ОАО «Российские железные дороги» (РЖД)
Красноярская железная дорога – филиал ОАО «РЖД»
АО «Дорожный центр внедрения Красноярской железной дороги»
ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения»
(ИрГУПС)
Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал ИрГУПС
(КрИЖТ ИрГУПС)

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ И РЕМОНТ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА (ТОиР)

ТРУДЫ

ВТОРОЙ ВСЕРОССИЙСКОЙ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

(март 2025 года, г. Красноярск)

Красноярск
Издательство ДЦВ Красноярской ж. д.
2025

УДК 629
Т38

Техническое обслуживание и ремонт подвижного состава: труды второй всероссийской с международным участием научно-практической конференции (март 2025 года, г. Красноярск) – Красноярск: ДЦВ Красноярской ж. д., 2025 г. – 368 с., Ил. 201, фото 127, табл. 23, библиогр. 351 назв.

Настоящее издание подводит итог работы второй всероссийской с международным участием (Китай, Беларусь) научно-практической конференции (НПК) «Техническое обслуживание и ремонт подвижного состава» (ТОиР), организованной и проведенной Дорожным центром внедрения Красноярской железной дороги совместно с Красноярским институтом железнодорожного транспорта (КРИЖТ ИрГУПС) в марте 2025 года с очным пленарным заседанием 27 – 29 марта в городе Красноярске. НПК приурочена к 25-летию ДЦВ Красноярской ж. д.

В работе НПК участвовали более 120 человек (из них очно – 71) из трёх стран из 35 организаций и 15 городов. Научный состав конференции: 21 доктор наук, 27 кандидатов наук.

Сборник трудов конференции рассчитан на ученых и специалистов в области производства, эксплуатации, диагностирования, технического обслуживания и ремонта подвижного состава, в том числе связанных с электронным и микропроцессорным оборудованием локомотивов. Сборник будет интересен студентам и аспирантам.

Не содержит материалов, представляющих государственную или коммерческую тайны. При использовании настоящего материала ссылки на сборник обязательны. Названия программных продуктов, изделий, фирм и др., встречающиеся в тексте, являются зарегистрированными товарными знаками соответствующих производителей. Статьи публикуются в авторской редакции.

Общая редакция: доктор технических наук, профессор И. К. Лакин.

Редакционная коллегия:

к.т.н. В. В. Семченко, А. А. Малышко, Л. В. Чернова, Е. Г. Шароглазов, Е. В. Эрлих.

Экспертный научный совет и рецензенты: доктора наук Е. Е. Савченко, В. В. Грачёв, А. С. Космодамианский, С. Г. Шантаренко, О. В. Мельниченко, Н. Г. Шабалин, кандидаты наук И. В. Пустовой, Е. С. Ильин, Ж. М. Мороз, В. С. Томилов.

ISBN 978-5-905401-11-4

© АО «ДЦВ Красноярской ж.д., 2025
© КРИЖТ ИРГУПС, 2025
© Коллектив авторов, 2025

СЕМЧЕНКО Виктор Васильевич
Генеральный директор
АО «ДЦВ Красноярской ж.д.»,
кандидат технических наук,
почётный железнодорожник

22 марта 2025 года исполнилось 25 лет с момента создания акционерного общества «Дорожный центр внедрения Красноярской железной дороги». Для Общества – это важный этап совместной работы. Много сделано, есть существенные достижения. Совет Директоров ДЦВ Красноярской ж.д. принял решение о проведении второй всероссийской с международным участием научно-практической конференции (НПК) на актуальную для ДЦВ научно-практическую тему: «Техническое обслуживание и ремонт подвижного состава» (ТОиР). На НПК ДЦВ поделился накопленным технологическим опытом, проведены электронные стендовые доклады, состоялся обмен мнениями по эксплуатации, диагностике и ТОиР, проблемам ТОиР и подвижного состава. Приняты совместные решения.

Первая НПК успешно прошла в 2020-м году. Большой популярностью пользовались стендовые доклады. Перенесённая пандемия научила страну широко использовать дистанционные технологии взаимодействия. Поэтому было решено провести в течение марта 2025 года электронные стендовые доклады, для чего был создан специально разработанный сайт npk.dcv.ru.

На конференции собрались специалисты в области проектирования, производства, эксплуатации, ТОиР железнодорожного подвижного состава и его оборудования, включая электронные и микропроцессорные системы.

В настоящем сборнике мы не только публикуем статьи (стендовые доклады) участников конференции, но и постарались передать дух конференции, которая прошла на высоком профессиональном уровне, стала важным местом общения специалистов в области ТОиР и цифровых технологий. Подведён итог в виде Решений конференции. Надеюсь, что настоящая публикация понравится специалистам в области производства, эксплуатации, диагностирования и ТОиР.

Встречающиеся в документе названия программных продуктов, оборудования, изделий, символов, фирм и др. являются зарегистрированными товарными знаками соответствующих компаний.

Материал приведён в предоставленном авторами виде с редакционными правками и устранёнными замеченными опечатками.

При использовании настоящего материала ссылки на издание обязательны.

ИРГУПС КРИЖТ
ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ
ОмГУПС
ИРГУПС
РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА (МИИТ)
ЗабИЖТ
БелГУТ
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА
БГТУ
ТМХ ЛокоТех
НИИТКД
желдорреммаш
НПЦ ПРОМТЕХ npcpt.com
НИИАС
ЭВРЗ
ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО ЭЛЕКТРОВЫПРЯМИТЕЛЬ
ВНИИЖТ
ПИИТ программный инжиниринг и технологии
РЕШЕТНЕВ
ГУДОК
ТОКСТЭЛ
ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС
ЛОКОМОТИВ
ИВТ
ИНЖИНИРИНГОВЫЙ ЦЕНТР ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
HYTIMES Electronic Technology
ChunZheng
CHUNZHENG

25 ЛЕТ РАЗВИТИЯ ДЦВ КРАСНОЯРСКОЙ Ж.Д.

к.т.н. СЕМЧЕНКО Виктор Васильевич,
генеральный директор АО «ДЦВ Красноярской ж.д.»

Закрытое акционерное общество

«Дорожный центр внедрения Красноярской железной дороги»

образовано 22.03.2000 по распоряжению МПС РФ №271у от 31.08.1999

Учредители ЗАО «ДЦВ Красноярской ж.д.»

Закрытое акционерное общество
"Отраслевой центр внедрения новой техники и технологий"
размер доли участия - 51% уставного капитала

Открытое акционерное общество
"Российские железные дороги"
размер доли участия - 49% уставного капитала

Во исполнение Указания МПС № 271 от 31.08.1999 на Красноярской железной дороге 22 марта 2000 года создано Общество – ЗАО «ДЦВ Красноярской ж. д.» (теперь АО)

Из множества направлений работы отрасли для ДЦВ Красноярской ж.д. главным стало техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) электронного оборудования электровозов.

