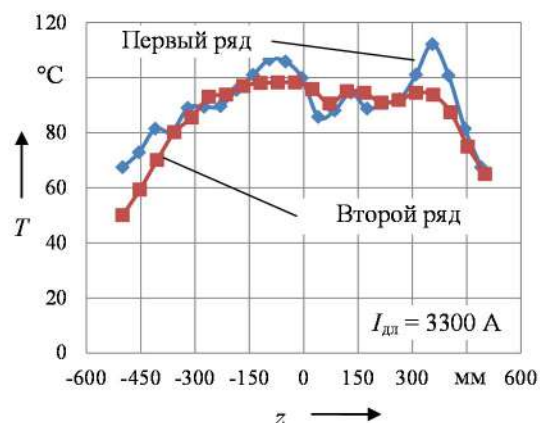


Рисунок 9 – Распределение нагрева вдоль полозов токоприемников тяжелого типа в установившемся режиме

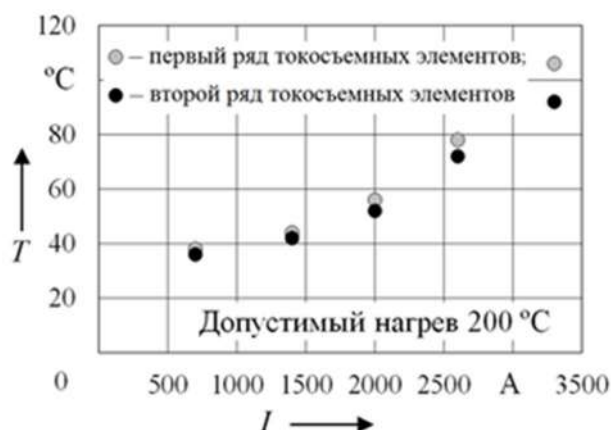
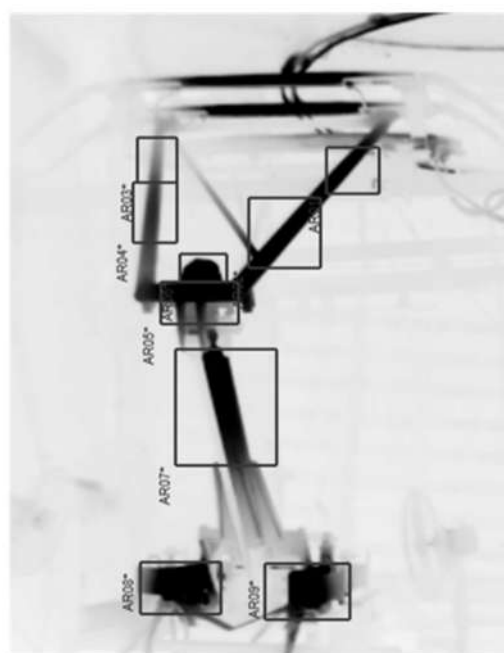


Рисунок 10 – Зависимость нагрева контактных вставок от тока нагрузки в режиме движения

При увеличении тока нагрузки температура токосъемных элементов нелинейно увеличивается (рисунок 10). При этом благодаря обдуву набегающим потоком воздуха даже при максимальной силе тока температура не превышает допустимых значений.

Измерение температуры элементов системы подвижных рам (СПР) осуществляется также непрерывно тепловизором, направленным на токоприемник спереди, как показано на рисунке 11. В кадр должна попадать вся конструкция: от основания до полозов.

На термограммах выделяются области с отдельными элементами, температура которых фиксируется в ходе эксперимента.



а



б

Рисунок 11 – Термограмма (а) и внешний вид (б) токоприемника тяжелого типа на стенде при оценке нагрева элементов системы подвижных рам и основания

По результатам испытаний установлено, что наибольшую температуру в установившемся режиме имеют рычаги системы подвижных рам (температура от 74 до 90 °C) (рисунок 12, а, б), токопроводящие шунты (рисунок 12, в), основание (до 120 °C) (рисунок 12, г), что свидетельствует о важности контроля нагрева в эксплуатации.

Особый интерес вызывает возможность имитации на стенде аварийных режимов работы токоприемника, когда в результате обрыва соединительных шунтов между полозами и системой подвижных рам токовая нагрузка перераспределяется (рисунок 13).

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

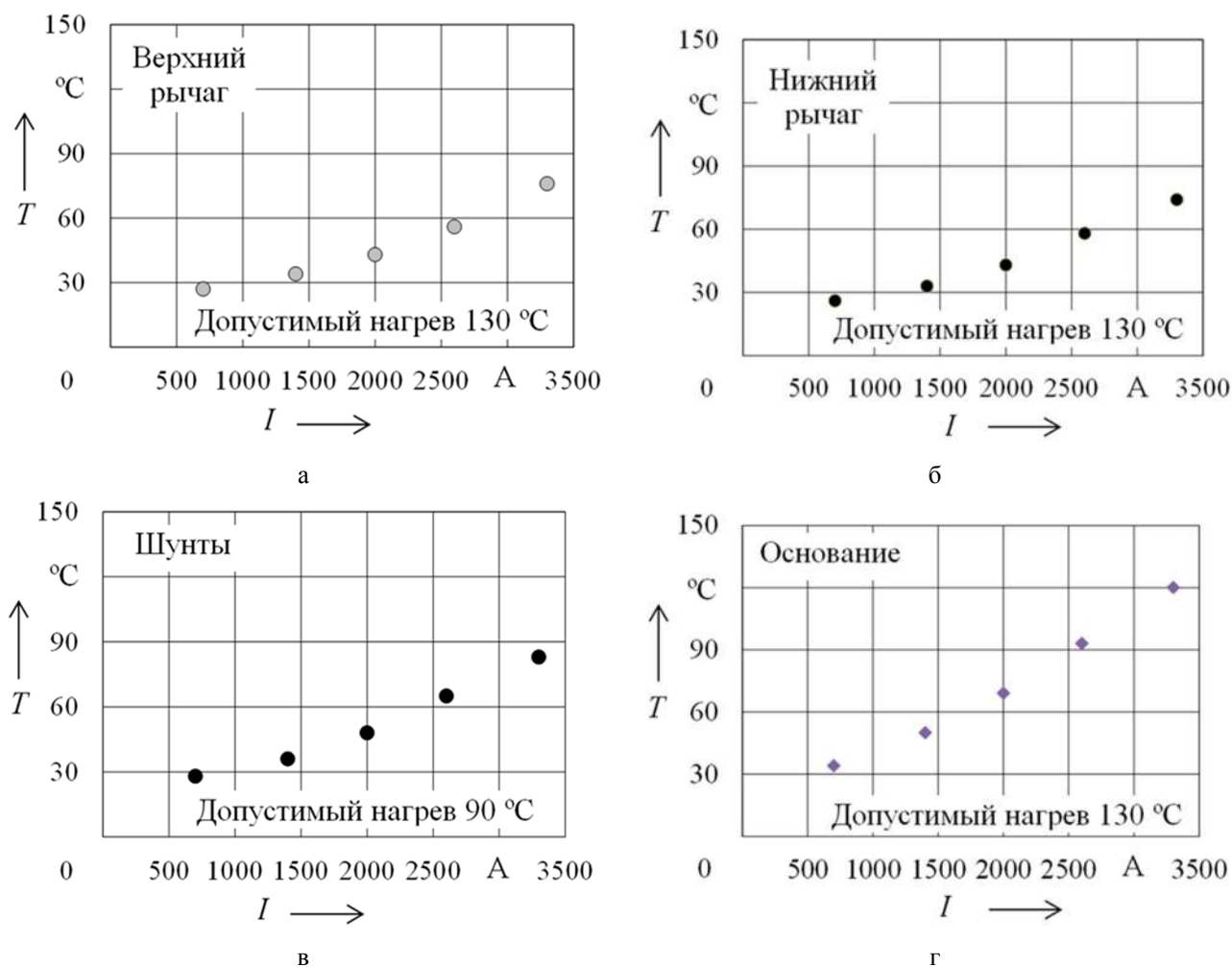


Рисунок 12 – Температуры элементов системы подвижных рам токоприемника

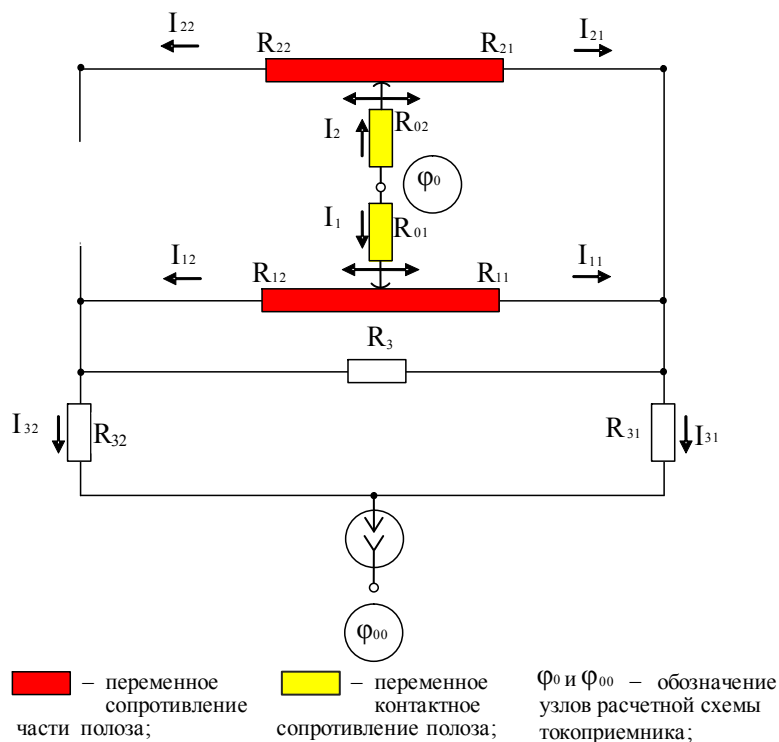


Рисунок 13 – Упрощенная расчетная схема полоза токоприемника с обрывом шунта

Распределение тока по полозам токоприемника (см. рисунок 13) с учетом изменяющихся значений сопротивления плеч полозов (рисунок 14) определяется выражением

$$R_m = R_{12} + R_{11}. \quad (1)$$

В свою очередь

$$R_1 = \frac{R_m}{2} - \frac{R_m}{l_{\text{вставки}}} \cdot z_{\text{max}} \cdot \omega \cdot \sin(\omega t); \quad (2)$$

$$R_2 = \frac{R_m}{2} + \frac{R_m}{l_{\text{вставки}}} \cdot z_{\text{max}} \cdot \omega \cdot \sin(\omega t). \quad (3)$$

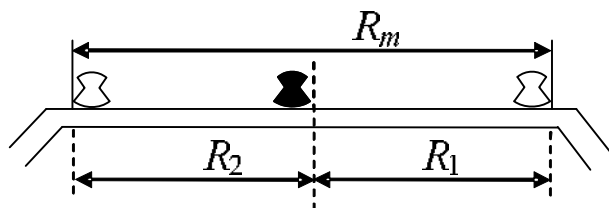


Рисунок 14 – Изменение сопротивлений плеч полоза токоприемника

При обрыве шунта сопротивление левого плеча R_2 равно бесконечности (см. рисунок 13). При положении контактного провода вблизи этого шунта сопротивление полоза максимальное и равно R_m .

Результаты расчетов на представленной модели, выполненные для токоприемника тяжелого типа, были подтверждены экспериментальными исследованиями в лаборатории, расхождение значений температуры токоведущих частей в режиме «обрыва» одного из четырех шунтов не превысило 5 %. Распределение тока 2800 А по полозам показало, что первый ряд токосъемных элементов нагружен током в данном режиме почти в два раза больше, чем второй.

Отмечено, что перераспределение тягового тока произошло пропорционально сечению оставшихся шунтов, что привело к повышенному нагреву одного из рядов токосъемных элементов, что является фактором риска для работоспособности токоприемников.

На основании проведенных исследований предлагается учесть выявленные особенности работы токоприемников при разработке технических условий на новые изделия и при обновлении эксплуатационной документации на электроподвижной состав.

При подготовке новых редакций отраслевых, национальных и межгосударственных стандартов на токоприемники электроподвижного состава методики проверки и подтверждения показателей назначения (допустимого длительного тока в движении и на стоянке) рекомендуется усовершенствовать за счет введения контроля распределения нажатия и температуры поверхностей по полозам, а также отметить, что испытания по определению нагрузочной способности целесообразно проводить в лабораторных условиях. Омский государственный университет путей сообщения располагает необходимым оборудованием и персоналом для проведения таких работ.

Список литературы

1. Сидоров, О. А. Исследование температуры нагрева полоза токоприемника и способы ее снижения [Текст] / О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, В. В. Томилов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, – 2017. – № 4 (32). – С. 25 – 34.
2. Увеличение нагрузочной способности токоприемников [Текст] / И. А. Беляев, Е. А. Вологин и др. // Железнодорожный транспорт. – 1974. – № 8. – С. 51 – 54.
3. Проверка токовой нагрузочной способности токоприемников ТАС 24 и ЛАС 25 [Текст] / В. М. Павлов, П. В. Попов и др. // Вестник Всероссийского науч.-исследоват. и проектно-

конструкторского ин-та электровозостроения / ВЭлНИИ. – Новочеркасск. – 2015. – № 2 (70). – С. 33 – 43.

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

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

6. Сидоров, О. А. Применение рациональных методик оценки качества токосъема магистральных электрических железных дорог [Текст] / О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, В. А. Жданов // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2011. – № 1 (28). – С. 70 – 76.

7. Исследования токовой нагрузочной способности токоприемника магистрального электроподвижного состава [Текст] / В. М. Павлов, О. А. Сидоров и др. // Вестник науч.-исследоват. ин-та ж.-д. транспорта / ВНИИЖТ. – М. – 2015. – № 4. – С. 19 – 24.

8. Повышение нагрузочной способности комплекса для исследования устройств токосъема [Текст] / В. В. Томилов, А. В. Рыжков и др. // Naukowa myśl informacyjnej powieki – 2015: Materiały XI Międzynarodowej naukowo-raktycznej konferencji. Volume 14. Matematyka. Fizyka. Budownictwo i architektura. Nowoczesne informacyjne technologie. Techniczne nauki / Nauka i studia. Przemysł. – 2015. – P. 64 – 66.

9. Ецков, Т. А. Исследование кинематической схемы асимметричного токоприемника с фиксированным шарниром нижней тяги на основании [Текст] / Т. А. Ецков // Вестник Всероссийского науч.-исследоват. и проектно-конструкторского ин-та электровозостроения / ВЭлНИИ. – Новочеркасск. – 2014. – № 2 (68). – С. 48 – 59.

10. Тюрнин, П. Г. Экспериментальное определение токовой нагрузочной способности токоприемника [Текст] / П. Г. Тюрнин, Н. В. Миронос, М. Н. Изергина // Токосъем и тяговое электроснабжение при высокоскоростном движении на постоянном токе. – М.: Интекст, 2010. – С. 138 – 144.

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

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

References

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

2. Belyaev I. A., Volodin E. A., Kuptsov Yu. E. et al. Increasing the load capacity of current collectors [Uvelicheniye nagruzochnoy sposobnosti tokopriyemnikov]. *Zheleznodorozhnyy transport – The journal of Railway Transport*, 1974. no. 8. pp. 51 – 54.

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

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

5. Sidorov O. A., Smerdin A. N. Improvement of methods of tests of catenaries and pantographs [Sovershenstvovanie metodov ispytaniy kontaktnykh podvesok i tokopriemnikov]. *Railway Transport Journal*, 2010, no. 11, pp. 72 – 74.
6. Sidorov O. A., Smerdin A. N., Zhdanov V. A. Application of rational methods for assessing the quality of current collection of main electric railways [Primeneniye ratsional'nykh metodik otsenki kachestva tokos'yema magistral'nykh elektricheskikh zheleznnykh dorog]. *Transport Urala – Transport of the Urals Journal*. – Yekaterinburg. – 2011. no. 1 (28). pp. 70 – 76.
7. Pavlov V. M., Sidorov O. A., Smerdin A. N., Golubkov A. S., Tartynskiy D. V., Tomilov V. V. Current-Loading Capacity Investigations of Current Collector Operated with Mainline Electric Motive Power [Issledovaniya tokovoi nagruzochnoi sposobnosti tokopriemnika magistral'nogo elektropodvizhnogo sostava], *Vestnik of the Railway Research Institute*, 2015, no 4, pp. 19 – 24.
8. Tomilov V. V., Ryzhkov A. V. et al. Increasing the load capacity of the complex for the study of current collection devices [Povysheniye nagruzochnoy sposobnosti kompleksa dlya issledovaniya ustroystv tokos'yema]. *Naukova mysl informatsiynej powieki - 2015: Materialy XI Międzynarodowej naukowi-raktycznej konferencji*. vol. 14. Matematyka. Fizyka. Budownictwo i architektura. Nowoczesne informacyjne technologie. Techniczne nauki. / Nauka i studia. Przemyśl. 2015. pp. 64 – 66.
9. Yetskov T. A. Investigation of the kinematic scheme of an asymmetric current collector with a fixed lower link hinge based on [Issledovaniye kinematicheskoy skhemy asimmetrichnogo tokopriemnika s fiksirovannym sharnirom nizhney tyagi na osnovanii]/ *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo i proyektno-konstruktorskogo instituta elektrovostroyeniya – Bulletin of the All-Russian Research and Design Institute of Electric Locomotive*. - Novocherkassk, 2014. – no. 2 (68). pp. 48 – 59.
10. Tyurnin P. G., Mironos N. V., Izergina M. N. Experimental determination of the current load capacity of the current collector [Eksperimental'noye opredeleniye tokovoy nagruzochnoy sposobnosti tokopriemnika]. *V sbornike: Tokos'yem i tyagovoye elektrosnabzheniye pri vysokoskorostnom dvizhenii na postoyannom toke – In the collection: Current collection and traction power supply during high-speed DC motion*. 2010. pp. 138 – 144.
11. Pararin A. V., Yefimov D. A. Calculation of current distribution in contact wire and current collector runner at current pickup [Raschet raspredeleniya toka v kontaktnom provode i poloze tokopriemnika pri tokos'yeme]. *Scientific-technical journal «Transport Urala»*, 2009, no. 4 (23), pp. 81 – 84.
12. Pararin A. V. Mathematical modeling of thermal processes at interaction of a current collector and a contact wire [Matematicheskoe modelirovaniye teplovykh protsessov pri vzaimodeistvii tokopriemnika i kontaktnogo provoda]. *Scientific-technical journal «Transport Urala»*, 2009, no. 4 (23), pp. 85 – 88.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Смердин Александр Николаевич

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 (904) 588-40-48.

E-mail: alexandr.smerdin@omgups.com

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Smerdin Alexander Nikolaevich

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 (904) 588-40-48.

E-mail: alexandr.smerdin@omgups.com

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

Павлов Вячеслав Михайлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая и прикладная механика», ОмГУПС

Тел.: (3812) 31-34-67.

E-mail: pavlovvm@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

Pavlov Vyacheslav Mihajlovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Theoretical and applied mechanics », OSTU.

Phone: (3812) 31-34-67.

E-mail: pavlovvm@omgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Смердин, А. Н. Совершенствование методики определения нагрузочных показателей токоприемников магистрального электроподвижного состава [Текст] / А. Н. Смердин, В. В. Томилов, В. М. Павлов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск – 2019. – № 3 (39). – С. 99 – 110.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Smerdin A. N., Tomilov V. V., Pavlov V. M. Improvement methods of checking of electrical duty indicators of rolling stocks pantographs. Journal of Transsib Railway Studies, 2019, vol. 3, no. 39, pp. 99 – 110 (In Russian).