Основные цели создания Дорожных Центров Внедрения на сети дорог:

- практическая реализация результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ
- достижение наибольшей эффективности от их внедрения
- улучшение качественных показателей работы железнодорожного транспорта
- сокращение потребляемых ресурсов

Место внедрения	БУВИП	БИП	БОРТ	САУВ	СМБ	Гребнесмазыватели АГС-8	Стенд контроля блоков управления АГС	Стенд для испытания форсунок АГС-8	Устройство заправочное передвижное УЗП1	ОМСД	КМБ	УСТА	АПК для машиниста	КПА	"Тольфстрим"	Рельсосмазыватели ВНИТИ	Прогноз	ДЭСТА	Кедр	Доктор 30М	Кипарис	Комплекс для обучения машинистов	Комплекс для учета расходов электроэнергии	Комплекс для расчета оптимального режима ведения поезда	"УМ 19У"	Устройство для развески локомотивов	Стенд для испытания плунжерных пар	Стенд для испытания насосов дизелей	Оборудование для восстановления подвижного состава	Оборуд. для восстан. автосцепного уст-ва	Система отопления "ОВЕД"	Система автоматич. управления температур теплоносителей дизеля тепловоза
ТЧ-1 Боготол	96	34		110	83	20				1	1		1				1							1		1			1	1	60	
ТЧ-2 Красноярск			36										1			11	1		1	2	1		1	1					1		40	
ТЧ-3 Иланск			35			20				1						1	1							1						1		
ТЧ-5 Ачинск			61			40			1			40		1	10	2	3	4			1	1			1						30	20
ТЧ-7 Абакан			38			40	1	1	1		2				10	9	3	2		2	1	1	1		1		1	1	1	1	30	
Итого	**96**	**34**	**170**	**110**	**83**	**120**	**1**	**1**	**2**	**2**	**3**	**40**	**2**	**1**	**20**	**23**	**9**	**6**	**1**	**4**	**3**	**2**	**2**	**3**	**2**	**1**	**1**	**1**	**3**	**3**	**160**	**20**
Гарантия	**0**	**0**	**105**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**10**	**0**	**0**	**20**	**7**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**2**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**10**
Пост. гарантия	**96**	**34**	**65**	**110**	**83**	**120**	**1**	**1**	**2**	**2**	**3**	**30**	**2**	**1**	**0**	**16**	**9**	**6**	**1**	**4**	**3**	**2**	**2**	**3**	**0**	**1**	**1**	**1**	**3**	**3**	**160**	**10**
Годовой экономич. эффект (млн.руб.)	**22,77**	**0,099**	**20,807**	**13,35**	**18,1**	**3,6**	**0,018**	**0,015**	**0,054**	**3,772**	**2,13**	**4,14**	**0,134**	**0,128**	**11,86**	**19,55**	**1,8**	**0,822**	**0,03**	**0,56**	**1,317**	**0,254**	**0,848**	**0,357**	**0,42**	**0,4**	**0,2**	**0,1**	**1,641**	**1,155**	**1,3**	**0,84**

Итого: 929 ед. технических средств,
в том числе на гарантии 154 ед. технических средств
на постгарантии 775 ед. технических средств

Годовая экономическая эффективность 122,408 млн.руб.

Реестр ресурсосберегающих технических средств, внедренных за период 2001 – 2008 гг. по Службе локомотивного хозяйства

Мониторинг ресурсосберегающих технических средств Красноярской железной дороги – филиала ОАО «РЖД»

Распоряжение ОАО «РЖД» от 10.11.2008 №2339р

Приказ №736 от 29.12.2008 начальника Красноярской ж.д. В.Г.Рейнгардта «О мерах по обеспечению работоспособности технических средств, внедряемых по инвестиционному проекту «Внедрение ресурсосберегающих технологий на железнодорожном транспорте»

"РОССИЙСКИЕ ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ"
ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
"ДОРОЖНЫЙ ЦЕНТР ВНЕДРЕНИЯ КРАСНОЯРСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ"

Для служебного пользования

СОГЛАСОВАНО:
Начальник Департамента технической политики ОАО "РЖД"
_____ Н.Г.Шабалин
"___" _____ 2006 г.

УТВЕРЖДАЮ:
Генеральный директор ЗАО "ДЦВ Красноярской ж.д."
_____ В.В.Семченко
"___" _____ 2006 г.

БИЗНЕС-ПЛАН
ИНВЕСТИЦИОННОГО ПРОЕКТА
ЗАКРЫТОГО АКЦИОНЕРНОГО ОБЩЕСТВА
"ДОРОЖНЫЙ ЦЕНТР ВНЕДРЕНИЯ КРАСНОЯРСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ"
НА 2007-2009 ГОДЫ

Начальник службы технической политики Красноярской ж.д.
_____ А.И.Васёкин
"___" _____ 2006 г.

Начальник службы Локомотивного хозяйства Красноярской ж.д.
_____ И.Е.Чмилев
"___" _____ 2006 г.

КРАСНОЯРСК
2006

Организация гарантийного и послегарантийного обслуживания наукоемких ресурсосберегающих технических средств и технологий в период их жизненного цикла, для чего:

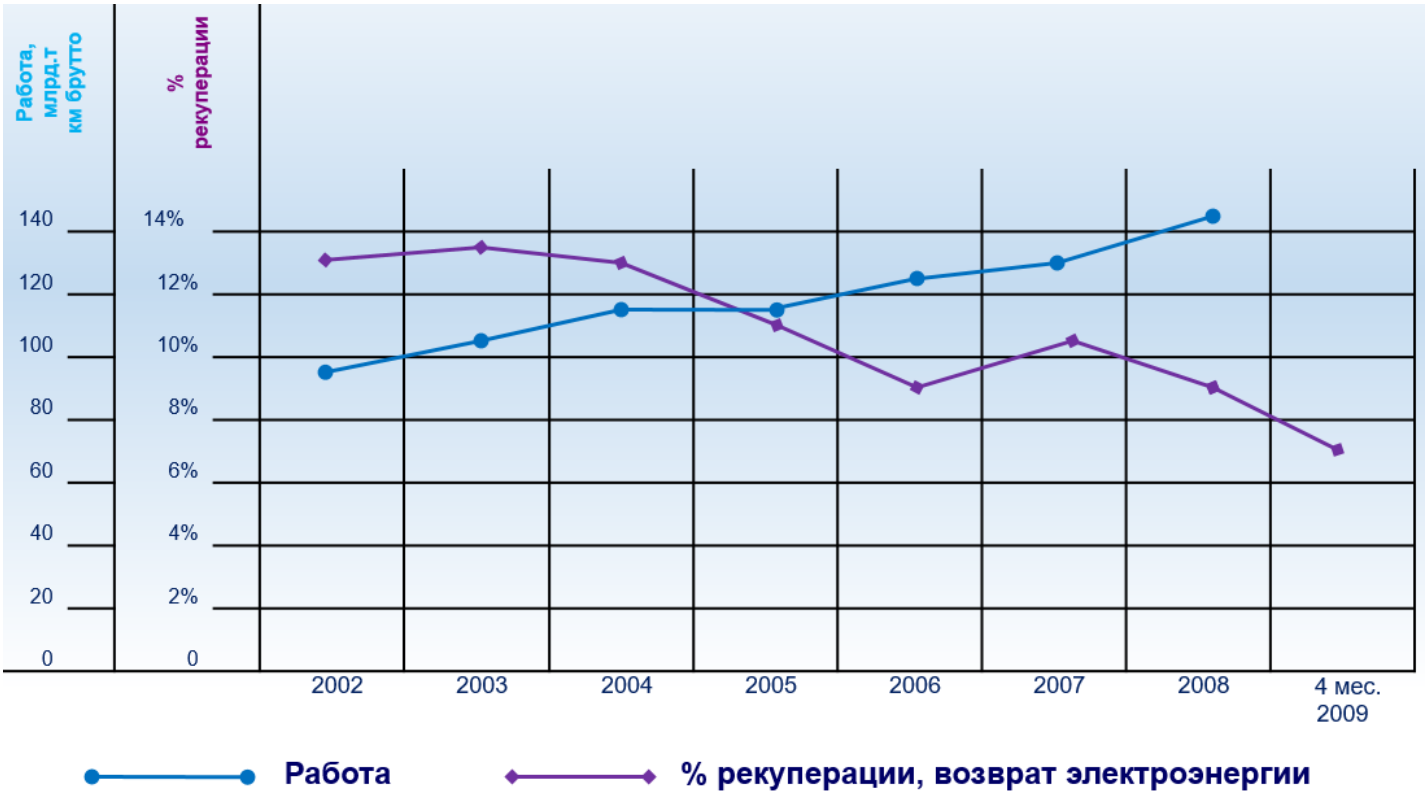
1. Создание многофункционального сервисного центра, обеспечивающего сервисное обслуживание технических средств, внедряемых по инвестиционным программам

2. Обеспечение сервисного обслуживания РТС в гарантийный и послегарантийный периоды их эксплуатации, за счет фактически полученной экономии расходов, ресурсов в результате внедрения этих средств

Наименование оборудования	Кол-во единиц внедрения	Стоимость внедрения (млн.руб.)	Экономический эффект в ценах 2005 г. (млн.руб.)/ на единицу ТС
Система многих единиц (СМЕ)	83	34	48,97/0,590
Микропроцессорный блок управления выпрямительно-инверторным преобразователем БУВИП-М на электровозе ВЛ80	96	68,284	22,56/0,235
Электронный блок импульсной подачи песка (БИП)	34	0,334	0,102/0,003
Регулирование скорости мотор-вентиляторов электровозов переменного тока САУВ	110	39,105	12,98/0,118
Гребнесмазаватели АГС - 8	120	7,161	3,6/0,03
ИТОГО	**443**	**148,884**	**88,212**

Эффектообразующие технические средства электровоза ВЛ80Р: реальный показатель экономии, возврата рекуперативной электроэнергии в год от работы отмеченного оборудования возможен на уровне 12%, который был обеспечен в период до 2003 года, что составляет порядка 150 млн руб. в год.

Вывод: низкая надежность в работе технических средств на 2008-й год.



Динамика возврата электроэнергии от рекуперации электровозов ВЛ80Р. Причина низкой эффективности на 2008-й год – неисправность электрических и электронных цепей рекуперации электровозов.

Анализ причин низкой надежности работы силового электронного оборудования электровоза: деградационный износ – эксплуатация ВИП-2200 ≥ 35 лет

Участок ДЦВ Красноярской ж.д. ремонта и замены выпрямительно-инверторных преобразователей ВИП-2200 с истекшим сроком службы на ВИП-4000М.

ОТКРЫТОГО АКЦИОНЕРНОГО ОБЩЕСТВА
«РОССИЙСКИЕ ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ»

« 16-17 » февраля 2012 г. № 3

ПРЕДСЕДАТЕЛЬСТВОВАЛ
ВИЦЕ-ПРЕЗИДЕНТ ОАО «РЖД» А.В. ВОРОТИЛКИН

Присутствовали:

члены секции «Локомотивное хозяйство» Научно-технического совета ОАО «РЖД» – Лубягов А.М., Назаров О.Н., Бабков Ю.В., Машталер Ю.А., Терегулов О.А., Заручейский А.В.

Приглашенные: (список прилагается)

На заседании секции комплексно рассмотрены перспективы развития МСУ локомотивов и особенности их эксплуатации. Отдельно рассмотрены проблемы надежности МСУ.

Отмечено, что в настоящее время уровень надежности МСУ характеризуется уровнем трех отказов на 1 млн. км. Требуется существенное повышение надежности микропроцессорных систем до уровня не более одного отказа на 1 млн.км. В МСУ имеется ряд конструктивных недостатков, способствующих высокому уровню потока отказов. Необходимо наладить постоянно действующую систему непрерывного повышения качества поступающих в эксплуатацию МСУ под контролем Дирекции по ремонту тягового подвижного состава.

Причиной повышенного числа отказов аппаратуры часто является недостаточное качество технического обслуживания МСУ. В отдельных депо не обеспечивается достаточный переходной запас сменных модулей МСУ.

Имеется положительный опыт сервисного обслуживания МСУ локомотивов, в частности, накопленный ОАО «НИИТКД» при обслуживании МСУ «АПК Борт» и ДЦВ Красноярской железной дороги при обслуживании МСУ электровозов переменного тока. Целесообразно распространить опыт Красноярской дирекции по ремонту тягового подвижного состава на весь Восточный регион железных дорог.

5. Начальнику Дирекции по ремонту тягового подвижного состава Лубягову А.М. совместно с генеральным директором ДЦВ Красноярской железной дороги Семченко В.В. для повышения надежности ВИП, БУВИП, БАУ, МСУ и других электронных систем электровозов переменного тока с тиристорными преобразователями:

а) Реализовать в 2012 году на Восточном полигоне управления (начиная от пункта технического обслуживания локомотивов (ПТОЛ) станции Мариинск Красноярской железной дороги) систему сервисного технического обслуживания и текущего ремонта электронного оборудования электровозов на базе сервисного центра ДЦВ Красноярской железной дороги. Опорные пункты сервисного обслуживания предусмотреть на ПТОЛ станций Мариинск, Тайшет, Карымская, Хабаровск и Смоляниново.

11

Лубягову А.М. для повышения надежности МСУ локомотивов всех серий провести следующие организационные мероприятия в Дирекции по ремонту тягового подвижного состава:

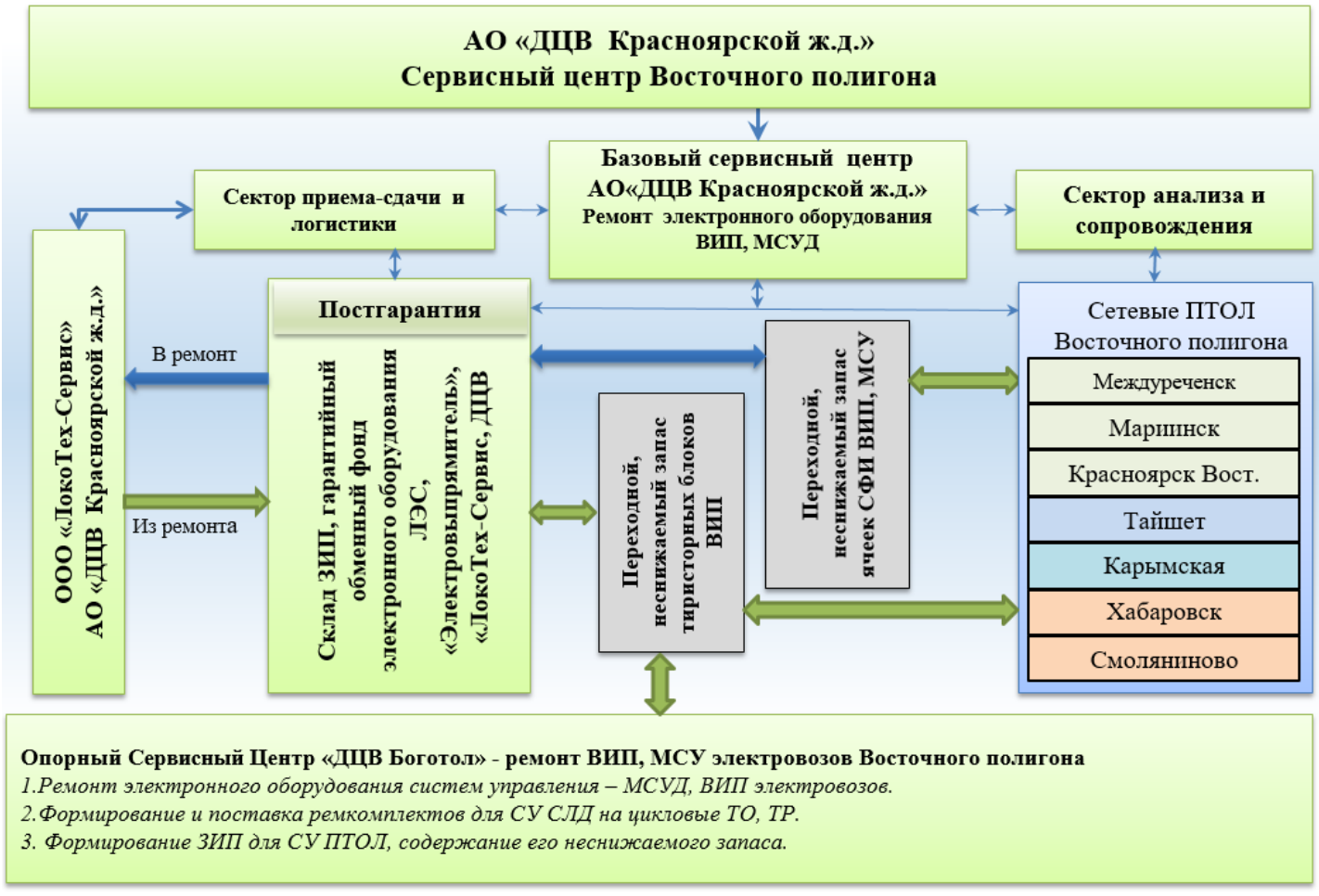
а) Восстановить до 1 июля 2012 г. работоспособность всех МСУ с учетом их штатного резервирования;

б) Создать до 1 октября 2012 г. переходной запас сменных модулей на уровне не менее 5% от их общего числа;

г) Обеспечить в 2012 году развитие сервисных форм обслуживания МСУ с привлечением разработчиков микропроцессорных систем;

ж) Возложить до 1 сентября 2012 г. управление надежностью МСУ на технологическую вертикаль Дирекции по ремонту тягового подвижного состава.

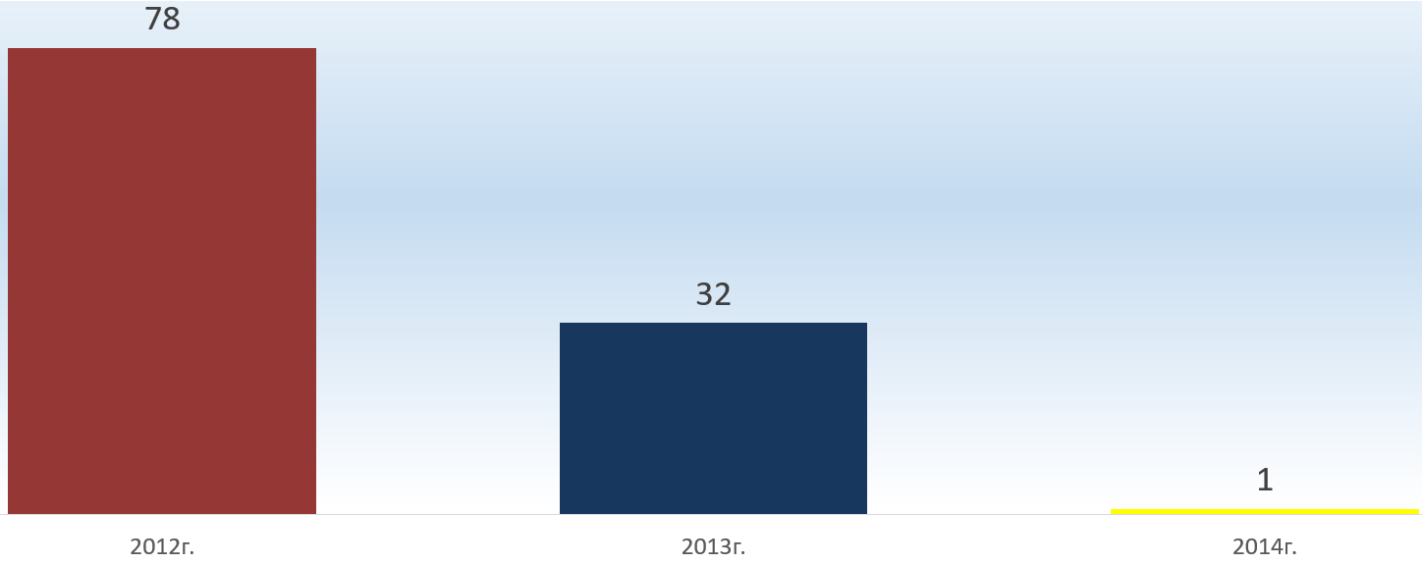
Вице-президент
ОАО «РЖД» А.В. Воротилкин