УДК 656.225:004.003.12

Н. А. Клычева, Е. С. Прокофьева

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

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ В ОБЛАСТИ ГРУЗОВЫХ ПЕРЕВОЗОК

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы совершенствования модели взаимодействия с клиентами посредством внедрения проектов цифровизации в сферу организации грузовых железнодорожных перевозок, описаны изменения основных функций подразделений компании и технологические аспекты их деятельности. Определены технологические и экономический эффекты от разработки и внедрения проектов цифровизации грузовых перевозок на примере проекта совершенствования цифровой платформы взаимодействия с клиентами. Проработана модель внедрения CRM-системы цифровизации транспортных услуг и определены инвестиции по ее разработке и внедрению. Рассмотрены основные категории рисков с наибольшим непосредственным влиянием на эффективность реализации новой модели взаимоотношений с клиентами. Цифровая платформа взаимодействия с клиентом позволяет осуществить заказ услуги перевозки грузов железнодорожным транспортом без каких-либо дополнительных финансовых и технологических нагрузок, связанных с получением квалифицированной электронной подписи, упростить организацию договорной работы, связанную с получением услуг и расчетов за них.

Ключевые слова: цифровизация, транспорт, грузовые перевозки, CRM-система, клиентоориентированность, эффективность, риски, надежность, загрузка инфраструктуры.

Natalia A. Klycheva, Evgenia S. Prokofieva

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

EFFICIENCY OF DIGITAL MODELS IMPLEMENTATION IN THE FIELD OF FREIGHT TRANSPORT

Abstract. *The article deals with the issues of improving the model of interaction with customers through the introduction of digitalization projects in the sphere of freight rail transport, describes the changes in the main functions of the company's divisions and technological aspects. The technological and economic effects of the development and implementation of freight transport digitalization projects on the example of improving the digital platform of interaction with customers are determined. The model of CRM-system implementation of transport services digitalization is worked out, investments on its development and implementation are defined. The main categories of risks with the greatest direct impact on the effectiveness of the new model implementation of interaction with customers are considered. The digital platform of interaction with the client allows to carry out the order of freight transportation service by rail without any additional financial and technological expenses connected with obtaining the qualified electronic signature, to simplify the organization of contractual work to obtain services and payments for them.*

Keywords: *digitalization, freight transportation, CRM-system, customer orientation, efficiency, risk, reliability, infrastructure occupation.*

Современный мир характеризуется стремительным изменением технологий. Очевидно, что данная тенденция будет сохраняться и в обозримом будущем, поэтому крайне важно использовать эту технологическую волну для развития уровня конкуренции в транспортной сфере.

Цифровые технологии уже давно являются частью нашей повседневной жизни. Для повышения конкурентоспособности транспортной отрасли необходимы концепция цифровой модели взаимодействия с клиентом и предложение существующим и потенциальным клиентам новых сервисов на её основе. Одним из ключевых направлений цифровизации и развития информационных технологий согласно Долгосрочной программе развития ОАО «РЖД» является создание единого информационного пространства грузовых перевозок и логистики для повышения доходности грузоперевозок и логистического бизнеса [1].

Эффективность производственной деятельности каждого участника перевозок обеспечивается за счет безусловного и качественного выполнения принятых перевозчиком и согласованных с владельцем инфраструктуры заявок на перевозки грузов, перемещение порожних вагонов (принадлежащих операторам и иным собственникам железнодорожного подвижного состава) с минимальными расходами, зависящими от объемов перевозок, на основе единой сквозной технологии организации перевозочного процесса. Сегодня холдинг «РЖД» активно идет в промышленную логистику, внедряет новые практики, эффективно избавляющие клиента от непрофильных проблем [2]. Более клиентоориентированным, а значит, успешным будет тот, кто сможет определить актуальные потребности клиента и своевременно реагировать на них, а также сумеет создать доверительную среду и партнерские взаимоотношения.

В соответствии с мировыми технологическими трендами цифровые технологии создают условия для изменения классических моделей ведения бизнеса и открывают новые возможности во всех направлениях деятельности, в том числе:

организация быстрого и простого доступа к услугам перевозки грузов (создание цифрового канала продаж и доступа к услугам через личный кабинет с использованием элементов искусственного интеллекта, отслеживание текущего статуса оказания услуги, онлайн-расчеты и получение финансово-расчетных документов и др.);

использование предиктивной аналитики клиентов, переход к формированию на основе потребностей клиентуры индивидуальных сервисов и услуг (создание цифрового конструктора индивидуального пакета услуг и сервисов);

формирование пакетных предложений и комплексных услуг с привлечением как предприятий холдинга РЖД, так и сторонних организаций, других видов транспорта (создание цифрового каталога услуг);

интеграция РЖД в логистику клиентов за счет совместного планирования отгрузки и перевозки продукции, доставка грузов в соответствии с потребностью производственного процесса клиентов (взаимодействие автоматизированных систем, при котором создается основа для осуществления сквозного планирования от момента формирования потребности клиента с дальнейшей организацией процесса перевозки до момента доставки в пункт назначения) [3].

Для реализации сквозной согласованной автоматизированной технологии необходимо создать единое информационное пространство транспортной отрасли, обеспечивающее взаимодействие автоматизированных систем всех участников перевозочного процесса: АСУ клиента, АСУ собственника, АСУ оператора и АСУ перевозчика (ОАО «РЖД») [4]. Широкое применение для автоматизации указанных процессов получают элементы искусственного интеллекта и технологии Big data.

Рассмотрим в качестве примера проект по внедрению и совершенствованию цифровой платформы взаимодействия с клиентами (CRM-системы) в области грузовых перевозок на железнодорожном транспорте для ОАО «РЖД».

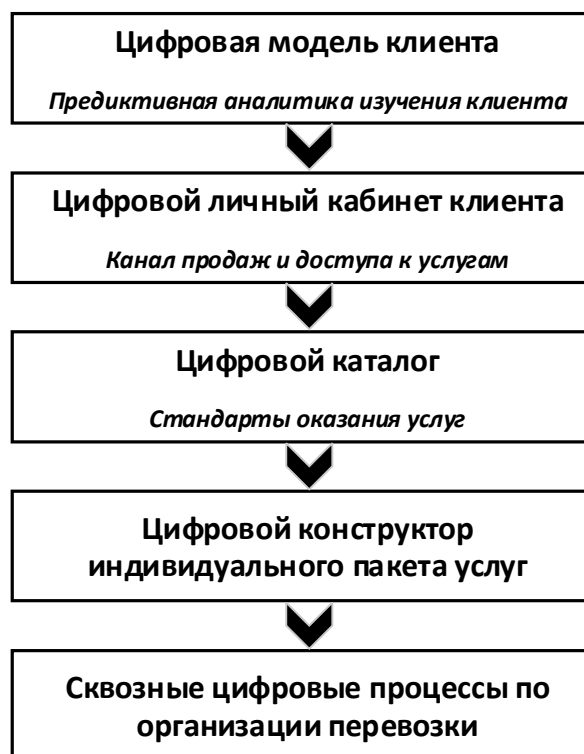
Для создания платформы необходимо выполнение следующих операций [5]:

- изучение приоритетных потребностей клиентов;
- проведение SWOT-анализа существующей системы взаимодействия с грузоотправителями/грузополучателями в компании;
- проведение совещания с клиентами и совместное рассмотрение их потребностей;
- оценка удовлетворенности клиентов информационным обслуживанием и документооборотом;
- benchmarking смежных отраслей и компаний;
- разработка концепции цифровой модели взаимодействия с клиентами;
- проработка цифровой модели обслуживания клиентов и продажи услуг компании;
- разработка требований к новым цифровым сервисам и синхронизация работ с планом реализации IT-проектов компании;
- выработка предложений для наполнения «Личного кабинета» на основе мнения клиентов и опыта других отраслей;
- определение необходимых изменений в нормативную документацию компании для создания юридической основы цифровой модели продажи услуг;
- подготовка проектов нормативных документов;
- составление новой карты процесса заключения договоров на транспортное обслуживание;
- оценка рисков при разработке и реализации проекта.

Цифровая модель предусматривает развитие сервиса оперативного получения и обработки обращений клиентов с прозрачной системой контроля реагирования на запросы подразделений компании. Создан действующий прототип данной системы, который позволяет оценивать эффективность работы хозяйств железной дороги и предприятий, отталкиваясь от мнения клиента. Задача создания прямого цифрового канала коммуникации между клиентом и компанией решается при создании действующего мобильного приложения.

Для крупных холдинговых компаний CRM-система предусматривает особый сервис, с помощью которого клиент имеет возможность планировать подвоз составов с грузом с учетом потребностей производственного процесса предприятия.

Принципиальная модель предлагаемой CRM-системы изображена на рисунке.



Модель цифровизации транспортных услуг

Создание CRM-системы предусматривает принципиально новый подход к суточному планированию погрузки с использованием оперативной информации о реальной грузовой базе и потребностях клиента, транслируемых через цифровой сервис. С использованием цифровых сервисов у клиента появляется возможность оперативной оценки уровня удовлетворенности оказанной услугой.

Переход на цифровую платформу взаимодействия с клиентом приведет к принципиальному изменению основных функции подразделений компании и их технологии работы [6]:

- появление единых центров продаж, формирование пакетных услуг под индивидуальные потребности клиента через запросный сервис и цифровой калькулятор услуг;
- сокращение сроков заключения договоров на предоставление услуг компании в связи с переходом на полный электронный документооборот с использованием электронной цифровой подписи и реализацией принципа «один договор на всю сеть»;
- получение оперативной и актуальной информации о потребностях клиента через запросы в личном кабинете и реализации возможности суточного планирования;
- ускорение оборота вагона и повышение пропускной способности железнодорожной инфраструктуры в рамках реализации услуги «подвод поездов» и др.

Получение информации о потребностях клиента через мобильные цифровые каналы позволит создать систему оперативного реагирования на запросы и обращения, что может использоваться в качестве инструмента влияния на уровень лояльности клиента [7].

Внедрение любых технологий предусматривает вложение инвестиций. Для оценки эффективности инвестиционного проекта по внедрению CRM-системы основополагающими принципами выступают моделирование потоков, ресурсов и денежных средств по периодам, комплексный учет внешних и внутренних факторов реализации проекта, определение эффекта посредством сопоставления ожидаемых инвестиционных результатов и затрат.

Сумма первоначальных инвестиционных затрат на этапе Start up составит в целом по проекту 92,1 млн руб., из которых операционные затраты составляют 29,9 млн руб., капитальные затраты – 62,2 млн руб.

В результате проведенных расчетов сумма операционных расходов от увеличенного объема трафика на инфраструктуре ОАО «РЖД» составит 137,9 млн руб., сумма инвестиционных затрат в целом за период экономической жизни проекта по операционным статьям расходов – 2 064 млн руб., из которых 1 906 млн руб. составляют расходы на инфраструктуру ОАО «РЖД» (расходы от увеличенного объема трафика).

Доходная часть за период экономической жизни проекта составит 3 349 млн руб. Основным источником доходов проекта является увеличение погрузки грузов.

Расходная часть проекта за период экономической жизни проекта составит 2 317 млн руб., из которых операционные затраты составляют 2 064 млн руб., капитальные затраты – 253 млн руб. В 2019 г. сумма инвестиционных затрат при заявленных доходах без учета расходов на содержание инфраструктуры ОАО «РЖД» составила 92,1 млн руб.

Доналоговая прибыль (EBITDA) составляет 1 285 млн руб., чистая прибыль – 831,2 млн руб.

Дисконтированный свободный денежный поток (или чистая текущая стоимость инвестиций) к 2027 г. составит 426 млн руб., что является высоким уровнем ожидаемой величины денежных средств к получению по достижению горизонта планирования с учетом временно-го фактора после окупаемости его первоначальных инвестиционных затрат (первоначальные инвестиции до момента окупаемости составляют 92,1 млн руб.). Положительная динамика значения выступает гарантом того, что вызываемый инвестициями денежный поток в течение всей экономической жизни проекта превысит первоначальные вложения и обеспечит необходимый уровень доходности для увеличения стоимости.

Внутренняя норма доходности проекта (IRR) составляет 183 %, что характеризует высокий уровень рентабельности инвестиционного проекта, дисконтированный срок окупаемости проекта составляет 18 месяцев.

Расчет изменения величины перечисленных выше показателей в зависимости от изменения величины капитальных затрат приведен в таблице.

Расчет NPV показал экономическую целесообразность разработки и внедрения предлагаемой CRM-системы, так как сумма дисконтированных денежных потоков превысила сумму первоначальных затрат, что является необходимым условием эффективности.

Изменение экономических показателей под влиянием изменения величины капитальных затрат

Показатель	Величина показателей при изменении величины капитальных затрат				
Капитальные затраты (CAPEX), млн руб.	202,4	227,7	253,04	278,35	303,66
Чистая текущая стоимость (NPV), млн руб.	445	435	426	418	409
Внутренняя норма рентабельности (IRR), %	220	204	183	162	146
Индекс рентабельности (PI), %	174	171	168	165	162
Срок окупаемости проекта (PP), мес.	14	16	18	19	21

Индекс рентабельности инвестиций PI 1,7 что также говорит о целесообразности цифровизации транспортной отрасли. Внутренняя норма рентабельности превысила показатель расчетной ставки дисконтирования, т. е. показатель IRR превышает стоимость капитала, используемого для осуществления проектов цифровизации.

За счет реализации проектов цифровизации транспортной отрасли достигаются не только экономические эффекты, но и не менее важные технологические [8]:

- снижение загрузки инфраструктуры, маневренности станций и полигонов сети железных дорог;

- снижение числа временно отставленных от движения поездов;

- снижение объема маневровой работы и переработки вагонов на станциях;

- повышение надежности выполнения обязательств по доставке грузов и порожних вагонов, снижение штрафов за просрочку доставки;

снижение простоя вагонов в ожидании распоряжения отправителя и др.

Для современных логистических систем транспортировки грузов крайне важно четко оценивать время нахождения в пределах инфраструктуры вагонов по категориям вагонопотока для каждой элементарной струи [9]. Указанные технологические эффекты позволяют сократить потери компании в части недополучения средств из-за отказа приема груза к перевозке, а также потери доходов из-за просрочки доставки грузов и порожних вагонов.

Реализация цифровых услуг, таких как «подвод поездов», позволяет повысить эффективность разрабатываемых планов поездной работы и создает предпосылки для осуществления полномерного планирования, обеспечивающего большую технологическую обоснованность и достоверность с учетом инфраструктурных, тяговых и других ограничений.

В то же время, используя новые технологии, нельзя забывать о рисках, влияющих на эффективность реализации новой модели взаимоотношений с клиентами. Это могут быть технологические, инвестиционные, рыночные и управленческие риски.

Технологические риски связаны в первую очередь с существенными изменениями и бурным развитием технологий, цифровых инноваций за короткий временной лаг, в связи с чем работа существующих цифровых систем может привести к отставанию и, как следствие, к неспособности формирования в компании оперативного и качественного предложения на запросы клиентов. Вторым аспектом данного риска являются «враждебность», или несовместимость информационных систем, используемых клиентами и компанией, и влияние ки-беругроз с учетом существующей негативной общемировой тенденции [10].

Важными инструментами для нивелирования данной группы риска являются применение практики мониторинга и внедрения инноваций в сфере цифровых технологий, заключение долгосрочных договоров на сопровождение и модернизацию программного продукта.

Инвестиционные риски связаны с приоритетностью проблем в части первоочередного устранения существующих ограничений и «узких» барьерных мест в компании, таких как высокий износ основных средств, строительство новых и модернизация используемых железнодорожных линий соответственно, как результат – дефицит инвестиционных средств для своевременного направления на «цифровизацию» предложенной модели взаимоотношений с клиентами. С целью минимизации влияния рисков необходимо повышать управляемость инвестпроектов через разделение на этапность, формировать инвестиционный бюджет за счет резерва или внешних источников, применять новые технические решения для удешевления проектов.

В аспекте рыночных рисков существует вероятность изменения, как конъюнктуры рынка перевозок, так и роста конкуренции со стороны других видов транспорта. Меры, позволяющие исключить фактор влияния рыночных рисков, это прежде всего формирование взаимоотношений с клиентами на основе долгосрочных договоров, постоянное развитие и расширение комплексных услуг, работа над снижением стоимости через повышение внутренней эффективности компании, внедрение новых сервисов, в том числе в сотрудничестве с конкурентами (например, контейнерные перевозки).

Управленческие риски являются одними из ключевых. В настоящее время, с учетом вызовов, стоящих перед компаниями, управленческая структура должна соответствовать высоким требованиям с точки зрения наличия необходимых компетенций, и в то же время уметь гибко и своевременно реагировать на запросы внешней среды. Наличие задокументированной и сложной административной структуры в компании может привести к затягиванию процесса принятия необходимых управленческих решений как с точки зрения изменения функциональной структуры, так и самого процесса взаимодействия с клиентами.

Самыми продуктивными механизмами влияния на риски управленческого характера являются системная работа в части совершенствования и развития процедур управленческой структуры, применение практик управления на основе лучшего мирового опыта и формирование проектного подхода.

Внедрение CRM-системы и удобного цифрового интерфейса, взаимодействия с клиентом сегодня является необходимостью, а не конкурентным преимуществом. Создание удобных и доступных цифровых каналов взаимодействия компаний с клиентами, выстраивание цифровой модели продажи и формирования услуг грузовых перевозок должно кардинально изменить процессы продаж и обслуживания клиентов в транспортно-логистическом блоке.

Список литературы

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 19.03.2019 № 466-р «Об утверждении Долгосрочной программы развития ОАО «РЖД» до 2025 года» [Электронный ресурс]. – URL=http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_320741/ (Дата обращения: 21.06.2019).
2. Бородин, А. Ф. Проблемы комплексного развития железнодорожной инфраструктуры в припортовых транспортных узлах [Текст] / А. Ф. Бородин / Транспорт Российской Федерации. – 2017. – № 4 (71). – С. 45 – 50.
3. Дитрих, Е. Использование IT-систем обеспечит быстрое развитие цифровизации в сферах транспорта и логистики [Электронный ресурс] / Е. Дитрих. – URL=<http://www.vestnikstroy.ru> (Дата обращения: 21.06.2019).
4. Панин, В. Сквозная технология организации перевозочного процесса как инструмент снижения эксплуатационных расходов железных дорог [Текст] / В. В. Панин, Е. С. Прокофьева и др. // Труды IV науч.-техн. конф. «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование» / ОАО «НИИАС». – М., 2015. – С. 96 – 97.
5. Интегрированная система управления поездной работой объединенного полигона [Текст] / Т. А. Никитин, А. Ф. Бородин и др. / Железнодорожный транспорт. – Москва. – 2016. – № 6. – С. 38 – 44.
6. Тюрин, В. Семь факторов развития цифровых платформ [Электронный ресурс] / Тюрин, В. – URL=<http://www.pcweek.ru/idea/article/detail.php?ID=195765> (Дата обращения 21.06.2019).
7. Евневич, М. Клиентоориентированность в цифровой экономике [Текст] / М. Евневич // Современная конкуренция. – М. – 2017. – Т. 11. – № 5. – С. 65.
8. Прокофьева, Е. С. Экономические аспекты оценки производственной деятельности ОАО «РЖД» [Текст] / Е. С. Прокофьева, Н. А. Клычева // Молодежь и научно-технический прогресс: Сб. докл. XI междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых: В 4 т. / ООО «Ассистентплюс». – Губкин; Старый Оскол: – 2018. – Т. 2. – С. 610 – 613.
9. Черемисин, В. Т. Роль информационных технологий в обеспечении надежности локомотивов [Текст] / В. Т. Черемисин, И. В. Пустовой [Для современных логистических систем транспортировки грузов крайне важно четко оценивать время нахождения в пределах инфраструктуры вагонов по категориям вагонопотока для каждой элементарной струи] // Локомотив. – 2017. – № 9. – С. 2 – 4.
10. Гришин, А. Как цифровые технологии могут оптимизировать реализацию № 54-ФЗ на транспорте [Текст] / А. Гришин // Транспорт России. – 2019. – № 13.