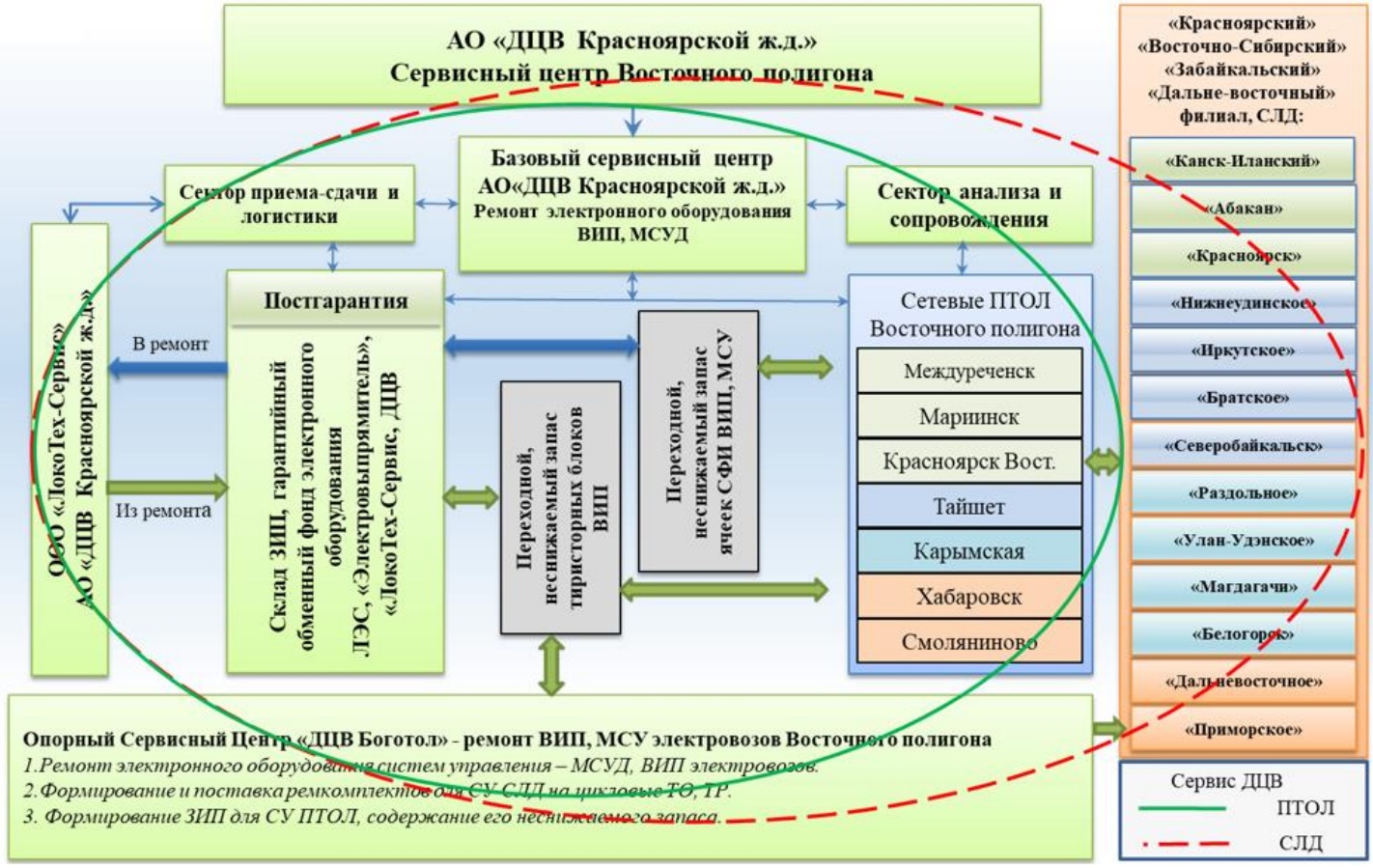
Модель сервиса электронного оборудования электровозов для ПТОЛ: реализация решений протокола № 3 от 16.02.2012 научно-технического совета (НТС) ОАО «РЖД» секции «Локомотивное хозяйство».

Опорный сервисный центр ДЦВ в сервисном локомотивном депо Боготол-Сибирский: ремонт электронного оборудования на производственной базе ДЦВ Красноярской ж.д.

Стендовое оснащение сервисных участков ДЦВ на сетевых ПТОЛ Восточного полигона: ПТОЛ укомплектованы ремонтным ЗИП. Дополнительно имеется стендовое оборудование для первичной диагностики работоспособности модулей.



Эффективность сервиса ВИП и МСУ: динамика отказов в работе электронного оборудования на линии. Реализация протокола НТС ОАО «РЖД» от 16.02.2012 о внедрении сервиса электронного оборудования позволила значительно снизить отказы в работе ВИП, МСУ электровозов ВЛ80Р в эксплуатации на линии.

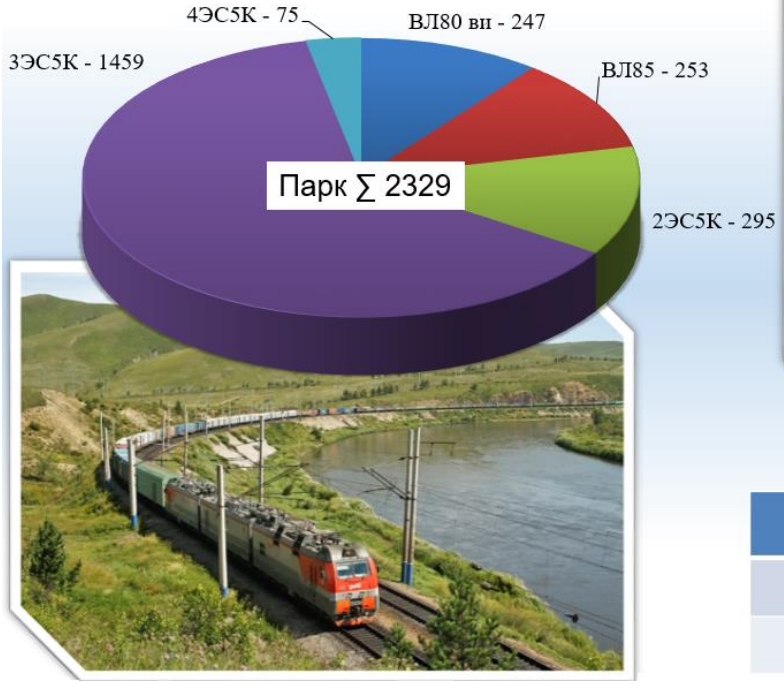


Модель сервиса электронного оборудования электровозов Восточного полигона.

Разработанная и внедренная модель сервиса электронного оборудования электровозов неоднократно представлялась к рассмотрению на международных НПК по тематике: «Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов».

ДЦВ Красноярской ж.д. участвовало во всех НПК ЛокоТех: на фото обсуждение проекта ДЦВ в ходе работы НПК с участием генерального директора АО «Трансмашхолдинг» К. В. Липы и ректора РУТ Б. А. Лёвина.

ДЦВ Красноярской ж.д. неоднократно награждался руководством ОАО «РЖД».



3(4)ЭС5К с поосным регулированием

3ЭС5К	4ЭС5К
666	75
Составляет: 48% от парка 3(4)ЭС5К	

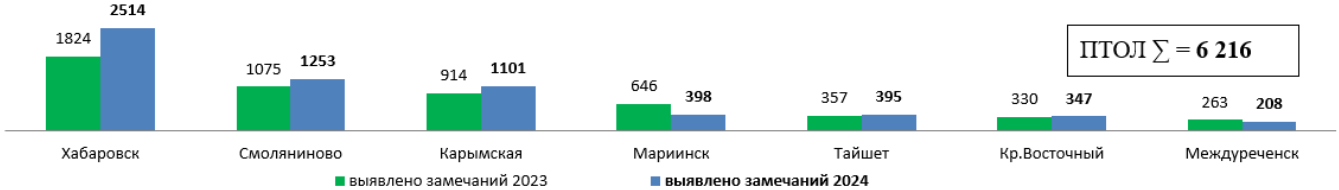
Состояние парка по итогам его обновления в 2024 году.

ТЧЭ приписки	Тяговый полигон	2ЭС5К	3ЭС5К	4ЭС5К	ВЛ80Р	ВЛ80 ТК, СК	1,5ВЛ80Р, ТК, СК	ВЛ85	Всего секции		
1.ТЧЭ Смоляниново	Смоляниново – Хабаровск – Карымская	105	30	75					600	Дальневосточная	1310
2.ТЧЭ Хабаровск-2	Смоляниново – Хабаровск –Карымская	46	206						710		
3. ТЧЭ Белогорск	Смоляниново – Хабаровск – Карымская	56							112	Забайкальская	2039
4.ТЧЭ Чита	Смоляниново – Хабаровск – Карымская		623		29				1927		
5. ТЧЭ Вихоревка	Таксимо – Братск – Тайшет – Междуреченск	54	86						366	Восточно-Сибирская	1159
6. ТЧЭ Иркутск	Тайшет – Иркутск – Улан-Удэ		47						141		
7. ТЧЭ Улан-Удэ	Карымская –Тайшет – Мариинск		46						138		
8. ТЧЭ Нижнеудинск	Даурия – Карымская – Мариинск				4			253	514		
9. ТЧЭ Иланская	Карымская – Тайшет – Мариинск		174						522	Красноярская	1897
10. ТЧЭ Боготол	Карымская – Тайшет – Мариинск		44		75	1	138		698		
11. ТЧЭ Абакан	Карымская – Тайшет – Мариинск	9	203						627		
12. ТЧЭ Красноярск	Карымская – Тайшет – Мариинск	25							50		
Итого:		295	1455	75	108	1	138	253	6405		

Сервис электронного оборудования электровозов Восточного полигона сервисными участками ДЦВ Красноярской ж.д. на сетевых ПТОЛ.

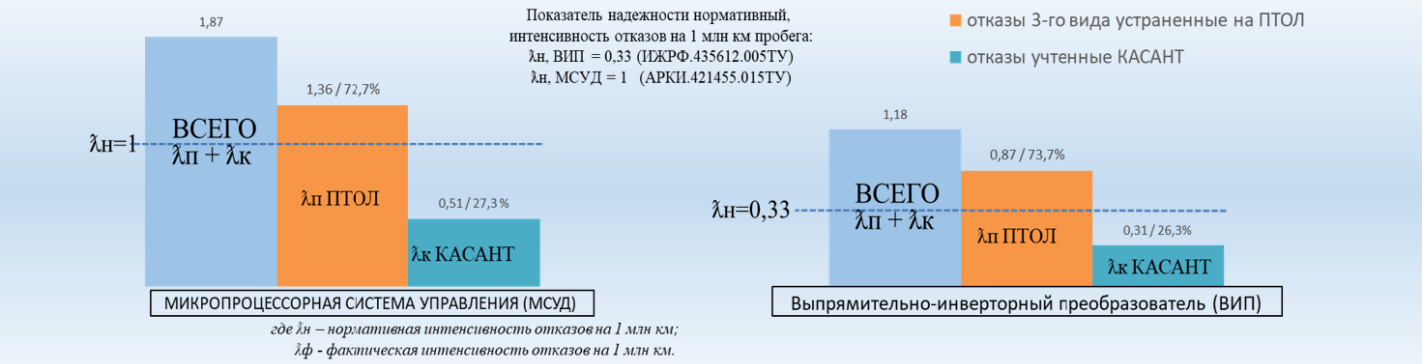
За 12 месяцев 2024 года по обособленным подразделениям АО «ДЦВ Красноярской ж.д.» Восточного полигона объем технического обслуживания электровозов переменного тока составил 242 851 секция, в том числе:

Восстановительный ремонт. В сумме, с нарастающим, за 12 месяцев 2024 года обособленными подразделениями АО «ДЦВ Красноярской ж.д.» сетевых ПТОЛ Восточного полигона было выявлено и устранено 6 216 замечаний.



Устранение выявленных предотказных состояний электронных систем локомотивов сервисными участками АО «ДЦВ Красноярской ж.д.» на ПТОЛ Восточного полигона, способствует повышению надежности работы локомотивного комплекса в целом, обеспечению непрерывного бесперебойного перевозочного процесса ОАО «РЖД».

Анализ эффективности сервиса ДЦВ Красноярской ж.д.: итоговые показатели работы за 2024 год.

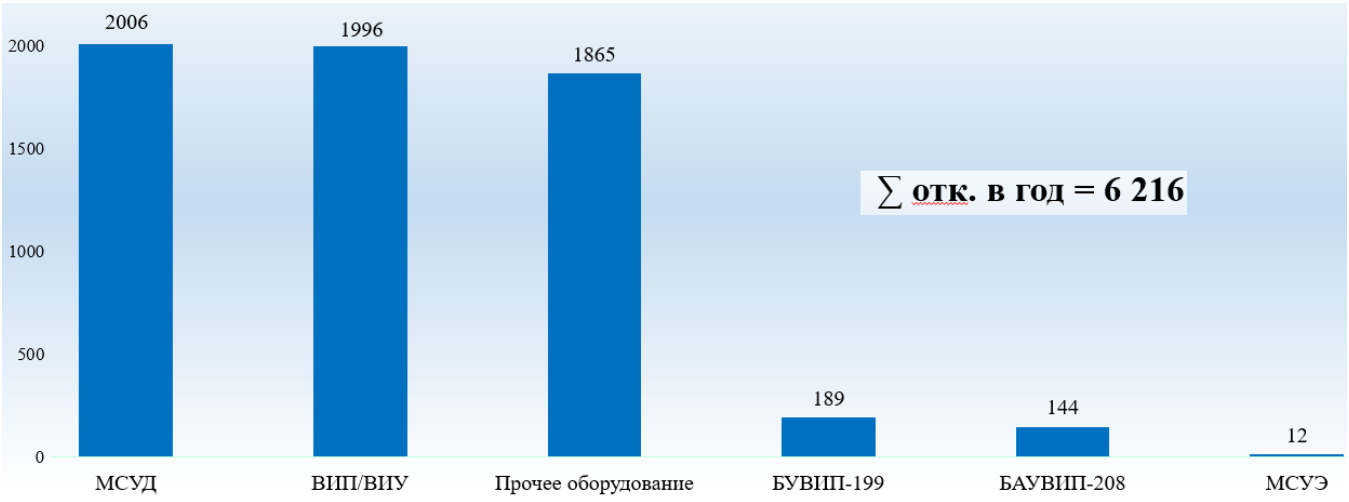


где λн – нормативная интенсивность отказов на 1 млн км;
λф - фактическая интенсивность отказов на 1 млн км.