References

1. *Rasporyazhenie Pravitelstva Rossiiskoi Federatsii* (Government order of the Russian Federation of 19.03.2019 No. 466-p «About the Approval of the Long-term Development Program of JSC «RZD» 2025»). URL=http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_320741/ (Revised: 21.06.2019)
2. Borodin A. F. Problems of Complex Development of Railway Infrastructure in the Port Transport Hubs [Problemi kompleksnogo razvitiya zeleznodorognoi infrastrukturi v priportovikh transportnikh uzлах]. *Transport Rossiiskoi Federatsii - Transport of the Russian Federation*. 2017. №. 4 (71). Pp. 45-50.

3. Ditrih, E. The Use of IT Systems will Ensure the Rapid Development of Digitalization in the Fields of Transport and Logistics [Ispol'zovanie IT-sistem obespechit bystroe razvitie tsifrovizatsii v sferakh transporta i logistiki] / Eugenij Ditrih. URL = <http://www.vestnikstroy.ru> (06.21.2019)

4. Panin V. V., Zalutsky M. I., Rubtsov D. V., Prokofieva E. S. End-to-end Technology of Organization of Transportation Process as a Tool to Reduce Operating Costs of Railways. [Skvoznaia tekhnologiya organizatsii perevoznochnogo protsessa kak instrument snizheniia ekspluatatsionnykh raskhodov zheleznnykh dorog]. *Trudy IV nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Intellektual'nye sistemy upravleniia na zheleznodorozhnom transporte. Komp'iuternoe i matematicheskoe modelirovanie»* (Proceedings of the IV Scientific and Technical Conference «Intelligent Control Systems for Railway Transport. Computer and Mathematical Modeling» (ISUZHT-2015)), Moscow, JSC «NIIAS», 2015, p. 96 – 97.

5. Nikitin, T.A. Integrated Train Operation Management System for the United Polygon. Nikitin, T.A., Borodin A.F. [Integrirovannaya sistema upravleniia poezdnoi rabotoi ob"edinennogo poligona]. *Zheleznodorozhnyi transport - Railway Transport*, 2016, № 6, pp. 38 – 44.

6. Tyurin, V. Seven Factors of Development of Digital Platforms V. Tyurin. [Sem' faktorov razvitiia tsifrovyykh platform] / URL = <http://www.pcweek.ru/idea/article/detail.php?ID=195765> (Revised: 21.06.2019).

7. Yevnevich, M. Klientoorientirovannost' v tsifrovoi ekonomike. M. Yevnevich [Customer Focus in the Digital Economy] // *Modern Competition*, 2017, Vol. 11, №5, p. 65.

8. Prokofieva, E.S., Economic Aspects of the Evaluation of the Production Activity of Russian Railways E.S. Prokofieva, N.A. Klycheva [Ekonomicheskie aspekty otsenki proizvodstvennoi deiatel'nosti OAO «RZhD»] / *Molodezh' i nauchno-tekhnicheskii progress: Sbornik dokladov XI mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh*. (Youth and Scientific and Technical Progress: Collection of Reports of the XI International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists). In 4 t. T. 2. Gubkin; Stary Oskol: OOO Assistantplus, 2018, pp. 610 – 613.

9. Cheremisin, V. T. The Role of Information Technology in Ensuring the Reliability of Locomotives. V. T. Cheremisin, I. V. Pustovoy [Rol' informatsionnykh tekhnologii v obespechenii nadezhnosti lokomotivov]. *Lokomotiv – The Locomotive*, 2017, № 9, pp. 2 – 4.

10. Grishin, A. How Digital Technologies can Optimize the Implementation № 54-FZ in Transport A. Grishin [Kak tsifrovyye tekhnologii mogut optimizirovat' realizatsiiu № 54-FZ na transporte]. *Vserossiiskaia ezhenedel'naia gazeta «Transport Rossii» – Russian Weekly Newspaper «Transport of Russia»*, 2019, № 13.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Клычева Наталья Александровна

Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ)).

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

Кандидат экономических наук, доцент кафедры «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы», РУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (495) 684-28-27.

E-mail: nalarkova@mail.ru

Прокофьева Евгения Сергеевна

Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ)).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой и безопасностью на транспорте», РУТ (МИИТ).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Klycheva Natalia Aleksandrovna

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).
9b9, Obrazcova st., Moscow, 127994, Russian Federation.

Ph. D. in Economics, Associate Professor of the department «Transport business management and intelligent systems», RUT (MIIT).

Phone: +7 (495) 681-28-27

E-mail: nalarkova@mail.ru

Prokofieva Evgenia Sergeevna

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).
9b9, Obrazcova st., Moscow, 127994, Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Operational and transport safety management», RUT (MIIT).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Клычева, Н. А. Эффективность внедрения цифровых моделей в области грузовых перевозок [Текст] / Н. А. Клычева, Е. С. Прокофьева // Известия Транссиба/ Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 3 (39). – С. 110 – 118.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Klycheva N. A., Prokofieva E. S. Efficiency of digital models implementation in the field of freight transport. Journal of Transsib Railway Studies, 2019, vol. 3, no. 39, pp. 110 – 118 (In Russian).

УДК 658.5: 656.259.12

М. М. Соколов

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

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ОТКАЗОВ В АППАРАТУРЕ РЕЛЕЙНОГО КОНЦА СТАЦИОННОЙ РЕЛЬСОВОЙ ЦЕПИ ТОНАЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ

Аннотация. В статье описана возможность использования алгоритмов диагностирования для снижения времени поиска и устранения повреждений применительно к конкретной задаче поиска повреждения в аппаратуре релейного конца станционной тональной рельсовой цепи. Целью работы является обоснования необходимости учета сложности обследования при составлении этих алгоритмов. Рассчитаны условные вероятности, диагностические веса, частные и общие диагностические ценности. На основании проведенных вычислений составлены алгоритмы диагностирования без учета и с учетом сложности обследования аппаратуры релейного конца тональной рельсовой цепи. Показан эффект от учета сложности обследования при составлении алгоритмов. Результаты работы, представленные в статье, могут быть использованы при техническом обслуживании систем автоматики действующих железных дорог.

Ключевые слова: рельсовая цепь, путевого приемник, генератор, диагностирование, алгоритм диагностирования, диагноз, диагностический признак.

Maxim M. Sokolov

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

SEARCH FOR FAILURES OF RECEIVER END DEVICES OF TONAL RAIL CIRCUITS ON STATION

Abstract. The article describes the possibility of applying diagnostic algorithms, taking into account the complexity of the examination, applied to a specific problem of searching for damage in receiver of station's tonal track circuit. The aim of the work is to justify the need to take into account the complexity of the survey when compiling these algorithms. The order of compiling the diagnostic algorithm is shown, conditional probabilities, diagnostic weights, private and general diagnostic values are calculated. On the basis of the calculations performed, algorithms for diagnosing taking into account the complexity of the examination in receiver of the tonal track circuit was compiled. The work results presented in the article can be used for technical maintenance of automation systems of operating railways.

Keywords: track circuit, a track receiver, a generator, diagnosing, diagnosis algorithm, diagnostic indication

Согласно «Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года» одними из целевых параметров ее реализации являются внедрение рельсовых цепей тональной частоты (ТРЦ) с цифровой обработкой информации и разработка новых комплексных систем диагностики и мониторинга объектов инфраструктуры.

Задачей, на решение которой направлено совершенствование технологии устранения повреждений в устройствах железнодорожной автоматики, является снижение времени устранения этих повреждений с целью минимизации времени простоя или времени нарушения условий безопасности движения поездов.

Снижение времени устранения повреждения может быть достигнуто за счет изменения технологии обслуживания устройств [1, 2] или оптимизации процесса локализации отказа

(поиска места повреждения) путем применения оптимальной последовательности проверок и правил обработки их результатов (алгоритмов диагностирования) [3 – 5].

Без проведения каких-либо измерений или проверок первичную информацию об отказе в ТРЦ электромеханик может получить по индикации на путевом генераторе (ГПЗ) и путевых приемниках (ПП). В работах [6, 7] показано, что на основании этой индикации можно определить одно из следующих состояний (диагнозов) системы:

D_0 – ТРЦ исправна;

D_1 – отказ связан с электропитанием оборудования ТРЦ;

D_2 – отказ в схеме ГПЗ (в том числе его электропитание);

D_3 – отказ оборудования первого релейного конца ТРЦ, в том числе его части рельсовой линии;

D_4 – отказ оборудования второго релейного конца ТРЦ, в том числе его части рельсовой линии;

D_5 – отказ оборудования питающего конца ТРЦ.

Дальнейшая локализация отказа аппаратуры ТРЦ требует от электромеханика СЦБ дополнительных действий, таких как проведение измерений, визуальная проверка элементов, изменение электрической схемы и т. п. При этом если для диагнозов D_0 – D_2 , эти действия необходимо производить в одном месте (на посту ЭЦ) и в целом отказ локализуется довольно быстро, то для диагнозов D_3 – D_5 часть действий по проверке гипотез необходимо выполнять на напольном оборудовании. В данной ситуации неправильно выбранная последовательность действий приведет к большим временным затратам на перемещение и, как следствие, на суммарное время локализации и устранения отказа.

Рассмотрим возможность построения оптимальной последовательности проверок при локализации отказов в ТРЦ с учетом затрат времени для состояний D_3 и D_4 при следующих ограничениях:

ТРЦ находится в состоянии «ложной занятости» (на аппарате управления ДСП имеется соответствующая индикация);

электромехаником, находящимся в релейном помещении, на основании индикации на ГПЗ и ПП [7] сделан вывод о том, что произошел отказ оборудования соответствующего релейного конца ТРЦ (в том числе его части рельсовой линии);

рассматривается только одиночный отказ.

Последовательность действий для случаев отказа аппаратуры первого (D_3) и второго (D_4) релейных концов РЦ должна быть одинаковой и различаться она должна только релейным концом РЦ.

Развернутая схема оборудования первого релейного конца РЦ и его части рельсовой линии приведена на рисунке 1 [8, 9].

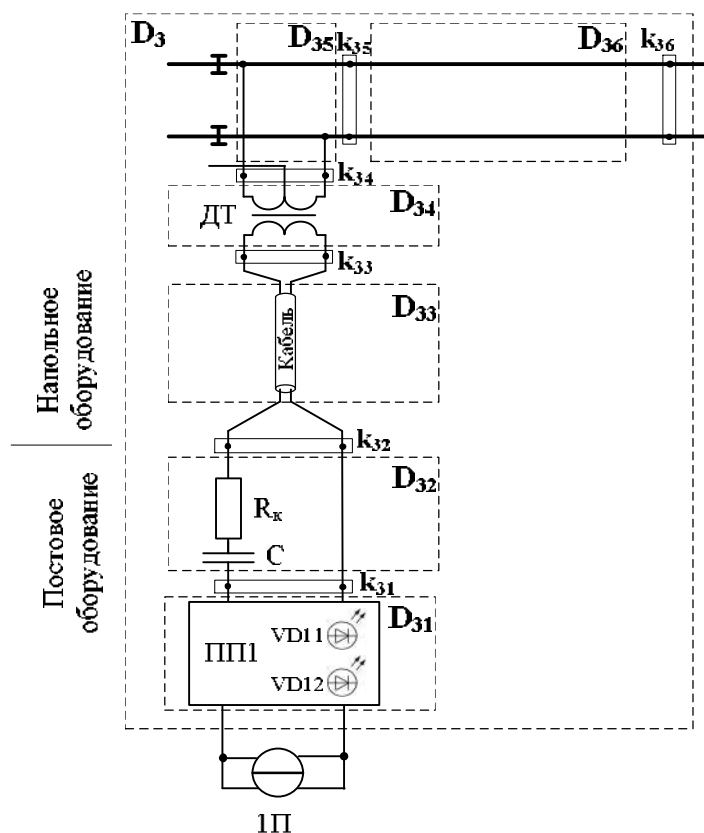


Рисунок 1 – Схема первого релейного конца тональной рельсовой цепи и его части рельсовой линии

Доступные электромеханику точки для проведения измерений согласно рисунку 1 следующие:

- k_{31} – контакты клеммной колодки путевого приемника;
- k_{32} – клеммы кроссового статива;
- k_{33} – клеммы для подключения кабеля к трансформатору;
- k_{34} – выводы трансформатора для подключения к рельсам;
- k_{35} – рельсы на релейном конце РЦ;
- k_{36} – рельсы на протяжении рельсовой линии от релейного конца к питающему.

Представленная система на основании перечисленных точек, доступных для измерений, может находиться в следующих состояниях:

- D_{31} – отказ ПП данного релейного конца;
- D_{32} – отказ постового оборудования от ПП до кроссового статива;
- D_{33} – отказ кабеля, соединяющего постовое и напольное оборудование;
- D_{34} – отказ трансформатора данного релейного конца;
- D_{35} – отказ устройств подключения трансформатора (перемычек) к рельсовой линии;
- D_{36} – отказ элементов рельсовой линии до места измерения k_{36} ;
- D_{37} – отказ элементов рельсовой линии после места измерения k_{36} .

Соответствие между значениями диагностических признаков и диагнозами приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Связь значений диагностических признаков с диагнозами

Диагноз	Значение признаков					
	k_{31}	k_{32}	k_{33}	k_{34}	k_{35}	k_{36}
D_{31}	1	1	1	1	1	1
D_{32}	0	1	1	1	1	1
D_{33}	0	0	1	1	1	1
D_{34}	0	0	0	1	1	1
D_{35}	0	0	0	0	1	1
D_{36}	0	0	0	0	0	1
D_{37}	0	0	0	0	0	0

В соответствии с методикой, приведенной в работах [4, 6], рассчитаем информационный вес каждой реализации диагностического признака в каждом из диагнозов по выражению:

$$Z_{Di}(k_{js}) = \log_2 \frac{P(k_{js} / D_i)}{P(k_{js})}, \quad (1)$$

где $P(k_{js} / D_i)$ – вероятность появления интервала s (значения) признака k_j для объектов с диагнозом D_i ;

$P(k_{js})$ – вероятность появления этого интервала (значения) у всех объектов с различными диагнозами.

Для объективной оценки степени влияния признаков на установление конкретного диагноза D_i в системе диагнозов D рассчитаем информационную ценность каждого обследования.

Для m -разрядного признака в диагнозе D_i частная диагностическая ценность обследования определяется по выражению [3, 4]:

$$Z_{Di}(k_j) = \sum_{s=1}^m P(k_{js} D_i) Z_{Di}(k_{js}). \quad (2)$$

Общая диагностическая ценность обследования по признаку k_j для всей системы диагнозов D будет рассчитываться по формуле [4, 5]:

$$S_D(k_j) = \sum_{i=1}^n P(D_i) Z_{Di}(k_j) = \sum_{i=1}^n \sum_{s=1}^m P(D_i) P(k_{js} / D_i) \log_2 [P(k_{js} / D_i) / P(k_{js})]. \quad (3)$$

Общая диагностическая ценность обследования по признаку k_j с учетом сложности обследования C_j рассчитывается по формуле [10]:

$$S_D(k_j)' = \frac{S_D(k_j)}{C_j}. \quad (4)$$

Усредненные затраты времени на выполнение обследования по проведению измерений для данной ситуации приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Усредненные затраты времени (сложность) обследований по диагностическому признаку

Признак	C_j , мин	Расшифровка признака
k_{31}	1	Перемещение по релейному помещению, проведение измерений на контактах штепсельной розетки
k_{32}	3	Перемещение в помещение кроссовой, проведение измерений на кроссовом стативе
k_{33}	13	Перемещение к напольному оборудованию рельсовой цепи, открытие кабельной стойки дроссель трансформатора, проведение измерений на клеммах ввода кабеля
k_{34}	10	Перемещение к напольному оборудованию рельсовой цепи, проведение измерений на выводах дроссель-трансформатора
k_{35}	10	Перемещение к напольному оборудованию рельсовой цепи, проведение измерений в точках подключения дроссельных перемычек к рельсам
k_{36}	15	Перемещение к напольному оборудованию рельсовой цепи, проведение измерений на рельсах в нескольких точках рельсовой линии

Значения рассчитанных частных и общих диагностических ценностей признаков (в том числе с учетом сложности обследования), полученных на основании данных таблицы 2 для принятых допущений $n = 7$, $m = 2$, сведены в таблицу 3. Значения условных вероятностей и информационных весов реализаций не приводятся с целью уменьшения размеров таблицы.

Таблица 3 – Значения частных и общих диагностических ценностей признаков

Признак	Диагноз							$P(k_j)$	$S_D(k_j)$	$C_{j, \text{мин}}$	$S_D(k_j)'$
	D_{31}	D_{32}	D_{33}	D_{34}	D_{35}	D_{36}	D_{37}				
	$P(D_{31}) = 0,2$	$P(D_{32}) = 0,1$	$P(D_{33}) = 0,2$	$P(D_{34}) = 0,05$	$P(D_{35}) = 0,1$	$P(D_{36}) = 0,1$	$P(D_{37}) = 0,25$				
	$S_{D31}(k_j)$	$S_{D32}(k_j)$	$S_{D33}(k_j)$	$S_{D34}(k_j)$	$S_{D35}(k_j)$	$S_{D36}(k_j)$	$S_{D37}(k_j)$				
k_{31}	2,81	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,143	0,739	1	0,739
k_{32}	1,81	1,81	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,286	0,882	3	0,294
k_{33}	1,22	1,22	1,22	0,81	0,81	0,81	0,81	0,429	1,015	13	0,078
k_{34}	0,81	0,81	0,81	0,81	1,22	1,22	1,22	0,571	0,994	10	0,099
k_{35}	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	1,81	1,81	0,714	0,948	10	0,095
k_{36}	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	2,81	0,857	0,868	15	0,058

Как следует из данных таблицы 3, без учета сложности обследования ($S_D(k_j)$), наиболее ценной и вполне логичной проверкой является переход к напольным устройствам и проведение измерений на клеммах ввода кабеля. В этом случае исследуемая схема разбивается на две примерно равные части как по количеству элементов, так и по вероятности отказов.

Алгоритм процесса диагностирования без учета сложности обследования может быть представлен в виде графа (рисунок 2), с последовательностью проверок $k_{33} - k_{34} - k_{35} - k_{32} - k_{36} - k_{31}$.