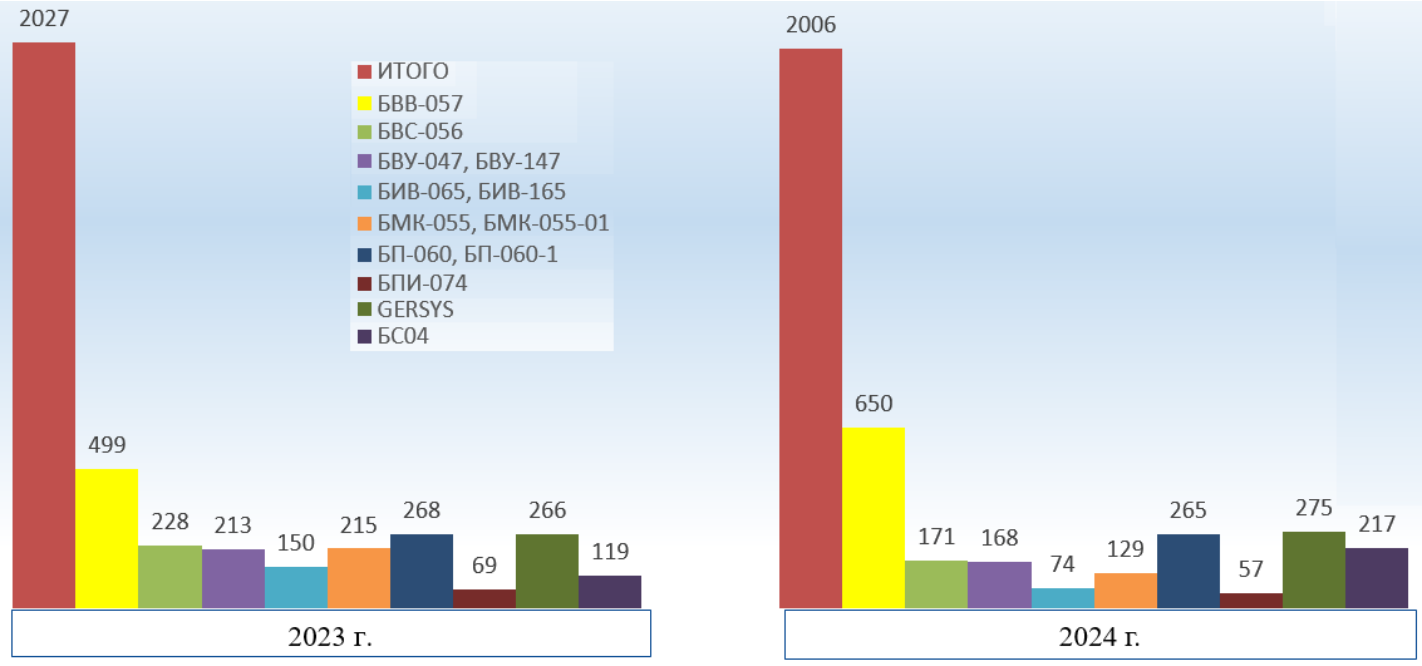
За 12 месяцев по МСУД
Общий пробег L = 10522*30*415.63*12/1000000 = 1574 млн км – за 12 месяцев
где 10522 – количество МСУД в эксплуатации, 415,63 - среднесуточный пробег локомотива на Восточном полигоне.
За 12 месяцев количество замечаний по МСУД:
3298 - по данным ПТОЛ (принимаем значение 0,35 как прочие отказы)
тогда λф= N /L =2143,7/1574=1,36 интенсивность отказов на 1 млн км
815 - по данным КАСАНТ, λф= N /L = 815/1574 = 0,51 интенсивность отказов на 1 млн км.

За 12 месяцев по ВИП
Общий пробег L = 11192*30*415.63*12/1000000 = 1675 млн км – за 12 месяцев,
где 11192 – количество ВИП в эксплуатации, 415,63 - среднесуточный пробег локомотива на Восточном полигоне.
За 12 месяцев количество замечаний по ВИП:
2253 - по данным ПТОЛ (принимаем значение 0,35 как прочие отказы),
тогда λф= N /L=1464,5/1675=0,87 интенсивность отказов на 1 млн км
520 - по данным КАСАНТ λф = N /L = 520/1675 = 0,31 интенсивность отказов на 1 млн км.

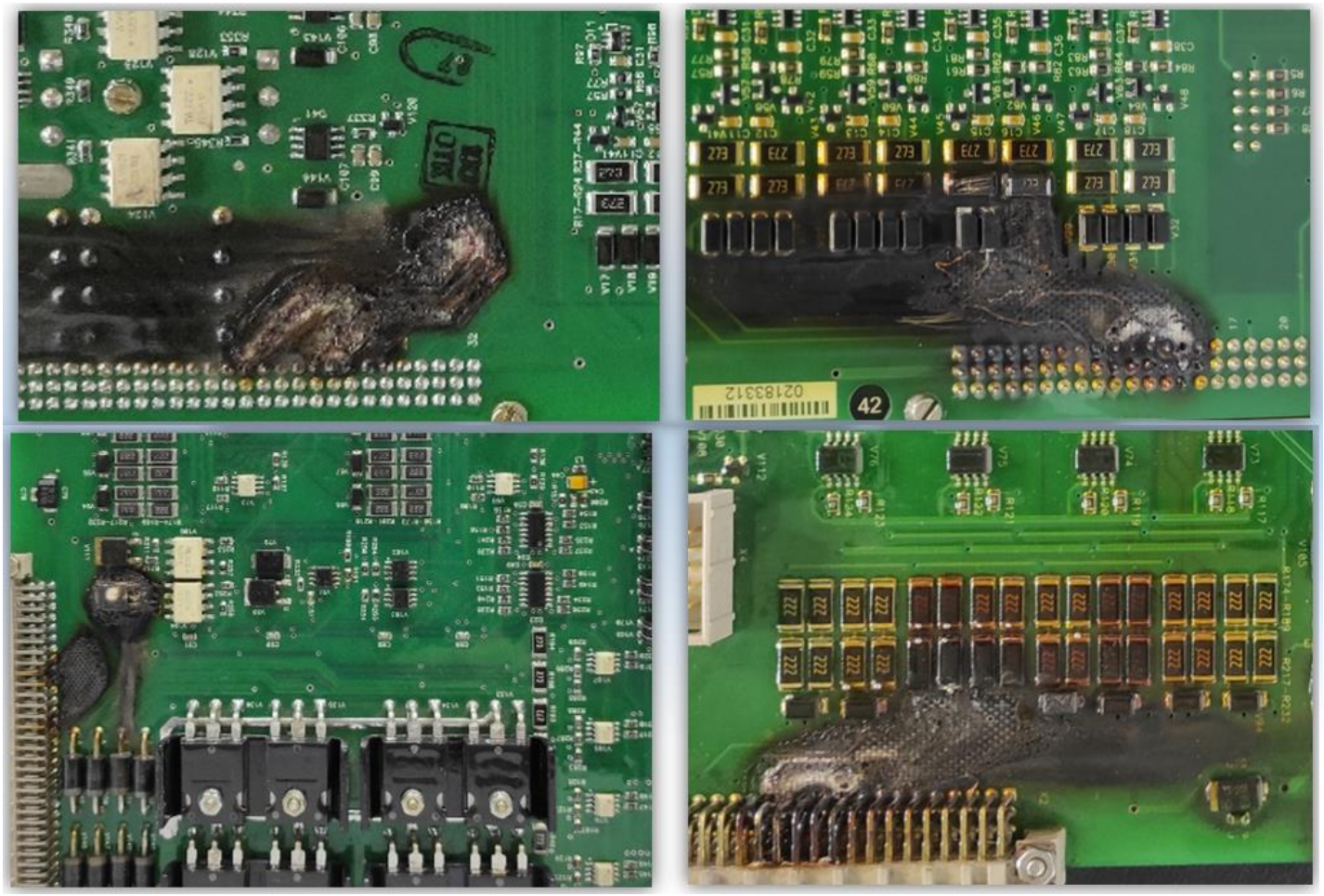
Анализ эффективности сервиса электровозов Восточного полигона: расчёты показывают эффективность внедренной модели сервисного ТОиР электроники.