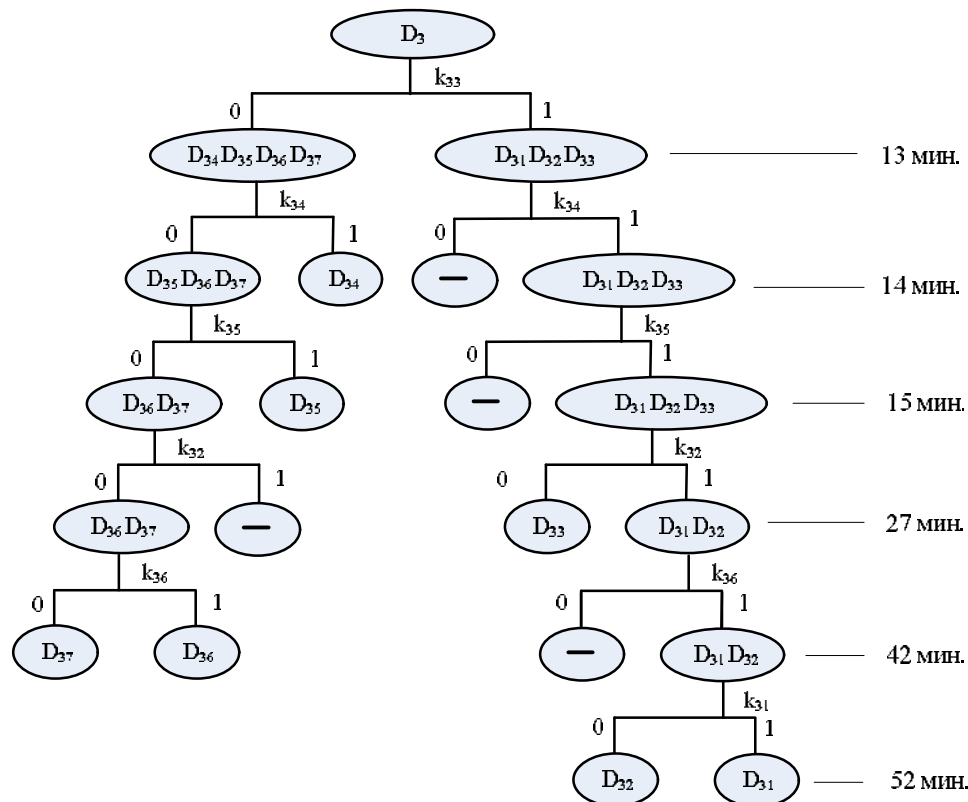


Рисунок 2 – Безусловный алгоритм диагностирования технического состояния аппаратуры релейного конца ТРЦ без учета сложности обследования

Справа на рисунке 2 указано примерное суммарное время на выполнение этих проверок. Как видно из алгоритма, если не учитывать сложность проведения обследования по диагностическим признакам, электромеханик уже на первом этапе диагностирования перемещается к напольным устройствам и при некоторых диагнозах вынужден затрачивать дополнительное время на возвращение обратно на пост ЭЦ.

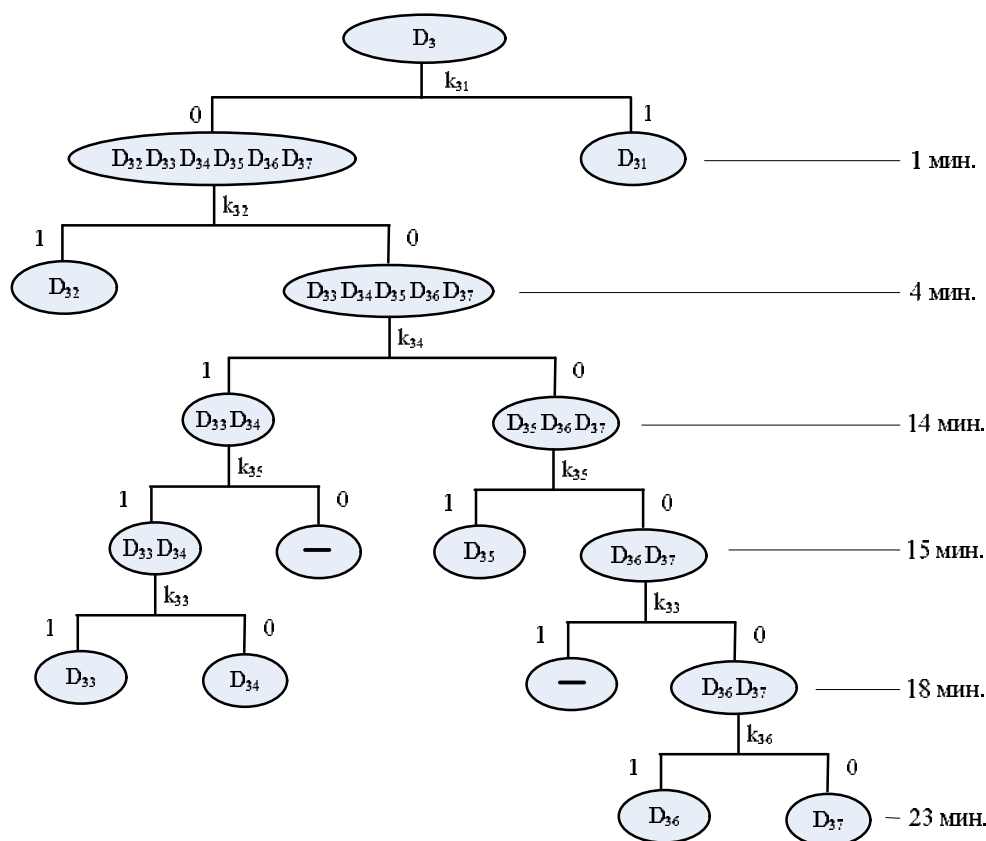


Рисунок 3 – Безусловный алгоритм диагностирования технического состояния аппаратуры релейного конца ТРЦ с учетом сложности обследования

Если при составлении алгоритма учитывать сложности обследования (4), т. е. временные затраты на его выполнение ($S_D(k_j)$), можно получить более оптимальную последовательность действий. В данном случае наиболее ценной становится проверка напряжения на контактах клеммной колодки путевого приемника (k_{31}), позволяющая при минимальных затратах времени идентифицировать или исключить отказ ПП.

Последующие проверки также определяются требуемыми временными затратами.

Полученные результаты проверок позволяют построить безусловный алгоритм диагностирования технического состояния аппаратуры релейного конца ТРЦ с учетом сложности обследования. Алгоритм может быть представлен в виде графа (см. рисунок 3) с последовательностью проверок $k_{31} - k_{32} - k_{34} - k_{35} - k_{33} - k_{36}$.

Как видно из рисунка 3, учет сложности обследования при выборе первой проверки алгоритма позволяет значительно (в рассматриваемом примере – более чем в два раза) сократить общее время поиска отказа за счет исключения потери времени при ненужных перемещениях.

В то же время, как видно из приведенного алгоритма, полученная последовательность действий также не является оптимальной, так как на третьем и последующих этапах проведения проверок она не учитывает информацию, полученную ранее. Исходя из этого недостатка в безусловном алгоритме, приведенном на рисунке 3, на четвертом и пятом шагах проверок проводятся необязательные проверки по признакам k_{35} и k_{33} соответственно.

Таким образом, для получения оптимальной последовательности проверок при локализации отказов в аппаратуре релейного конца станционных рельсовых цепей тональной частоты на втором и последующих этапах проверок необходим пересчет общей диагностической ценности обследования по признаку в условиях изменившихся сложностей обследования (изменения местонахождения электромеханика) и учета информации, полученной на более ранних этапах проверки.

Список литературы

1. Соколов, М. М. Совершенствование технологии обслуживания станционных рельсовых цепей [Текст] / М. М. Соколов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 3 (27). – С. 124 – 132.
2. Соколов, М. М. Контроль состояния системы электроснабжения устройств железнодорожной автоматики: Монография [Текст] / М. М. Соколов // Lambert Academic Publishing. – Саарбрюккен, 2012. – 161 с.
3. Сапожников, В. В. Основы технической диагностики: Учебное пособие [Текст] / В. В. Сапожников / УМЦ ЖДТ. – М., 2004. – 318 с.
4. Биргер, И. А. Техническая диагностика [Текст] / А. И. Биргер. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.
5. Иванова, Е. Г. Построение алгоритма проверки технического состояния устройств числовой кодовой автоблокировки [Текст] / Е. Г. Иванова, Г. В. Ларионов, С. Л. Лисин // Сб. науч. тр. по материалам междунар. науч.-практ. конф. «Перспективные инновации в науке, образовании, на производстве и транспорте-2010». – Одесса: Черноморье, 2010. – Т. 1. – С. 58 – 63.
6. Соколов, М. М. Построение безусловного алгоритма диагностирования станционных рельсовых цепей тональной частоты [Текст] / М. М. Соколов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 1 (33). – С. 139 – 145.
7. Соколов, М. М. Построение условного алгоритма диагностирования станционных рельсовых цепей тональной частоты [Текст] / М. М. Соколов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 2 (34). – С. 150 – 158.
8. Аркатов, В. С. Рельсовые цепи магистральных дорог: Справочник [Текст] / В. С. Аркатов / ООО «Миссия-М». – М., 2006. – 496 с.
9. Сороко, В. И. Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики: Справочник: В 4 кн. [Текст] / В. И. Сороко, Ж. В. Фоткина. – М.: Планета, 2013. – Кн. 1. – 1060 с.
10. Ларионов, Г. В. Построение алгоритмов диагностирования аппаратуры числовой кодовой автоблокировки на основе информационной ценности признаков [Текст] / Г. В. Ларионов, С. Л. Лисин // Эффективность и безопасность работы электротехнических комплексов и систем автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте: Межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2011. – С. 32 – 38.

References

1. Sokolov M. M. Improvement of technology service of station track circuits railway automation [Sovershenstvovanie tehnologii obsluzhivaniya stancionnyh rel'sovyh cepej] *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2016, no. 3 (27), pp. 124 – 132.
2. Sokolov M. M. *Monitoring the state of the power supply system for railway automation devices* [Kontrol' sostojaniya sistemy jelektrosnabzheniya ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki]. Saarbrücken; Lambert Academic Publishing, 2012, 161 p.
3. Sapozhnikov V. V. *Osnovy tekhnicheskoi diagnostiki* (Basics of technical diagnostics). Moscow: UMTs ZhDT Publ., 2004, 318 p.
4. Birger I. A. *Tekhnicheskaya diagnostika* [Technical diagnostics]. Moscow: «Mashinostroenie» publ., 1978, 240 p.

5. Ivanova E. G., Larionov G. V., Lisin S. L. Construction of an algorithm for checking the technical state of the devices of a numerical code lock [Postroenie algoritma proverki tehnikeskogo sostojaniya ustrojstv chislovoj kodovoj avtoblokirovki]. *Abstracts of the Int. conference «Perspective Innovations in Science, Education, Production and Transport-2010»*. – Odessa, 2010. T. 1., pp. 58 – 63.

6. Sokolov M. M. Construction of unconditional algorithm for diagnostics of tonal rail circuits on station [Postroenie uslovnogo algoritma diagnostirovaniya stantsionnykh rel'sovykh tsepej tonal'noj chastoty] *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2018, vol. 33, no 1, pp. 139-145

7. Sokolov M. M. Construction of conditional algorithm for diagnostics of tonal rail circuits on station [Postroenie uslovnogo algoritma diagnostirovaniya stantsionnykh rel'sovykh tsepej tonal'noj chastoty] *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2018, vol. 34, no 2, pp. 150-158.

8. Arkatov V. S. *Rel'sovye cepi magistral'nyh dorog* [Railways of main roads], Moscow: ООО «Missiia-M» publ., 2006, 496 p.

9. Soroko V. I., Fot'kina Zh. V. *Apparatura zheleznodorozhnoi avtomatiki i telemekhaniki* [Railway automation and telemechanics equipment]. T. 1. Moscow: ООО «NPF «PLANETA» Publ, 2013, 1060 p.

10. Larionov G. V., Lisin S. L. The construction of algorithms for diagnosing the hardware of a numerical code lock on the basis of the information value of the signs [Postroenie algoritmov diagnostirovaniya apparatury chislovoj kodovoj avtoblokirovki na osnove informacionnoj cennosti priznakov]. *Journal «Efficiency and safety of operation of electrical systems and automation and telemechanics systems in railway transport»* Omsk, 2011, pp. 32 – 38.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Соколов Максим Михайлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +8 (3812) 311872.

E-mail: SokolovMM@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Sokolov Maxim Mikhailovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Railway Signaling and Interlocking», OSTU.

Phone: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: SokolovMM@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Соколов, М. М. Локализация отказов в аппаратуре релейного конца станционной рельсовой цепи тональной частоты [Текст] / М. М. Соколов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск – 2019. – № 3 (39). – С. 118 – 125.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Sokolov M. M. Construction of conditional algorithm for diagnostics of tonal rail circuits on station. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2019, vol. 3, no. 39, pp. 118 – 125 (In Russian).

УДК 669.162.252

Н. В. Юшков¹, В. Я. Губарев²

¹Новолипецкий металлургический комбинат (НЛМК), г. Липецк, Российская Федерация;

²Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ), г. Липецк, Российская Федерация

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ ДОМЕННОГО ГАЗА В ПОЛЫХ ФОРСУНОЧНЫХ ПРЯМОТОЧНЫХ СКРУББЕРАХ

Аннотация. Одним из самых распространенных является мокрый способ очистки доменного газа от частиц колошниковой пыли. Полый форсуночный скруббер – аппарат мокрой очистки доменного газа, в котором обеспыливание доменного газа осуществляется за счет взаимодействия частиц колошниковой пыли с каплями диспергированной технической воды. Принцип очистки доменного газа в полном форсуночном скруббере основан на инерционном механизме столкновения частиц колошниковой пыли с каплями диспергированной технической воды, после которого частицы смачиваются, слипаются и под действием силы тяжести выпадают из потока очищаемого газа. В данной работе предлагается методика расчета эффективности очистки доменного газа в полном форсуночном прямоточном скруббере, которая основана на разделении объема данного аппарата газоочистки на расчетные участки. С учетом того, что траектория движения капли в потоке доменного газа в полном форсуночном скруббере имеет параболическую форму, в данной методике по определению эффективности улавливания частиц колошниковой пыли учитывается радиальная составляющая абсолютной скорости капли. Поправочный коэффициент в выражении для определения фракционного коэффициента эффективности очистки доменного газа от колошниковой пыли определяет наличие мертвых зон при орошении запыленного газа технической водой, распыленной эвольвентными форсуночными устройствами. Кроме того, в представленной методике учитывается повышение эффективности очистки доменного газа за счет процесса конденсации водяных паров из потока запыленного газа в нижней части полого форсуночного скруббера.

Ключевые слова: полый форсуночный прямоточный скруббер, фракционный коэффициент эффективности очистки доменного газа, осевая составляющая абсолютной скорости капли, радиальная составляющая абсолютной скорости капли.

Nikolay V. Yushkov¹, Vasily Ya. Gubarev²

¹NLMK, Lipetsk, Russian Federation;

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation

THE METHOD OF RESEARCH OF EFFICIENCY OF CLEARING OF BLAST FURNACE GAS IN THE HOLLOW NOZZLE STRAIGHT-THROUGH SCRUBBER

Abstract. The wet method of cleaning the blast furnace gas from the particles of grate dust is one of the most common. The hollow nozzle scrubber is the device for wet cleaning of blast furnace gas in which the cleaning of blast furnace gas is carried out due to the interaction of particles of grate dust with droplets of dispersed technical water. The principle of cleaning the blast furnace gas in the hollow nozzle scrubber is based on the inertial mechanism of collision of grate dust particles with droplets of dispersed process water. After the particles are wetted, stick together and fall out of the flow of the cleaned gas under the influence of gravity. In this paper, we propose a method for calculating the efficiency of blast furnace gas purification in a hollow nozzle straight-through scrubber, which is based on the division of the volume of this gas purification apparatus into even sections. Because the trajectory of the droplet in the blast furnace gas flow in the hollow nozzle scrubber has a parabolic shape, radial component of the absolute velocity of the droplet is taken into account in this technique to determine the efficiency of catching dust particles. The correction factor in the expression for determining the fractional efficiency coefficient of the blast furnace gas purification from the grate dust determines the presence of «dead zones» when the dusty gas is irrigated with technical water sprayed by involute injectors. In addition, the presented method takes into account the increase in the efficiency of cleaning the blast furnace gas due to the process of condensation of water vapor from the flow of dusty gas in the lower part of the hollow nozzle scrubber.

Keywords: a hollow nozzle straight-through scrubber, fractional efficiency coefficient of blast furnace gas purification, axial component of the absolute velocity of the droplet, radial component of the absolute velocity of the droplet

Одним из самых распространенных является мокрый способ очистки доменного газа от частиц колошниковой пыли. Данный способ газоочистки основан на свойстве частиц колош-

никовой пыли при взаимодействии с каплями распыленной технической воды смачиваться, слипаться и под действием силы тяжести выпадать из потока очищаемого доменного газа. Основными факторами, определяющими механизм инерционного осаждения частиц колошниковой пыли с каплями диспергированной технической воды, являются следующие: величина скорости капель относительно скорости частицы колошниковой пыли и диаметр капель распыленной воды [1].

Самым распространенным аппаратом мокрой очистки доменного газа является полый форсуночный скруббер. Конструктивно скруббер – это круглая цилиндрическая колонна, в которой запыленный поток колошникового газа взаимодействует с каплями распыленной форсуночными устройствами технической воды. В зависимости от направления движения капель относительно очищаемого доменного газа выделяют прямоточные и противоточные полые форсуночные скрубберы.

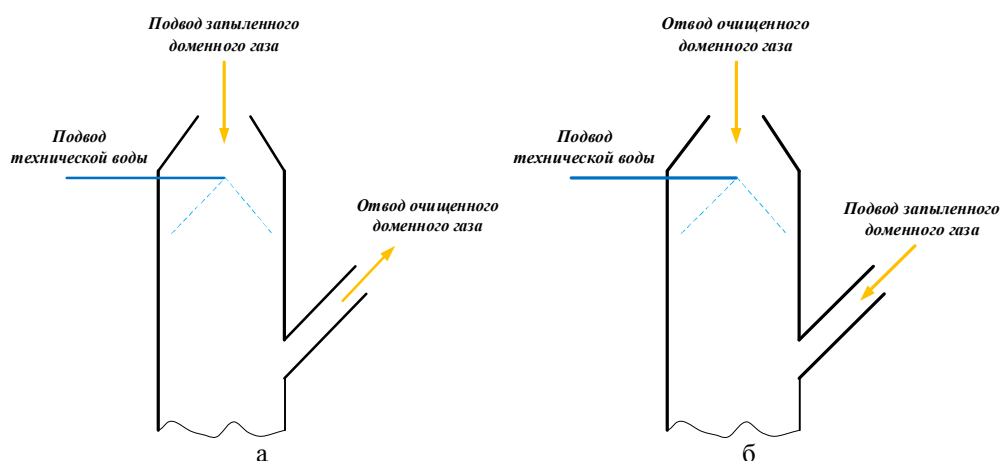


Рисунок 1 – Принципиальная схема полового форсуночного скруббера: противоточные (а) и прямоточные (б) полые форсуночные скрубберы

Полые форсуночные скрубберы являются аппаратами полутонкой очистки доменного газа: качественная и эффективная очистка доменного газа обеспечивается при фракционном размере частиц колошниковой пыли $\delta_{\text{ч}} > 10 - 20$ мкм [2].

В настоящее время отсутствуют точные методики расчета эффективности очистки доменного газа в полых форсуночных скрубберах. Существующие методики основываются на использовании осевой составляющей абсолютной скорости капли, при этом траектория ее движения в полом форсуночном скруббере определяется как осевой, так и радиальной составляющими. Кроме того, не учитывается то, что форма траектории движения капли в полом форсуночном скруббере параболическая, что обеспечивает наличие мертвых зон при взаимодействии доменного газа с каплями диспергированной технической воды [3].

В данной работе предлагается методика расчета эффективности очистки доменного газа в полом форсуночном прямоточном скруббере со схемой установки форсуночных устройств по оси аппарата в линию.

Эффективность очистки доменного газа за счет механизма инерционного осаждения частиц колошниковой пыли на поверхности капель диспергированной технической воды определяется критерием Стокса [4, 5]:

$$Stk = \tau_{\text{ч}} \frac{w_{\text{с}}}{d_{\text{к}}}, \quad (1)$$

где Stk – значение критерия (числа) Стокса; $\tau_{\text{ч}}$ – время динамической релаксации частицы колошниковой пыли, с; $d_{\text{к}}$ – диаметр капель распыленной технической воды, м;

w_c – скорость движения капли относительно скорости движения частицы пыли в конце рассматриваемого участка, м/с.

С учетом относительно высоких значений скоростей движения доменного газа и капель диспергированной технической воды, характерных для процесса газоочистки в полых прямоточных форсуночных скрубберах, имеет место потенциальный режим обтекания частиц колошниковой пыли, следовательно, значение коэффициента осаждения определяется с учетом выражения Лэнгмюра – Блоджетта [6, 7]:

$$\eta_{Stk} = \left(1 + \frac{0,77 \ln(4Stk)}{2Stk - 1,214} \right)^{-2}, \quad (2)$$

где η_{Stk} – коэффициент осаждения частиц колошниковой пыли на поверхности капель диспергированной технической воды.

Для определения фракционного коэффициента эффективности очистки доменного газа в полых форсуночных скрубберах используется приближенное выражение, полученное в работах [8 – 10]:

$$\eta_\delta = 1 - \left(\frac{w_{CH}^2 - w_{ks}^{02}}{w_{CO}^2 - w_{ks}^{02}} \right)^{\frac{\beta q \rho_{\text{ж}}}{0,44 \rho_{\Gamma}} \eta_{Stk}}, \quad (3)$$

где η_δ – фракционный коэффициент эффективности улавливания частиц колошниковой пыли; w_{CH} – скорость движения капли относительно скорости движения частицы пыли в конце рассматриваемого участка, м/с; w_{CO} – скорость движения капли относительно скорости движения частицы пыли в начале рассматриваемого участка (на выходе из форсунки), м/с; w_{ks}^0 – скорость стационарного осаждения капли в потоке запыленного газа, м/с; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность диспергируемой жидкости, кг/м³; ρ_{Γ} – плотность запыленного газа, кг/м³; β – поправочный коэффициент.

С целью повышения точности методики определения фракционного коэффициента эффективности при очистке доменного газа объем полого форсуночного прямоточного скруббера по оси разделим на расчетные участки (в соответствии с количеством форсуночных устройств, использующихся для распыла технической воды). Следовательно, эффективность очистки доменного газа в данном аппарате газоочистки будет определяться как сумма коэффициентов на всех расчетных участках.

Для распыла технической воды в полых форсуночных скрубберах используются эвольвентные форсуночные устройства, для которых характерно нормальное распределение по диаметрам капель [11, 12]. При этом график нормального распределения условно разделим на две части: капли, которые взаимодействуют с доменным газом по всей высоте аппарата мокрой очистки доменного газа, и капли, которые в определенный момент при движении в потоке запыленного доменного газа попадают на стенки скруббера. Для первой области среднее значение диаметра капель – 0,85 мм, для второй – 3,00 мм.

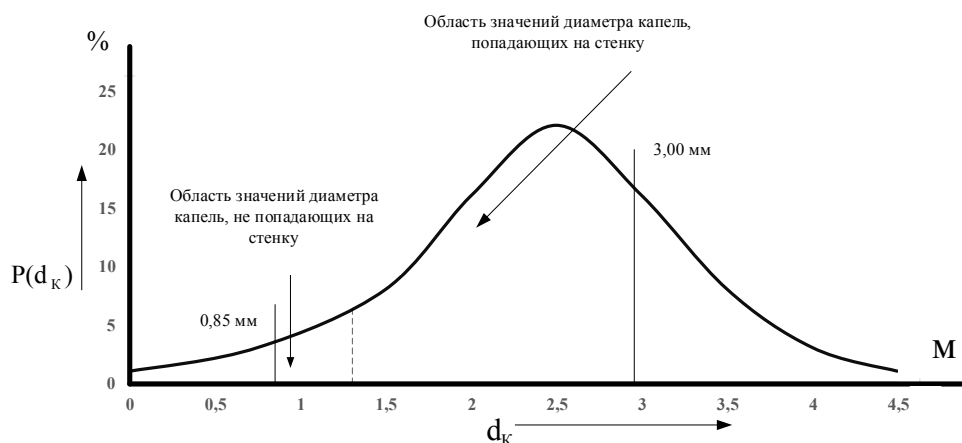


Рисунок 2 – Нормальное распределение по значениям диаметра капель при распыле эвольвентными форсуночными устройствами

С учетом перечисленного выше эффективность пылеулавливания на расчетном участке будет определяться как сумма фракционных коэффициентов, рассчитанных для определенных значений капель диспергированной технической воды (0,85 и 3,00 мм) для каждого форсуночного устройства.

В дальнейшем значение критерия Стокса и, следовательно, значение коэффициента осаждения частиц колошниковой пыли будут определяться с учетом средней на расчетном участке величины скорости движения капель относительно скорости частиц пыли.

Значение средней относительной скорости движения капель на расчетном участке будет определяться как среднеарифметическое значение между относительной скоростью на входе в расчетный участок и скоростью на выходе из расчетного участка. Кроме того, необходимо отметить, что в расчетах по определению фракционного коэффициента эффективности очистки доменного газа используется значение осевой составляющей абсолютной скорости движения капли.

Для первых расчетных участков значение осевой скорости капли на входе в расчетный участок будет равно значению скорости капли на выходе из сопла форсуночного устройства. В то же время значение абсолютной скорости капли на выходе из расчетного участка будет определяться исходя из решения системы уравнения движения капли в потоке доменного газа численными методами, например, методом Рунге-Кутты IV порядка:

$$w_{CH} = w_{KZ0} - w_{ГН}; \quad (4)$$

$$w_{CH} = w_{KZH} - w_{ГН}; \quad (5)$$

$$\bar{w}_C = \frac{w_{CH} + w_{C0}}{2}, \quad (6)$$

$$\bar{Stk}_{P.Y} = \tau_{\text{ч}} \cdot \frac{\bar{w}_C}{d_K}; \quad (7)$$

$$\bar{\eta}_{Stk} = \frac{(\bar{Stk}_{P.Y})^2}{(\bar{Stk}_{PY} + 0,125)^2}, \quad (8)$$

где w_{CH} – скорость доменного газа на расчетном участке, м/с; w_{KZ0} – осевая составляющая скорости капли на входе в расчетный участок (на выходе из сопла форсуночного устройства), м/с; w_{KZH} – осевая составляющая скорости капли на выходе из расчетного участка, м/с; $\bar{w}_C$ – среднее значение скорости капли на расчетном участке относительно скорости

частицы пыли, м/с; $\bar{Stk}_{p,y}$ – среднее значение на расчетном участке числа Стокса; $\bar{\eta}_{Stk}$ – среднее значение коэффициента осаждения на расчетном участке.

Выражение для определения фракционного коэффициента эффективности осаждения за счет инерционного механизма осаждения примет следующий вид:

$$\eta_{\delta(0,85 \text{ мм} / 3,00 \text{ мм})} = 1 - K_{\delta} = \left(\frac{w_{CH}^2 - w_{ks}^{02}}{w_{CO}^2 - w_{ks}^{02}} \right)^{\frac{\beta q \rho_{ж}}{0,44 \rho_{г}} \bar{\eta}_{Stk}}, \quad (9)$$

где $\eta_{\delta(0,85 \text{ мм} / 3,00 \text{ мм})}$ – фракционный коэффициент эффективности очистки доменного газа на расчетном участке для диаметров капель диспергированной технической воды 0,85 или 3,00 мм.

Поправочный коэффициент учитывает следующий фактор: за счет того, что форсуночные устройства имеют определенный угол конусности факела, объем аппарата мокрой газоочистки доменного газа не полностью заполнен каплями диспергированной технической воды. Для учета наличия мертвых зон орошения доменного газа в полном форсуночном скруббере в выражении (9) вводится поправочный коэффициент β .

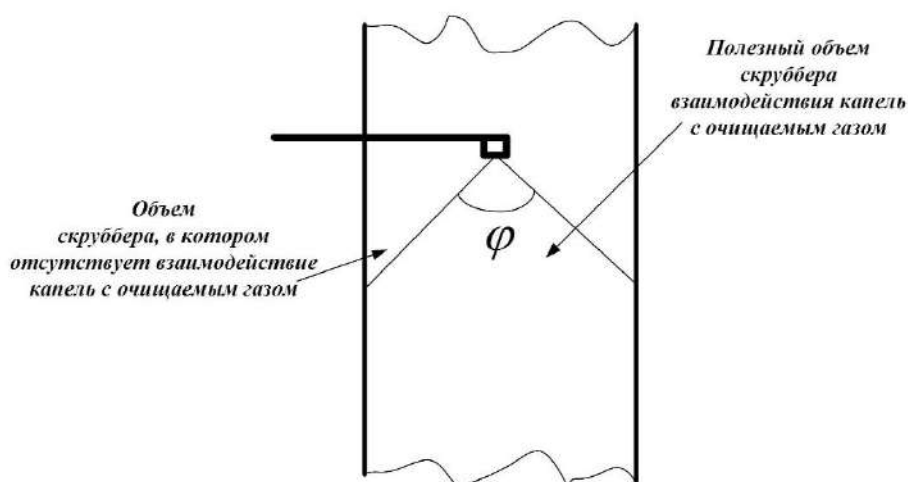


Рисунок 3 – Схема учета мертвых зон орошения при расчете величины коэффициента эффективности пылеулавливания

Кроме того, при оценке эффективности очистки доменного газа в полых форсуночных скрубберах необходимо учитывать эффект коагуляции (слипания и утяжеления) частиц колошниковой пыли вследствие процесса конденсации водяных паров из потока очищаемого газа. Относительное увеличение фракционного размера частиц колошниковой пыли определяется с учетом выражения

$$\frac{\delta_{кч}}{\delta_{ч}} = \sqrt[3]{\left(1 + \frac{\bar{\rho}_{г}^{сух} \Delta d_{уд}^K}{c_i \bar{\rho}_{Т.В.}}\right)}, \quad (10)$$

где $\bar{\rho}_{г}^{сух}$ – среднее значение плотности сухого доменного газа (без учета содержания водяных паров) на расчетном участке, кг/м³; $\Delta d_{уд}^K$ – изменение величины удельного паросодержания доменного газа на расчетном участке вследствие конденсации водяных паров, кг/кг

сухого газа; c_i – запыленность доменного газа (весовая концентрация частиц колошниковой пыли в доменном газе) на входе в расчетный участок, кг/м^3 .

В выражении для определения коэффициента эффективности очистки доменного газа за счет инерционного механизма осаждения будет использоваться величина фракционного размера частиц с учетом их слипания вследствие конденсации водяных паров.

При определении коэффициента эффективности очистки доменного газа в полых форсуночных скрубберах систем мокрых газоочисток доменного газа необходимо учитывать также радиальную составляющую абсолютной скорости движения капель диспергированной технической воды в потоке запыленного газа. Конструктивные параметры форсуночных устройств, установленных в полых скрубберах, обеспечивают относительно большой угол конусности факела распыла, следовательно, высокое значение радиальной составляющей абсолютной скорости капель. При относительно высоких значениях радиальной составляющей скорости часть капель при распыле попадает на стенки аппарата мокрой газоочистки и не участвует в дальнейшем взаимодействии с доменным газом с точки зрения очистки и охлаждения.

Далее для анализа качества очистки доменного газа по высоте расчетного участка построим в одной системе координат графики изменения фракционного коэффициента эффективности очистки доменного газа и осевой составляющей абсолютной скорости капель диспергированной технической воды.

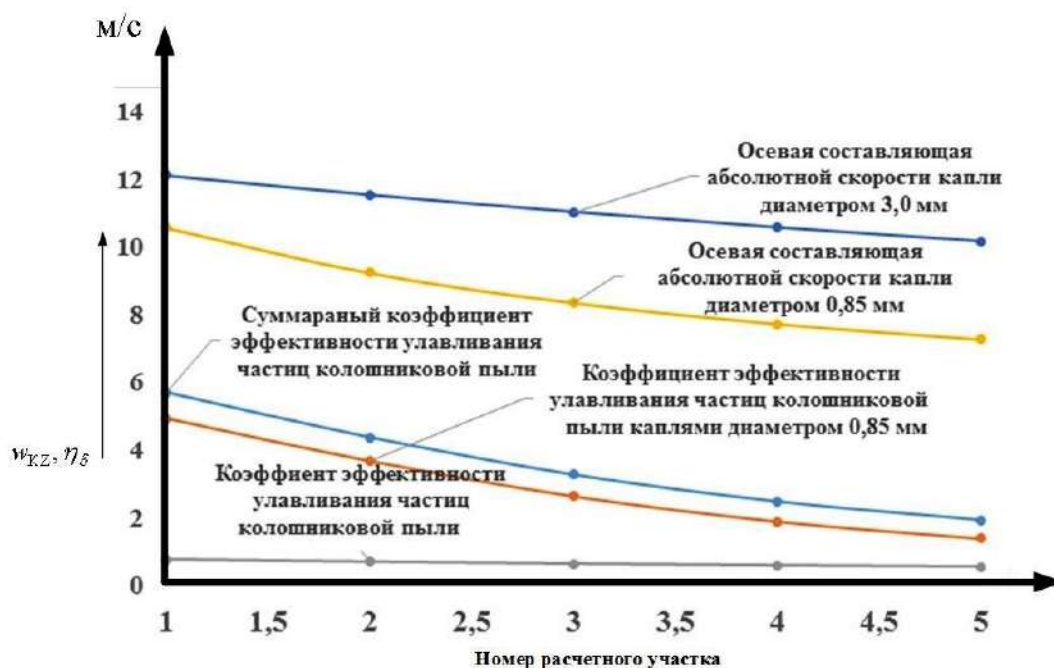


Рисунок 4 – Графики изменения фракционной эффективности очистки доменного газа и осевой составляющей абсолютной скорости капель

С учетом графика, приведенного на рисунке 4, и расчетной модели можно сделать следующие выводы:

1) за счет большей площади контакта с частицами колошниковой пыли для капель распыленной технической воды диаметром 0,85 мм по отношению к каплям диаметром 3,00 мм имеет место более высокая эффективность очистки запыленного доменного газа;

2) для капель диспергированной технической воды диаметром 0,85 мм характерно более интенсивное торможение в потоке очищаемого газа; это приводит к тому, что в конце расчетного участка величина осевой составляющей абсолютной скорости капли становится близкой по значению к скорости стационарного осаждения и, соответственно, захвата частиц колошниковой пыли за счет инерционного механизма столкновения не происходит;

3) в то же время для капель диаметром 3,00 мм характерно медленное снижение осевой составляющей абсолютной скорости капли в потоке доменного газа и, следовательно, незначительное уменьшение эффективности очистки по высоте расчетного участка;

4) для капель диспергированной технической воды диаметром 3,00 мм по отношению к каплям диаметром 0,85 мм за счет более высокого значения радиальной составляющей скорости имеет место невысокий коэффициент использования капель из-за их попадания при распыле форсуночными устройствами на стенку полого форсуночного скруббера.

В заключение необходимо отметить, что представленная в работе методика определения суммарного фракционного коэффициента улавливания частиц колошниковой пыли в полном форсуночном скруббере, во-первых, позволяет получить более точную оценку качества очистки доменного, что дает возможность ее использования для расчетов по определению эффективности работы аппаратов мокрой очистки доменного газа, во-вторых, учет влияния конденсации водяных паров при очистке доменного газа в представленной выше методике позволит определить оптимальные режимы орошения доменного газа в полых форсуночных скрубберах для возможности снижения расхода технической воды на газоочистку.

Список литературы

1. Старк, С. Б. Пылеулавливание и очистка газов в металлургии [Текст] / С. Б. Старк. – М.: Металлургия, 1977. – 328 с.
2. Сталинский, Д. В. Решение проблем очистки доменного газа и энергосбережения [Текст] / Д. В. Сталинский, Г. М. Каненко, В. В. Алхазов // Сталь. – 2008. – № 6. С. 85 – 90.
3. Юдашкин, М. Я. Пылеулавливание и очистка газов в черной металлургии [Текст] / М. Я. Юдашкин. – М.: Металлургия, 1984. – 320 с.
4. Алиев, Г. М. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов [Текст] / Г. М. Алиева – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
5. Сперкач, И. Е. Новые технологические и технические решения по газоочистной системе доменной печи [Текст] / И. Е. Сперкач // Сталь. – 2007. – № 3. – С. 97 – 103.
6. Шиляев, М. И. О механизме улавливания пыли в пенных аппаратах [Текст] / М. И. Шиляев, А. Р. Дорохов, П. Г. Нечаев // Известия вузов. Строительство. – Новосибирск. – 1996. – №11. – С. 86 – 90.
7. Старицкий, В. И. Газовое хозяйство заводов черной металлургии [Текст] / В. И. Старицкий. – М.: Металлургия, 1973. – 496 с.
8. Ужов, В. Н., Очистка промышленных газов от пыли [Текст] / В. И. Ужов, А. Ю. Вильдберг. – М.: Химия, 1981. – 390 с.
9. Губарев В. Я. Совершенствование систем газоочисток доменного газа [Текст] / В. Я. Губарев, Н. В. Юшков // Молодой ученый. – 2016. – №10. – С. 166 – 169.
10. Хавкин, Ю. И. Центробежные форсунки [Текст] / Ю. И. Хавкин. – Л.: Машиностроение, 1976. – 168 с.
11. Бородин, В. А. Распыливание жидкостей [Текст] / В. А. Бородин. – М.: Машиностроение, 1967. – 265 с.
12. Калиткин Н. Н. Численные методы [Текст] / Н. Н. Калиткин. – М.: Наука, 1978. – 512 с.

References

1. Stark S. B. Pyleulavlivanie i ochistka gazov v metallurgii. (Dust collection and purification of gases in metallurgy). Moscow: Metalurgiya, 1977, 328 p.
2. Stalinsky D. V., Kanenko G. M., Alhazov V. V. Solving the problems of blast furnace gas purification and energy saving [Reshenie problem ochistka domennogo gaza i energosberezhenie]. Stal. 2008, no 6, pp 85 – 90.
3. Yudashkin M. Ya. Pyleulavlivanie i ochistka gazov v chernoï metallurgii. (Dust collection and purification of gases in metallurgy). Moscow: Metalurgiya, 1984, 320 p.

4. Aliev G. M. *Technika pyleulavlivaniya i ochistka promyshlennyykh gazov.* (Dust collection and purification of industrial gases). Moscow: Metalurgiya, 1986, 544 p.
5. Stalinsky D. V. New technological and technical solutions for blast furnace gas cleaning system [Novye tehnologii i tehnologicheskie resheniya]. *Stal*, 2007, no. 3, pp 97 – 103.
6. Shilyaev M. I., Dorohov A. R., Nechaev P. G. On the mechanism of dust capture in foam apparatus [O mehanizme ulavlivaniya pyli v pennyykh apparatah]. *Izvestiay vuzov. Stroitelstvo*, 1996, no. 11, p. 86 – 90.
7. Staritskiy V. I. *Gazovoe hozyaistvo zavodov chernoi metallurgii.* (Gas economy of ferrous metallurgy plants). Moscow, Metalurgiya, 1973, 496 p.
8. Uzhov V. N., Vildberg A. Yu. *Ozhistka promyshlennyykh gazov ot pyli.* (The cleaning of industrial gases from dust). Moscow, Himiya, 1981, 390 p.
9. Gubarev V. Ya., Yushkov N. V. Improvement of blast furnace gas cleaning systems. [Soverhenstvovanie sistem gazoochistok domennogo gaza]. *Molodoy ucheny*, 2016, no. 10. С. 166 – 169.
10. Havkin Yu. I. *Tsentrobezhnye forsunki.* (The centrifugal nozzles). Leningrad, Mashinostroenie, 1976, 168 p.
11. Borodin V. A. *Raspylivanie zhidkostei.* (The spraying of liquids). Moscow, Mashinostroenie, 1967, 265 p.
12. Kalitkin N. N. *Chislennyye metody.* (The numerical method). Moscow, Nauka, 1978, 512 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Юшков Николай Владимирович

ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат (НЛМК)».

Славянова ул., д. 3, кв. 57, г. Липецк, 398070, Российская Федерация.

Главный специалист ПАО «НЛМК».

Тел.: +7 (952) 594-33-65.

E-mail: yushk.nikolai@yandex.ru.

Губарев Василий Яковлевич

Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ).

Гагарина ул., д. 43, кв. 15, г. Липецк, 398002, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика», ЛГТУ.

Тел.: +7 (910) 742-98-65.

E-mail: gv_lipetsk@rambler.ru.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Юшков, Н. В. Методика исследования эффективности очистки доменного газа в полых форсуночных прямооточных скрубберах [Текст] / Н. В. Юшков, В. Я. Губарев // *Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения.* – Омск. – 2019. – № 3 (39). – С. 126 – 133.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yushkov Nikolai Vladimirovich

Novolipetsk Steel (NLMK).

57, 3, Slavyanova st., Lipetsk, 398070, the Russian Federation.

The main specialist NLMK.

Phone: +7 (952) 594-33-65.

E-mail: yushk.nikolai@yandex.ru.

Gubarev Vassily Yakovlevich

Lipetsk state technical university (LSTU).

15, 43, Gagarina st., Lipetsk, 398002, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Professor of the department «Industrial heat», LSTU.

Phone: +7 (910) 742-98-65.

E-mail: gv_lipetsk@rambler.ru.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Yushkov N. V., Gubarev V. Ya. The method of research of efficiency of clearing of blast furnace gas in the hollow nozzle straight-through scrubber. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2019, vol. 3, no. 39, pp. 126 – 133 (In Russian).

УДК 621.316.1

Е. В. Петрова

Омский государственный технический университет (ОмГТУ), г. Омск, Российская Федерация

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ НА НАГРУЗОЧНЫЕ ПОТЕРИ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ И САМОНЕСУЩИХ ИЗОЛИРОВАННЫХ ПРОВОДАХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Аннотация. Применение в практике эксплуатации линий электропередачи новых самонесущих изолированных проводов и высокотемпературных проводов позволяет повысить пропускную способность линий и, как правило, уменьшить эксплуатационные расходы. Оптимальное использование нагрузочной способности линии электропередачи зависит от точного определения допустимых токовых нагрузок. Значения допустимых токов и установившейся температуры являются главными параметрами рабочего режима линии, влияющими на прочность и стрелу провеса провода. Температурный режим провода зависит от погодных условий и токовой нагрузки. Для широко применяемых традиционных проводов типа АС уже существуют методики определения температуры и допустимых токов. Они нашли частичное отражение в ПУЭ и стандарте ПАО ФСК ЕЭС 2013 года. Для новых типов проводов можно отметить недостаточный объем исследований в этом направлении. В данной статье приведены результаты исследований влияния погодных условий и нагрузки на температуру и потери активной мощности в изолированных и высокотемпературных проводах. Особое внимание уделено влиянию солнечной радиации. Для сравнения представлены и результаты расчетов по традиционным проводам типа АС. Проведенные исследования показали, что для заданных величин нагрузки и погодных условий учет солнечной радиации обеспечивает увеличение потерь активной мощности порядка 2 %. Расчеты значений допустимого тока по разработанной методике для классических проводов АС выявили высокое совпадение со значениями из стандарта ПАО ФСК ЕЭС. Относительная погрешность находится в пределах двух процентов. При этом предложенная методика является более обобщенной, она позволяет одновременно проводить анализ как неизолированных проводов, так и проводов с изоляцией. В связи с широким применением самонесущих изолированных проводов разработанное программное обеспечение может найти применение при проектировании и эксплуатации современных линий электропередачи для оптимизации пропускной способности.

Ключевые слова: уравнение теплового баланса, воздушные линии электропередач, температура провода, потери активной мощности, изолированный провод, солнечная радиация, высокотемпературные провода.

Elena V. Petrova

Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk, the Russian Federation

ASSESSMENT OF SOLAR RADIATION EFFECT ON REAL-POWER LOSSES UNDER LOAD IN HIGH-TEMPERATURE AND SELF-SUPPORTING INSULATED WIRES OF POWER LINES

Abstract. The use of new self-supporting insulated wires and high-temperature wires in the operation of power lines allows increasing the capacity of lines and, as a rule, reducing operational costs. An optimal utilization of the power line load capacity depends on the precise determination of the permissible current loads. The values of permissible currents and steady-state temperature are the main parameters of the line operating mode, affecting the strength and sag of the conductor. The temperature of the wire depends on weather conditions and current load. There are methods for determining the temperature and permissible currents for widely used traditional wires such as AC. They are partially outlined in the EIS (Electrical Installation Standard) and the standard of PJSC FGC UES (Federal Grid Company of Unified Energy System) of 2013. However, there is lack of studies in new types of wires. The paper considers the effect of weather conditions and load on the temperature and real-power losses in insulated and high-temperature wire, and solar radiation is under special consideration. For comparison, we present the results of calculations on traditional AC wires. The research shows that solar radiation, being taken into account, provides an increase of real-power losses of about 2 % with the given values of load and weather conditions. Calculations of permissible current values according to the developed technique for classical AC wires reveal a high coincidence with the values from PJSC FGC UES standard. The relative error is within two percent, and the proposed method is more generalized. It allows simultaneous analysis of both uninsulated and insulated wires. Due to the widespread use of self-supporting insulated wires, power industry experts can use the developed software in the design and operation of modern power lines to optimize capacity.

Keywords: heat balance equation, overhead power lines, wire temperature, active power loss, insulated wire, solar radiation, high temperature wires.

Повышение энергетической эффективности является одним из приоритетных направлений модернизации экономики России. На актуальность проблемы повышения энергетической эффективности указывается, в частности, в постановлении Правительства РФ от 15.04.2014 № 231 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Энергоэффективность и развитие энергетики».

Энергоемкость валового внутреннего продукта в России в 2 – 2,5 раза превышает показатели ведущих мировых государств, поэтому в Стратегии развития электросетевого комплекса России на период до 2020 года запланировано снижение энергоемкости отечественной экономики, превышающей 30 %. Рекомендуются обеспечить указанное снижение главным образом за счет реализации потенциала энергосбережения электросетевого комплекса Российской Федерации.

Одним из условий организации оптимального режима электрических сетей является минимизация потерь электрической энергии. При оценке эффективности мероприятий при снижении потерь особое значение играет точность определения потерь. Необходимость повышения точности расчета потерь требует учета температурной зависимости активного сопротивления [1 – 13]. Температура провода зависит от скорости и направления ветра, температуры воздуха, токовой нагрузки, атмосферного давления, солнечной радиации. Достаточно подробно воздействие солнечной радиации на температуру проводов представлено в статье [4]. Указывается, что солнечная радиация значительно влияет на ненагруженные провода. Температура в этом случае может увеличиться на 10 – 12 °С. Для плотности тока порядка 2 А/мм² нагрев обусловленный солнечной радиацией не превышает 3 – 5 °С. В работах [4, 5, 14] отмечается, что в умеренных широтах энергия солнца может увеличить температуру провода, эксплуатируемого в диапазоне допустимых температур, на 2 – 3 °С. В южных широтах с температурой окружающей среды порядка 45 °С в ясную погоду нагрев провода посредством солнечной радиации может достигать 15 – 16 °С [5]. Более существенное увеличение температуры провода в ясную погоду от воздействия солнечной радиации (до 22,5 °С) отмечается в исследованиях ОАО «Научно-исследовательский институт электроэнергетики (ВНИИЭ)» [15]. В источнике [15] указывается, что в зимнее время нагрев провода солнечным излучением можно не учитывать. Тем не менее, как показывают современные исследования [17], мощность солнечной радиации на приемной площадке под разными углами и в зимние месяцы может быть одного порядка с излучением в летние месяцы.

Указанные выше результаты были получены на основе исследований традиционных проводов АС. В данной работе приведены исследования современных высокотемпературных и самонесущих изолированных проводов воздушных линий электропередачи. Температуру изолированного провода в стационарном режиме можно найти исходя из уравнения теплового баланса на единицу длины линии электропередачи [10]:

$$\Delta P = d_{\text{пр}} \left[\pi \alpha_{\text{вын}} (\Theta_{\text{внеш}} - \Theta_{\text{окр}}) + \pi \varepsilon_{\text{п}} C_0 (T_{\text{внеш}}^4 - T_{\text{окр}}^4) - A_s q_{\text{солн}} \right], \quad (1)$$

где ΔP – потери активной мощности в проводе на единицу длины при температуре $\Theta_{\text{пр}}$; $d_{\text{пр}}$ – диаметр провода; $\alpha_{\text{вын}}$ – коэффициент теплоотдачи вынужденной конвекцией; $\Theta_{\text{внеш}}$ и $\Theta_{\text{окр}}$ соответственно температуры наружной поверхности провода и окружающей среды, °С; $\varepsilon_{\text{п}}$ – коэффициент черноты поверхности провода для инфракрасного излучения; $C_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная излучения абсолютно черного тела; $T_{\text{внеш}}$ и $T_{\text{окр}}$ – соответственно абсолютные температуры поверхности провода и окружающей среды; A_s – поглощательная способность поверхности провода для солнечного излучения; $q_{\text{солн}}$ – плотность потока солнечной радиации на провод.

Для определения $\alpha_{\text{вын}}$, $S_{\text{из}}$, $q_{\text{солн}}$ используются формулы [6, 8, 16, 10]:

$$\alpha_{\text{вын}} = 0,044 \frac{k_V (P_{\text{атм}} V)^{0,6}}{(T_{\text{окр}} d_{\text{пр}})^{0,4}}; \quad (2)$$

$$S_{из} = \frac{1}{2\pi\lambda_{из}} \ln \left(\frac{d_{пр}}{d_{ж}} \right); \quad (3)$$

$$q_{солн} = k_{зт} q_{спр} \sin \varphi_s + \pi q_{срасс}, \quad (4)$$

где k_V – коэффициент угла атаки ветра; $P_{атм}$ – атмосферное давление; V – скорость ветра; $S_{из}$ – тепловое сопротивление изоляции; $\lambda_{из}$ – коэффициент теплопроводности изоляции; $d_{ж}$ – диаметр токопроводящей жилы провода; $k_{зт}$ – коэффициент учитывающий затененность участков линии; $q_{спр}$ – плотность потока прямой солнечной радиации на поверхность, перпендикулярную солнечным лучам; φ_s – угол между осью провода и направлением солнечных лучей; $q_{срасс}$ – плотность потока рассеянной солнечной радиации.

Прямая солнечная радиация изменяется в течение года и в течение дня, поэтому при учете влияния солнечной радиации использовалась половина значения солнечной радиации на поверхности земли. Максимальное значение прямого солнечного излучения оценивается величиной в 1000 Вт/м² [18]. Годовое и суточное изменение имеет место и для рассеянной радиации. При расчетах использовалось усредненное значение 100 Вт/м², принятое на основе данных работы [18]. Коэффициент затененности $k_{зт}$ используется для учета длины линии, которая в среднем освещается солнцем в дневное время. Так как, как правило, большинство линий электропередачи эксплуатируется вдали от высоких сооружений, значение $k_{зт}$ принято равным 0,7. Для линий 10 кВ $k_{зт}$ может быть меньше из-за близости коммуникаций. Для линий 110 кВ с опорами большой высоты $k_{зт}$ допустимо увеличить.

В реальных условиях эксплуатации угол φ_s определяется средним азимутом провода и широтой местности. В данной работе $\varphi_s = 45^\circ$, что соответствует среднему значению между 0 и 90°.

Значение ΔP определяется по соотношениям:

$$\Delta P = \frac{\Delta P_0 (1 + \alpha \Theta_{внеш})}{1 - \alpha \Delta P_0 S_{из}} = \Delta P_0' (1 + \alpha \Theta_{внеш}) = \Delta P_0 (1 + \alpha \Theta_{пр}), \quad (5)$$

где $\Delta P_0 = I^2 r_0$ – потери активной мощности в проводе на единицу длины при температуре 0 °С; I – ток в проводе; r_0 – погонное активное сопротивление при температуре 0 °С; α – температурный коэффициент сопротивления; $\Theta_{пр}$ – температура провода.

Уравнение (1) получено при допущении равенства нулю температурного градиента внутри сердечника провода, т. е. $\text{grad } \Theta_{пр} = 0$. Это условие позволяет записать:

$$\Theta_{пр} = \Theta_{внеш} + \Delta P \cdot S_{из} = \frac{\Theta_{внеш} + \Delta P_0 S_{из}}{1 - \alpha \Delta P_0 S_{из}}. \quad (6)$$

Температуру неизолированного провода и потери активной мощности можно проводить на основе 1 при $S_{из} = 0$. В этом случае имеем:

$$\Delta P_0 (1 + \alpha \Theta_{пр}) = d_{пр} \left[\pi \alpha_{вын} (\Theta_{пр} - \Theta_{окр}) + \pi \varepsilon_n C_0 (T_{пр}^4 - T_{окр}^4) - A_s q_{солн} \right]. \quad (7)$$

Соотношения (1) – (7) были использованы для исследования поведения трех типов проводов:

- самонесущие изолированные провода СИП-3 1×95;
- высокотемпературные неизолированные АССР-405-Т16;
- неизолированные АС-240/32.

Условия численного эксперимента по указанным типам проводов представлены в таблице 1 [6, 16].

В таблицах 2 – 5 и на рисунках 1 – 4 представлены различные аспекты изучения потерь активной мощности и температуры для указанных типов проводов воздушных линий с учетом и без учета солнечной радиации.

Температура окружающей среды принята равной –20 °С (см. таблицы 2, 4) и –5 °С (см. таблицы 5). Допустимые токи вычислялись по уравнениям (5) – (7) без учета солнечной

радиации. В таблице 5 значение допустимого тока (780,5 А) получено с учетом поправочного коэффициента, равного 1,29 (минимальная температура окружающей среды -5°C) [19].

Таблица 1 – Условия численного эксперимента

Наименование и обозначение параметра	Численное значение		
	АССР-405-Т16 [20]	СИП-3 1×95	АС-240/32
Температура окружающей среды $\Theta_{\text{окр}}, ^{\circ}\text{C}$	-20	-20	-20 или -5
Допустимая температура $\Theta_{\text{доп}}, ^{\circ}\text{C}$	210	90	70
Коэффициент теплопроводности изоляции $\lambda_{\text{из}}, \text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$	–	0,4	–
Справочное погонное активное сопротивление при 20°C r_{20} или при 25°C (для провода АССР) r_{25} , Ом/км	0,1369	0,363	0,118
Атмосферное давление $P_{\text{атм}}, \text{Па}$	100000		
Скорость ветра V , м/с	1		
Коэффициент угла атаки ветра k_V	1		
Температурный коэффициент сопротивления $\alpha, ^{\circ}\text{C}^{-1}$	0,0043		
Диаметр провода $d_{\text{пр}}, \text{м}$	0,0201	0,016	0,0216
Диаметр токопроводящей жилы провода $d_{\text{ж}}, \text{м}$	–	0,0113	–
Плотность потока прямой солнечной радиации на поверхность, перпендикулярную солнечным лучам $q_s \text{ пр}, \text{Вт}/\text{м}^2$	500		
Плотность потока рассеянной солнечной радиации $q_s \text{ расс}, \text{Вт}/\text{м}^2$	100		
Коэффициент $k_{\text{зт}}$, учитывающий затененность участков линии	0,7		
Угол между осью провода и направлением солнечных лучей φ_s	$\pi/4$		
Степень черноты поверхности провода $\varepsilon_{\text{п}}$	0,6	0,8	0,6
Поглощательная способность поверхности провода для солнечного излучения A_s	0,6	0,9	0,6

Приведенные в таблицах 2 – 4 обозначения соответствуют следующим формулам:

$$\Delta\Theta_{\text{пр}} = \Theta_{\text{пр с}} - \Theta_{\text{пр}}; \quad (8)$$

$$\Delta\Theta = \Theta_{\text{внеш с}} - \Theta_{\text{пр с}}; \quad (9)$$

$$\varepsilon_{\Delta P} = \frac{\Delta P_{\text{р}}}{\Delta P} \cdot 100\%; \quad (10)$$

$$\Delta P_{\text{р}} = \Delta P_{\text{с}} - \Delta P; \quad (11)$$

$$\Delta\Theta_{\text{внеш}} = \Theta_{\text{внеш с}} - \Theta_{\text{внеш}}, \quad (12)$$

где $\Delta\Theta_{\text{пр}}$, $\Delta\Theta$, $\Delta\Theta_{\text{внеш}}$ – соответствующие формулам (8), (9), (12) разности температур; $\Delta P_{\text{р}}$ и $\varepsilon_{\Delta P}$ – абсолютная и относительная разности активной мощности.

Индекс «с» в формулах указывает на учет солнечной радиации.

Характер графиков на рисунке 1 свидетельствует, с одной стороны, о превышении активной мощности и температуры для провода АС-240/32 в случае учета солнечной радиации. При изменении плотности тока J диапазоны превышения активной мощности и температуры составляют соответственно 0,28 – 8,3 кВт/км и 4,37 – 5,31 $^{\circ}\text{C}$ (см. таблицу 2). С другой стороны, это превышение не очень большое. Максимальное относительное превышение $\varepsilon_{\Delta P}$ составляет 2,02 %. Максимальное превышение температуры жилы равно 5,31 $^{\circ}\text{C}$.

Особенностью графиков, представленных на рисунке 1, является увеличение разности потерь $\Delta P_{\text{р}}$ и разности температур $\Delta\Theta_{\text{пр}}$ провода при возрастании плотности тока. Данную особенность можно объяснить следующим образом. Любое увеличение температуры провода независимо от его причины приводит к росту потерь активной мощности (тепловыделение) вследствие возрастания сопротивления.

Таблица 2 – Результаты численного эксперимента для провода АС-240/32 при $I_{\text{расч доп}} = 1060 \text{ A}$

I , о.е.	I , A	Плотность тока J , A/мм ²	Без учета солнечной радиации		С учетом солнечной радиации		$\Delta\Theta_{\text{пр.}}$, °C	ΔP_p , кВт/км	$\epsilon_{\Delta P}$, %
			$\Theta_{\text{пр.}}$, °C	ΔP , кВт/км	$\Theta_{\text{пр.с.}}$, °C	ΔP_c , кВт/км			
0	0	0	-20,00	0	-15,63	0	4,37	0	0
0,2	212	0,88	-17,29	13,55	-12,88	13,83	4,41	0,28	2,02
0,4	424	1,77	-8,775	56,35	-4,238	57,49	4,54	1,14	1,98
0,6	636	2,65	6,767	135,6	11,52	138,3	4,75	2,7	1,95
0,8	848	3,53	31,72	266,2	36,76	271,3	5,04	5,1	1,88
1	1060	4,42	70,00	476,2	75,31	484,5	5,31	8,3	1,71

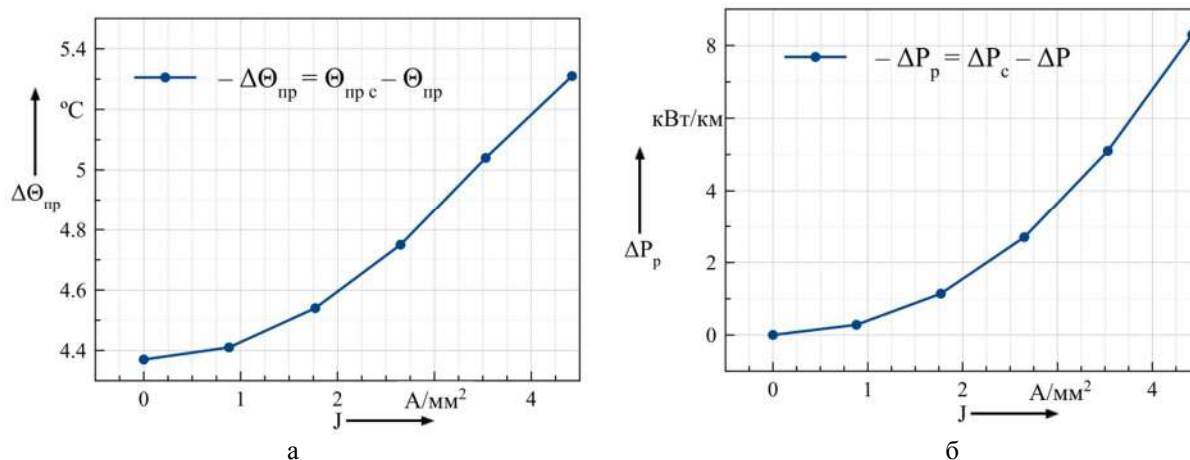


Рисунок 1 – Результаты исследования провода АС-240/32 при $I_{\text{расч доп}} = 1060 \text{ A}$

в зависимости от плотности тока: а – разность температур $\Delta\Theta_{\text{пр}}$; б – разность потерь активной мощности ΔP_p

В результате температура повышается еще больше. Таким образом, имеет место положительная обратная связь, которая тем сильнее, чем выше плотность тока (так как при этом рост потерь на 1° становится больше). Другими словами, при больших токах любой нагрев усиливает себя в большей степени, чем при малых токах. В рассматриваемом случае роль дополнительного нагрева играет нагрев, обусловленный солнечной радиацией.

Для провода СИП-3 в целом имеем аналогичную картину (рисунок 2 а, б). Изменения касаются незначительного количественного увеличения $\Delta\Theta_{\text{пр}}$, ΔP_p , $\epsilon_{\Delta P}$. Максимальные значения для $\Delta\Theta_{\text{пр}}$ составляют 7,2 °C и для ΔP_p – 9,2 кВт/км, для $\epsilon_{\Delta P}$ – 2,57 % (см. таблицу 3).

Таблица 3 – Результаты численного эксперимента для провода СИП-3 1×95 при $I_{\text{расч доп}} = 544,7 \text{ A}$

I , о.е.	I , A	Плотность тока J , A/мм ²	Без учета солнечной радиации			С учетом солнечной радиации			$\Delta\Theta_{\text{пр.}}$, °C	ΔP_p , кВт/км	$\epsilon_{\Delta P}$, %
			$\Theta_{\text{внеш.}}$, °C	$\Theta_{\text{пр.т.}}$, °C	ΔP , кВт/км	$\Theta_{\text{внеш.с.}}$, °C	$\Theta_{\text{пр.с.}}$, °C	ΔP_c , кВт/км			
0	0	0	-20	-20	0	-14,29	-14,29	0	5,71	0	0
0,2	108,94	1,15	-17,40	-16,89	11,04	-11,64	-11,12	11,33	5,77	0,29	2,56
0,4	217,88	2,29	-9,175	-7,045	46,17	-3,265	-1,079	47,39	5,97	1,22	2,57
0,6	326,82	3,44	6,062	11,24	112,3	12,23	17,54	115,2	6,3	2,9	2,52
0,8	435,76	4,59	31,13	41,48	224,4	37,62	48,23	229,9	6,75	5,5	2,39
1	544,7	5,73	70,96	90,00	412,7	77,74	97,20	421,9	7,2	9,2	2,18

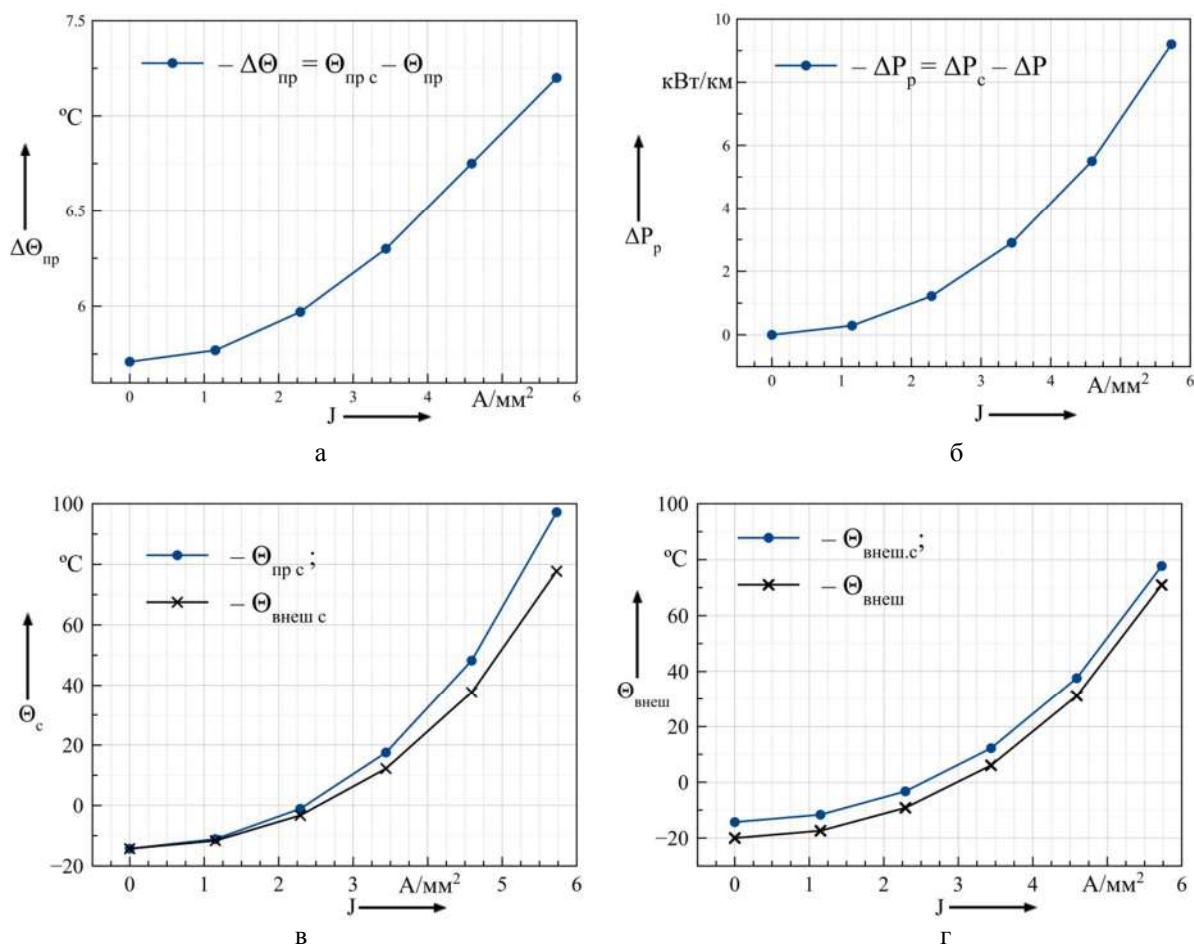


Рисунок 2 – Результаты исследования провода СИП-3 1×95 при $I_{\text{расч доп}} = 544,7 \text{ А}$ в зависимости от плотности тока: а – разность температур $\Delta\Theta_{\text{пр}}$; б – разность потерь активной мощности ΔP_p ; в – температура жилы $\Theta_{\text{пр с}}$ и поверхности провода $\Theta_{\text{внеш с}}$; температура поверхности провода $\Theta_{\text{внеш}}$ и $\Theta_{\text{внеш с}}$

Присутствие изоляции у провода СИП-3 дает возможность увеличить количество исследуемых параметров. Различные аспекты исследования представлены на рисунке 2. Все приведенные зависимости имеют соответствующее физическое толкование.

В частности, на рисунке 2, в увеличение расхождения величин $\Theta_{\text{пр с}}$ и $\Theta_{\text{внеш с}}$ при возрастании плотности тока соответствует уравнению (6).

Как следует, из данных таблиц 4 и 5, для проводов АССР-405-Т16 и АС-240/32 (при допустимом токе 780,5 А) тенденции изменения $\Delta\Theta_{\text{пр}}$ и ΔP_p соответствуют тенденциям изменения для проводов СИП-3 ($I_d = 544,7 \text{ А}$) и АС-240/32 ($I_d = 1060 \text{ А}$).

Таблица 4 – Результаты численного эксперимента для провода АССР-405-Т16 при $I_{\text{расч доп}} = 1370 \text{ А}$

I , о.е.	I , А	Плотность тока J , А/мм ²	Без учета солнечной радиации		С учетом солнечной радиации		$\Delta\Theta_{\text{пр.с}}$, °С	ΔP_p , кВт/км	$\epsilon_{\Delta P}$, %
			$\Theta_{\text{пр.с}}$, °С	ΔP_p , кВт/км	$\Theta_{\text{пр.с}}$, °С	ΔP_p , кВт/км			
0	0	0	-20,00	0	-15,75	0	4,25	0	0
0,2	274	1,34	-14,54	26,11	-10,20	26,62	4,34	0,51	1,92
0,4	548	2,67	3,409	113,0	7,998	115,2	4,59	2,2	1,91
0,6	822	4,01	39,34	293,0	44,33	298,4	4,99	5,4	1,81
0,8	1096	5,35	104,4	645,6	109,7	655,7	5,3	10,1	1,54
1	1370	6,68	210,0	1325	214,7	1339	4,7	14	1,05

Значение $\varepsilon_{\Delta P}$ для всех рассматриваемых проводов близки к 2 %. Таким образом, для всех типов проводов влияние солнечной радиации на потери составляет порядка 2 %. Одним из наглядных подтверждений этого факта является график, приведенный на рисунке 3, б.

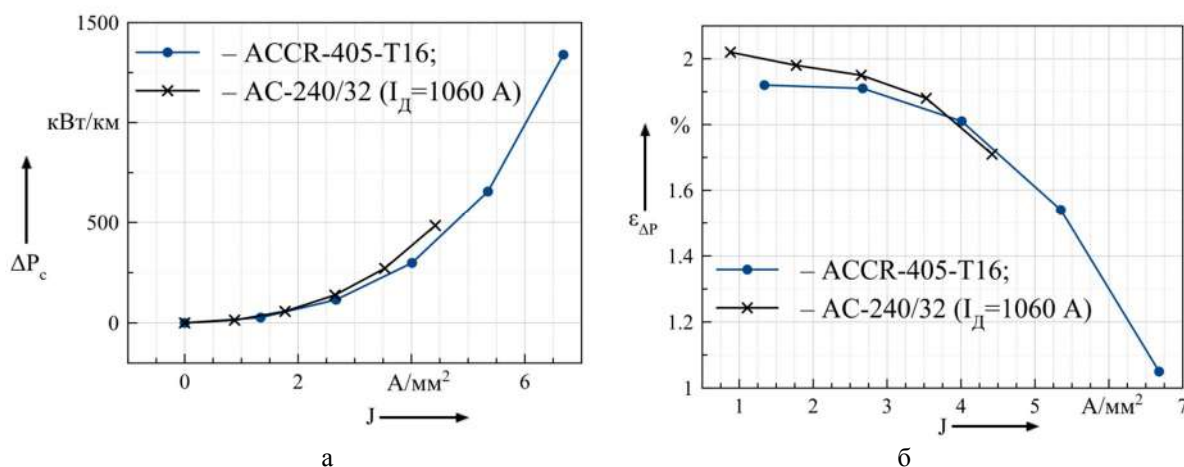


Рисунок 3 – Результаты исследования провода ACCR-405-T16 и AC-240/32 ($I_D = 1060$ A) в зависимости от плотности тока: а – потери активной мощности с учетом солнечной радиации ΔP_c ; б – относительные разности активной мощности $\varepsilon_{\Delta P}$

Вместе с тем различия в величинах допустимых токов и температур окружающей среды обуславливают и определенные различия в количественных изменениях величин ΔP_c . Допустимые токи $I_{\text{доп}}$ и температуру поверхности $\Theta'_{\text{внеш}}$ в случае естественной и вынужденной конвекций с учетом допустимых температур $\Theta_{\text{внеш. доп}}$ и $\Theta_{\text{пр доп}}$ предложено определять итерационным методом по формулам:

$$\Theta'_{\text{внеш}} = \Theta_{\text{окр}} + \left[\frac{\sqrt[4]{d_{\text{пр}}}}{0,0749\pi \sqrt{P_{\text{атм}}}} \sqrt{\frac{T_{\text{окр}}}{P_{\text{атм}}}} \left(\frac{\Delta P'_0}{d_{\text{пр}}} (1 + \alpha \Theta_{\text{внеш}}) - \right. \right. \\ \left. \left. - \pi \varepsilon_n C_0 (T_{\text{внеш}}^4 - T_{\text{окр}}^4) + A_s q_{\text{солн}} \right) \right]^{0,8}; \quad (13)$$

$$I'_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{d_{\text{пр}} \left[\frac{0,0749 \times \pi}{\sqrt[4]{d_{\text{пр}}}} \sqrt{\frac{P_{\text{атм}}}{T_{\text{окр}}}} (\Theta_{\text{внеш. доп}} - \Theta_{\text{окр}})^{1,25} + \right.}{r_0 (1 + \alpha \Theta_{\text{пр доп}})} \left. + \pi \varepsilon_n C_0 (T_{\text{внеш. доп}}^4 - T_{\text{окр}}^4) - A_s q_{\text{солн}} \right]}; \quad (14)$$

$$\Theta'_{\text{внеш}} = \Theta_{\text{окр}} + \frac{1}{\pi \alpha_{\text{вын}}} \left[\frac{\Delta P'_0}{d_{\text{пр}}} (1 + \alpha \Theta_{\text{внеш}}) - \right. \\ \left. - \pi \varepsilon_n C_0 (T_{\text{внеш}}^4 - T_{\text{окр}}^4) + A_s q_{\text{солн}} \right]; \quad (15)$$

$$I'_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{d_{\text{пр}} \left[\pi \alpha_{\text{вын}} (\Theta_{\text{внеш. доп}} - \Theta_{\text{окр}}) + \pi \varepsilon_n C_0 (T_{\text{внеш. доп}}^4 - T_{\text{окр}}^4) - A_s q_{\text{солн}} \right]}{r_0 (1 + \alpha \Theta_{\text{пр. доп}})}}, \quad (16)$$

где $\Theta_{\text{внеш. доп}}$ – максимально допустимая температура внешней поверхности, °C; $T_{\text{внеш. доп}}$ – максимально допустимая температура внешней поверхности, К; $\Theta_{\text{пр. доп}}$ – максимально допустимая температура провода, °C.

Таблица 5 – Результаты численного эксперимента для провода АС-240/32 при $I_{\text{расч доп}} = 780,5$ А

I , о.е.	I , А	Плотность тока J , А/мм ²	Без учета солнечной радиации		С учетом солнечной радиации		$\Delta \Theta_{\text{пр.}}$, °C	$\Delta P_{\text{р}}$, кВт/км	$\varepsilon_{\Delta P}$, %
			$\Theta_{\text{пр}}$, °C	ΔP , кВт/км	$\Theta_{\text{пр.с}}$, °C	$\Delta P_{\text{с}}$, кВт/км			
0	0	0	–5,000	0	–0,619	0	4,38	0	0
0,2	156,1	0,65	–3,427	7,825	0,976	7,975	4,4	0,15	1,88
0,4	312,2	1,3	1,405	31,96	5,872	32,57	4,47	0,61	1,87
0,6	468,3	1,95	9,851	74,51	14,43	75,91	4,58	1,4	1,84
0,8	624,4	2,6	22,55	139,4	27,28	141,975	4,73	2,58	1,85
1	780,5	3,25	40,51	233,1	45,41	237,3	4,9	4,2	1,77

Представляет интерес сравнение значений $I_{\text{доп}}$, полученных по уравнениям (13), (14), с величинами $I_{\text{доп}}$ стандарта ПАО ФСК ЕЭС [21] и ПУЭ [19]. Сравнения для температур окружающей среды минус 5 °C и минус 20 °C приведено в таблице 6. Следует отметить достаточно высокое совпадение результатов проведенных расчетов по уравнению (14) со значениями допустимых токов из стандарта. Относительные погрешности равны 1,3 и 1,9 % соответственно для температур окружающей среды минус 5 °C и минус 20 °C. Можно предположить, что совпадение будет более значительным, если учитывать коэффициент [21], связанный с ослаблением солнечной радиации в зимние месяцы. Расхождение с ПУЭ более значительное. Относительная погрешность составила 18 %.

Таблица 6 – Сравнение расчетных значений допустимого тока для провода АС-240/32 со стандартом ПАО ФСК ЕЭС

Температура окружающей среды $\Theta_{\text{окр}}$, °C	Допустимый ток, А			Относительная погрешность по отношению к ФСК ЕЭС	
	ФСК ЕЭС, $I_{\text{д1}}$	ПУЭ, $I_{\text{д2}}$	Предлагаемый метод, $I_{\text{д3}}$		
				$\varepsilon_1 = \frac{I_{\text{д1}} - I_{\text{д2}}}{I_{\text{д1}}} \cdot 100 \%$	$\varepsilon_2 = \frac{I_{\text{д1}} - I_{\text{д3}}}{I_{\text{д1}}} \cdot 100 \%$
–5	947	780,5	935	0,18	0,013
–20	1055	–	1035	–	0,019

Достоверность вычислений была проверена также [22] на основании сравнения с расчетами, основанными на стандартах CIGRE, IEEE [23].

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Для всех рассматриваемых в работе типов проводов и температуры окружающей среды – 5 °C и –20 °C, учет солнечной радиации приводит к увеличению потерь активной мощности в диапазоне 1,05 – 2,57 % при значительных изменениях плотности тока. Максималь-

ное увеличение соответствует проводу СИП-3. Относительные разности потерь активной мощности при увеличении нагрузки незначительно уменьшаются.

2. С увеличением плотности тока разности температур провода с учетом солнечной радиации и без учета солнечной радиации увеличиваются. Максимальное увеличение разности температур составляет 9,2 °С и соответствует проводу СИП-3.

3. Для стандартного провода АС-240/32 определено высокое совпадение результатов расчета допустимых токов по предлагаемой методике со значениями стандарта ПАО ФСК ЕЭС. Относительная погрешность не превышает 2 %.

4. Разработанная методика применима не только для стандартных неизолированных проводов типа АС, но и для проводов повышенной пропускной способности и самонесущих изолированных проводов.

Список литературы

1. Шведов, Г. В. Оценка влияния метеоусловий на годовые нагрузочные потери электроэнергии в проводах воздушных линий [Текст] / Г. В. Шведов, А. Н. Азаров // Электричество. – 2016. – № 2. – С. 11 – 18.

2. Оценка влияния метеорологических условий на активное сопротивление проводов воздушных линий электропередачи [Текст] / Г. К. Зарудский, Г.В. Шведов и др. // Вестник МЭИ / МЭИ. – М. – 2014. – № 3. – С. 35 – 39.

3. Воротницкий, В. Э. Оценка погрешностей расчёта переменных потерь электроэнергии в ВЛ из-за неучёта метеоусловий [Текст] / В. Э. Воротницкий, О. В. Туркина // Электрические станции. – 2008. – № 10. – С. 42 – 49.

4. Левченко, И. И. Нагрузочная способность воздушных линий электропередачи в экстремальных погодных условиях [Текст] / И. И. Левченко, Е. И. Сацук // Электричество. – 2008. – № 4. – С. 2 – 8.

5. Герасименко, А. А. Учет схемно-режимных и атмосферных факторов при расчете технических потерь электроэнергии в распределительных сетях [Текст] / А. А. Герасименко, Г. С. Тимофеев, А. В. Тихонович // Журнал Сибирского федерального университета. Сер. Техника и технологии / Сибирский федеральный ун-т. – Красноярск. – 2008. – № 2. – С. 188 – 206.

6. Упрощенная формула для нагрузочных потерь активной мощности в линиях электропередачи с учетом температуры [Текст] / С. С. Гиршин, В.М. Троценко и др. // Омский научный вестник / Омский гос. техн. ун-т. – Омск. – 2018. – № 6 (162). – С. 41 – 49.

7. Алгоритм расчета потерь в изолированных проводах линий электропередачи с учетом температуры токопроводящих жил [Текст] / Е. В. Петрова, В. Н. Горюнов и др. // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность! / Омский гос. техн. ун-т. – Омск. – 2013. – № 2. – С. 306 – 308.

8. A mathematical model of steady-state thermal regime of insulated overhead line conductors / V.N. Goryunov [et al] // 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), June 7 – 10, 2016. Florence, 2016. P. 7555481-1–7555481-5. DOI: 10.1109/EEEIC.2016.7555481

9. Анализ погрешностей расчета температуры и потерь мощности по базовому и приближенному уравнениям теплового баланса воздушных линий электропередач [Текст] / В. Н. Горюнов, С. С. Гиршин и др. // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1-1. – С. 210.

10. Аналитическое решение уравнения теплового баланса провода воздушной линии в условиях вынужденной конвекции [Текст] / Е. В. Петрова, С. С. Гиршин и др. // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1. – С. 218.

11. Гиршин, С. С. Расчет и анализ потерь активной мощности в элементах сети на основе аналитических выражений с учетом температурной зависимости сопротивлений [Текст] / С. С. Гиршин, Е. В. Петрова, В. И. Суриков // Омский научный вестник / Омский гос. техн. ун-т. – Омск. – 2013. – № 1 (117). – С. 152 – 156.

12. Расчет установившейся температуры провода воздушной линии электропередачи [Текст] / А. С. Засыпкин, А. Н. Щуров и др. // Известия вузов: Северо-Кавказский регион. – 2015. – № 2. – С. 58 – 63.
13. Учет температуры проводов повышенной пропускной способности при выборе мероприятий по снижению потерь энергии на примере компенсации реактивной мощности [Текст] / А. Я. Бигун, С. С. Гиршин и др. // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1-1. – С. 212.
14. Поспелов, Г. Е. Влияние температуры проводов на потери электроэнергии в активных сопротивлениях проводов воздушных линий электропередачи [Текст] / Г. Е. Поспелов, В. В. Ершевич // Электричество. – 1973. – № 10. – С. 81 – 83.
15. Никифоров, Е. П. Предельно допустимые токовые нагрузки на провода действующих ВЛ с учетом нагрева провода солнечной радиации [Текст] // Электрические станции. – 2006. – № 7. – С. 56 – 59.
16. Simplified formula for the load losses of active power in power lines taking into account temperature / S. S. Girshin, O. V. Kropotin et al // Przegląd elektrotechniczny. – 2019. – Vol. 07. – P. 42 – 46.
17. Оценка влияния распределенной солнечной генерации на энергоэффективность электросетевой организации [Текст] / А. В. Ковырьков, И. А. Морсин и др. // Энергосбережение – теория и практика: – Труды 9-й междунар. школы-семинара молодых ученых и специалистов/ МЭИ. – М. – 2018. – № 3. – С. 187 – 191.
18. Хромов, С. П. Метеорология и климатология [Текст] / С. П. Хромов, М. А. Петросянц/ МГУ. – М., 2012. – 584 с.
19. Правила устройства электроустановок. – М.: Кнорус, 2015. – 488 с.
20. Справочник по проектированию электрических сетей [Текст] / Под ред. Д. Л. Файбисовича. – М.: Энас, 2012. – 376 с.
21. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС»: СТО 56947007-29.240.55.143-2013. Методика расчета предельных токовых нагрузок по условиям сохранения механической прочности проводов и допустимых габаритов воздушных линий [Текст] / ОАО «ФСК ЕЭС». – М., 2013. – 42 с.
22. Применение стандарта CIGRE для экспертной оценки программы расчета потерь электрической энергии с учетом температуры проводников [Текст] / Е. В. Петрова, С. С. Гиршин и др. // Омский научный вестник / Омский гос. техн. ун-т. – Омск. – 2013. – № 2 (120). – С. 198 – 202.
23. Numerical study of the thermal behaviour of bare overhead conductors in electrical power lines / F. Á. Gómez, J.M. García de María et al // ACELAE'11 Proceedings of the 10th WSEAS international conference on communications, electrical & computer engineering, and 9th WSEAS international conference on Applied electromagnetics, wireless and optical communications. – 2011. – P. 149 – 153.

References

1. Shvedov G. V., Azarov A. N. Estimating the need to consider the actual meteorological conditions in calculating annual load losses of electric energy in the wires of overhead power lines [Ocenka vliyaniya meteouslovij na godovye nagruzochnye poteri elektroenergii v provodah vozdushnyh linij]. Elektrichestvo – Electrical Technology Russia, 2016, no. 2, pp. 11 – 18.
2. Zarudskij G. K., Shvedov G. V., Azarov A. N. [et al.] Evaluation of influence of meteorological factors on onmic resistance of conductors of overhead power transmission line [Ocenka vliyaniya meteorologicheskikh uslovij na aktivnoe soprotivlenie provodov vozdushnyh linij elektropereдачи]. Vestnik MEI – Bulletin of Moscow power engineering institute, 2014, no. 3, pp. 35 – 39.
3. Vorotnickij V. E., Turkina O. V. Evaluation of errors in calculating variable electricity losses in overhead lines due to neglect of weather conditions [Ocenka pogreshnostej raschyota peremennyh poter' elektroenergii v vl iz-za neuchyota meteouslovij]. Elektricheskie stancii – Power Tech-

nology and Engineering, 2008, no. 10, pp. 42 – 49.

4. Levchenko I. I., Sacuk E. I. Loading Capacity and Monitoring of Overhead Power Transmission Lines Under Extreme Weather Conditions [Nagruzochnaya sposobnost' vozduzhnyh linij elektropredachi v ekstremal'nyh pogodnyh usloviyah]. *Elektrichestvo – Electrical Technology Russia*, 2008, no. 4, pp. 2 – 8.

5. Gerasimenko A. A., Timofeev G. S., Tihonovich A. V. The Accounting of Regime and Atmosphere Factors in Calculation of Technical Loss of Electricity in Distributive Network [Uchyot skhemno-rezhimnyh i atmosferynyh faktorov pri raschyote tekhnicheskikh poter' elektroenergii v raspredelitel'nyh setyah]. *ZHurnal SFU. Tekhnika i tekhnologii – Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2008, no. 2, pp. 188 – 206.

6. Girshin S. S., Trocenko V.M., Goryunov V.N., Kropotin O.V., Shepelev A.O., Tkachenko V.A. Simplified formula for active power load losses in transmission lines taking into account temperature dependence [Uproshchennaya formula dlya nagruzochnykh poter' aktivnoj moshchnosti v liniyah elektropredachi s uchetom temperatury]. *Omskij nauchnyj vestnik – Omsk Scientific Bulletin*, 2018, no. 6 (162), pp. 41 – 49.

7. Petrova E.V., Goryunov V.N., Kirichenko N.V., Bigun A.YA., Hristich D.E. Algoritm rascheta poter' v izolirovannykh provodakh linij elektropredachi s uchetom temperatury tokoprovodnyashchih zhil. *Rossiya molodaya: peredovye tekhnologii – v promyshlennost'.* – *Russia is young: advanced technology into industry*, 2013, no. 2, pp. 306 – 308.

8. Goryunov V. N., Girshin S. S., Kuznetsov E. A. [et al.]. A mathematical model of steady-state thermal regime of insulated overhead line conductors // 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), June 7 – 10, 2016. Florence, 2016. P. 1–5.

9. Goryunov V. N., Girshin S. S., Kuznecov E. A., Petrova E. V. The analysis of temperature calculation error and power losses in considering basic and approximate heat balance equations of overhead power lines [Analiz pogreshnostej rascheta temperatury i poter' moshchnosti po bazovomu i priblizhennomu uravneniyam teplovogo balansa vozduzhnyh linij elektropredach]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya – Modern problems of science and education*, 2015, no. 1, pp. 210.

10. Petrova E. V., Girshin S. S., Lyashkov A. A., Bigun A. Ya. The analytical decision of the equation of thermal balance of the wire of the air-line in the conditions of compelled convection [Analiticheskoe reshenie uravneniya teplovogo balansa provoda vozduшной linii v usloviyah vynuzhdennoj konvekcii]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya – Modern problems of science and education*, 2015, no. 1, pp. 218.

11. Girshin S. S., Petrova E. V., Surikov V. I. Calculation and analysis of active power losses in the network elements based on analytical expressions taking into account the temperature dependence of resistivity [Raschet i analiz poter' aktivnoj moshchnosti v elementah seti na osnove analiticheskikh vyrazhenij s uchetom temperaturnoj zavisimosti soprotivlenij]. *Omskij nauchnyj vestnik – Omsk Scientific Bulletin*, 2013, no. 1 (117), pp. 152 – 156.

12. Zasyupkin A. S., SHCHurov A. N., Zasyupkin (ml.) A. S., Teterin A. D. Calculation of the established temperature of overhead power line wire [Raschyot ustanovivshejsya temperatury provoda vozduшной linii elektropredachi]. *Izvestiya Vuzov. Severo-Kavkazskij region. – University news north-caucasian region technical sciences series*, 2015, no. 2, pp. 58 – 63.

13. Bigun A. Ya., Girshin S. S., Petrova E. V., Goryunov V. N. Accounting conductor temperature increased bandwidth when selecting measures to reduce energy loss by the example of reactive power compensation [Uchet temperatury provodov povyshennoj propusknosti pri vybore meropriyatij po snizheniyu poter' energii na primere kompensacii reaktivnoj moshchnosti]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya – Modern problems of science and education*, 2015, no. 1, pp. 212.

14. Pospelov G. E., Ershevich V. V. The effect of wire temperature on energy losses in the active resistances of the wires of overhead power lines [Vliyanie temperatury provodov na poteri elektroenergii v aktivnykh soprotivleniyakh provodov vozduzhnyh linij elektropredachi]. *Elektrichestvo – Electrical Technology Russia*, 1973, no. 10, pp. 81 – 83.

15. Nikiforov E. P. Maximum permissible current loads on the wires of existing overhead lines, taking into account the heating of the solar radiation wire [Predel'no-dopustimye tokovye nagruzki na provoda dejstvuyushchih VL s uchetom nagreva provoda solnechnoj radiacii]. *Elektricheskie stancii – Power Technology and Engineering*, 2006, no. 7, pp. 56 – 59.

16. Simplified formula for the load losses of active power in power lines taking into account temperature / S. S. Girshin, Kropotin O.V, Trotsenko V.M, A. O. Shepelev, E. V. Petrova, V. N. Goryunov, // Przegląd elektrotechniczny. – 2019. – Vol. 07. – P. 42–46. – DOI: 10.15199/48.2019.07.10.

17. Kovyrkov A. V., Morsin I. A., CHorshanbiev S. R., Shvedov G. V. Assessment of the impact of distributed solar generation on energy efficiency of an electric grid organization [Ocenka vliyaniya raspredelennoj solnechnoj generacii na energoeffektivnost' elektrosetevoj organizacii]. *Sbornik energosberezhenie: teoriya i praktika-trudy Devyatoj Mezhdunarodnoj shkoly seminar molodyh uchenykh i specialistov – Collection of Energy Saving: Theory and Practice-Proceedings of the Ninth International School of the Seminar for Young Scientists and Specialists*, 2018, no. 3, pp. 187–191.

18. Hromov S. P., Petrosyanc M. A. Meteorologiya i klimatologiya: 8-e izd. pererab. i dop. (Meteorology and climatology: 8th ed., Rev. and add.) Moscow: MGU Publ., 2012. 584 p.

19. Pravila ustrojstva elektroustanovok (Electrical Installation Rules). Moscow: Knorus Publ., 2015, 488 p.

20. Fajbisovich D. L. Spravochnik po proektirovaniyu elektricheskikh setej: 4-e izd., pererab. i dop. (Handbook of Electrical Design: 4th ed., Rev. and add.) Moscow: ENAS Publ., 2012, 376 p.

21. Metodika raschyota predel'nyh tokovykh nagruzok po usloviyam sohraneniya mekhanicheskoy prochnosti provodov i dopustimyh gabaritov vozdukhnykh linij (Methods for calculating the limiting current loads according to the conditions of maintaining the mechanical strength of the wires and the permissible dimensions of overhead lines). Moscow, OAO «FSK EES», 2013, 115 p.

22. Petrova E. V., Girshin S. S., Kirichenko N. V., Pticyna E. V., Kuznecov E. A. Application of the CIGRE standard for expert evaluation of the program for calculating electric energy losses taking into account the temperature of conductors [Primenenie standarta CIGRE dlya ekspertnoj ocenki programmy rascheta poter' elektricheskoy energii s uchetom temperatury provodnikov]. *Omskij nauchnyj vestnik – Omsk Scientific Bulletin*, 2013, no. 2 (120), pp. 198 – 202.

23. Alvarez Gomez F., De Maria Garcia J.M., García Puertas D., Bañri A., Granizo Arrabe R. Numerical study of the thermal behaviour of bare overhead conductors in electrical power lines // ACELA'E'11 Proceedings of the 10th WSEAS international conference on communications, electrical & computer engineering, and 9th WSEAS international conference on Applied electromagnetics, wireless and optical communications, 2011. P. 149 – 153.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Петрова Елена Владимировна

Омский государственный технический университет (ОмГТУ).

Мира пр., д. 11, г. Омск, 644050, Российская Федерация.

Доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», ОмГТУ.

Тел.: +7 (3812) 65-36-82.

E-mail: evpetrova2000@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Petrova Elena Vladimirovna

Omsk State Technical University (OmSTU).

11, Mira st., Omsk, 644050, the Russian Federation.

Associate Professor of the department «Industrial enterprises power supply», OmSTU.

Phone: +7 (3812) 65-36-82.

E-mail: evpetrova2000@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ СТАТЬИ

ОПИСАНИЕ

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Петрова, Е. В. Оценка влияния солнечной радиации на нагрузочные потери активной мощности в высокотемпературных и самонесущих изолированных проводах линий электропередачи [Текст] / Е. В. Петрова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 3 (39). – С. 134 – 145.

Petrova E. V. Assessment of solar radiation effect on real-power losses under load in high-temperature and self-supporting insulated wires of power lines. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2019, vol. 3, no. 39, pp. 134 – 145 (In Russian).

Уважаемые коллеги!

Редакция научно-технического журнала «Известия Транссиба» приглашает Вас публиковать результаты научных исследований по тематическим направлениям журнала:

- подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация;
- железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог;
- транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте;
- совершенствование промышленных теплосистем, теплотехнического и теплового оборудования;
- электрические станции и электроэнергетические системы;
- энергетические системы и комплексы;
- автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Материалы просим высылать ответственному секретарю редакционной коллегии журнала Иванченко Владимиру Ивановичу по электронной почте: izvestia_transsiba@mail.ru.

Правила представления рукописей научных статей в научно-технический журнал «Известия Транссиба»

В редакцию журнала представляется:

рукопись статьи на белой бумаге формата А4 в двух экземплярах, а также в электронном виде (на любом носителе или по e-mail), имя файла определяется по фамилии первого автора: фамилия.doc;

экспертное заключение о возможности опубликования статьи в открытой печати.

Рукопись статьи включает в себя УДК, ФИО авторов, аффилиацию (место работы или учебы) авторов, название статьи, аннотацию, ключевые слова (5 – 10 слов) на русском и английском языках, текст статьи, список литературы (не менее 10 наименований), транслитерацию списка литературы в романском алфавите, сведения об авторах и библиографическое описание статьи на русском и английском языках.

Рукопись статьи оформляется в соответствии с образцом.

Сведения об авторах включают в себя фамилию, имя, отчество, ученую степень и звание, место работы с указанием почтового адреса, должность, контактные телефоны, e-mail для обратной связи.

Один экземпляр текста статьи должен быть подписан всеми авторами на оборотной стороне каждой страницы.

Требования к аннотации статьи:

аннотация должна быть кратким точным изложением содержания статьи, включающим в себя основные фактические сведения и выводы описываемой работы;

текст аннотации должен быть лаконичным и четким, свободным от второстепенной информации, должен отличаться убедительностью формулировок;

сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте аннотации;

объем аннотации на русском и английском языках должен содержать от 200 до 250 слов;

аннотация на русском и английском языках должна включать в себя следующие аспекты содержания статьи: предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы;

дополнительно англоязычная аннотация должна быть оригинальной (не быть калькой русскоязычной аннотации); содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье); англоязычной (написанной качественным английским языком); необходимо использовать активный, а не пассивный залог.

Требования к рукописи статьи:

рукопись статьи должна содержать УДК (в левом верхнем углу, обычный, 12 пт), инициалы и фамилию на русском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на русском языке (по центру, 10 пт), название статьи на русском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), инициалы и фамилию на английском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на английском языке (по центру, 10 пт), название статьи на английском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт);

текст статьи должен быть набран в редакторе Word, размер страницы: формат А4 (210 × 297 мм);

размер полей: 20 мм (все четыре поля), размер и тип шрифта основного текста: Times New Roman, 12 пт;

размеры символов в формулах (Equation): обычный – 12 пт, крупный индекс – 7, мелкий – 5, крупный символ – 15, мелкий – 12 пт;

буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавитов, математические символы такие, например, как cos, sin, max, min, – прямым шрифтом;

текст в таблицах, подписанные подписи и названия таблиц набираются шрифтом Times New Roman, 10 пт;

межстрочный интервал одинарный, абзацный отступ – 0,75 см;

каждый рисунок дополнительно должен быть представлен в оригинальном файле (формат JPEG или TIFF, разрешение – не ниже 300 пикс/дюйм);

рисунки, выполненные в редакторе Word, должны быть вставлены как объект;

после текста статьи следует список литературы на русском языке и в романском алфавите (латинице) с переводом названий литературных источников на английский язык;

ссылки на литературу в тексте статьи указываются в квадратных скобках, список литературы имеет заголовок *Список литературы* (более 10 наименований), библиографическое описание источников на русском языке оформляется по требованиям ГОСТ 7.1-2003;

в романском алфавите (латинице) список литературы имеет заголовок *References* и оформляется по следующему образцу: Author1 A.A., Author2 A.A., Author3 A.A., Author4 A.A., Author5 A.A. Title of article [Nazvanie stat'i v romanskom alfavite]. Nazvanie zhurnala v romanskom alfavite – *Title of Journal*, 2014, no. 1, pp. 54 – 57.

Рукописи статей, опубликованных ранее или переданных в другие издания, не принимаются.

Число соавторов не должно превышать трех человек. Рекомендуемый объем статьи – не менее пяти и не более 10 страниц. В ином случае вопрос по объему статьи необходимо согласовать с редакцией журнала. Иллюстрации, схемы, таблицы, включаемые в текст статьи, учитываются в общем объеме текста.

Авторы должны избегать повторения одних и тех же данных в таблицах, на графиках и в тексте статьи.

В случае представления двух или более статей одновременно необходимо указывать желательную очередность их публикации.

В случае возвращения статьи автору для устранения замечаний или для ее сокращения датой представления статьи считается день получения редакцией журнала окончательного текста.

Принятые к публикации рукописи статей не возвращаются авторам.

Материалы, оформленные не в соответствии с указанными выше требованиями, не принимаются к публикации и не возвращаются.

Редакционный совет оставляет за собой право литературного редактирования статьи без согласования с авторами.

Научное издание

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

№ 3 (39) 2019

Научно-технический журнал «Известия Транссиба» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 03 июня 2009 г., свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-75780 от 23 мая 2019 г.

Номер ISSN – 2220-4245.

Подписной индекс в общероссийском каталоге НТИ агентства «Роспечать» – 66087.

Издание обрабатывается в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦа).

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Издание выходит с периодичностью 4 номера в год.

Цена свободная.

Редактор – Майорова Н. А.

Компьютерная верстка – Иванченко В. И.

Адрес редакции (издательства) и типографии: 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35;
тел.: (3812) 31-05-54; e-mail: izvestia_transsiba@mail.ru

Подписано в печать 20.12.2019.

Тираж 500 экз.

Дата выпуска: 20.12.2019.