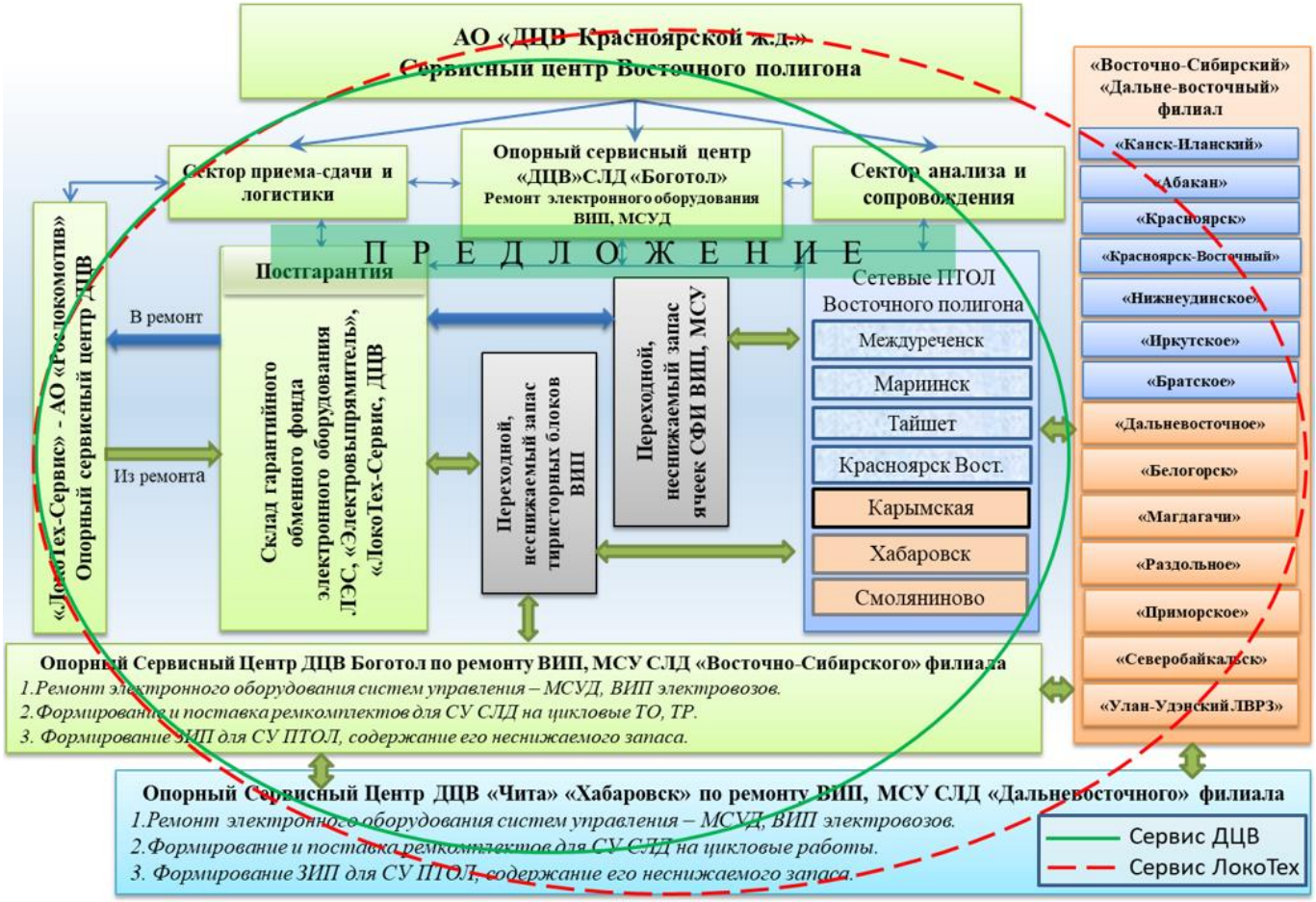
Отказы по типам электронного оборудования за 2024 г.

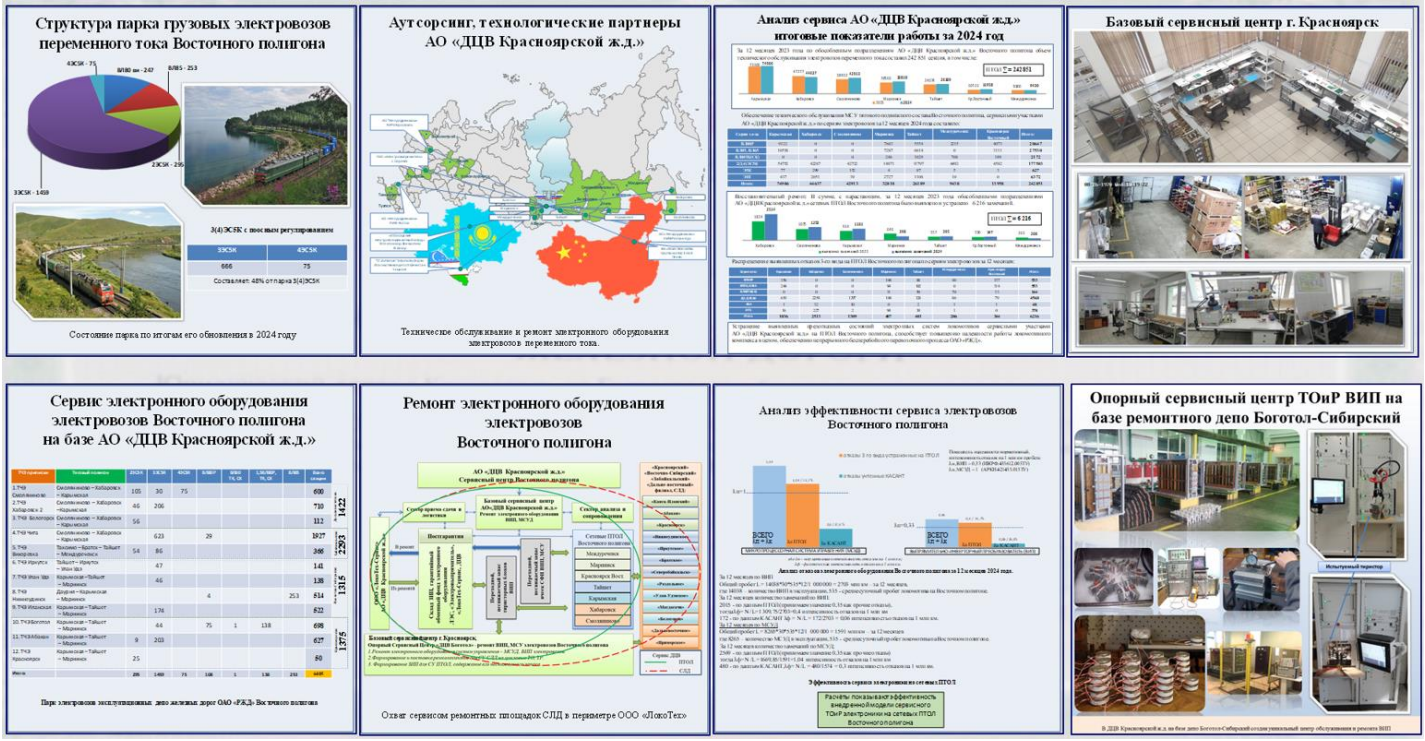


Сравнительный анализ отказов съемных блоков МСУД
парка электровозов серии 2,3,4ЭС5К за 2023 – 2024 годы.

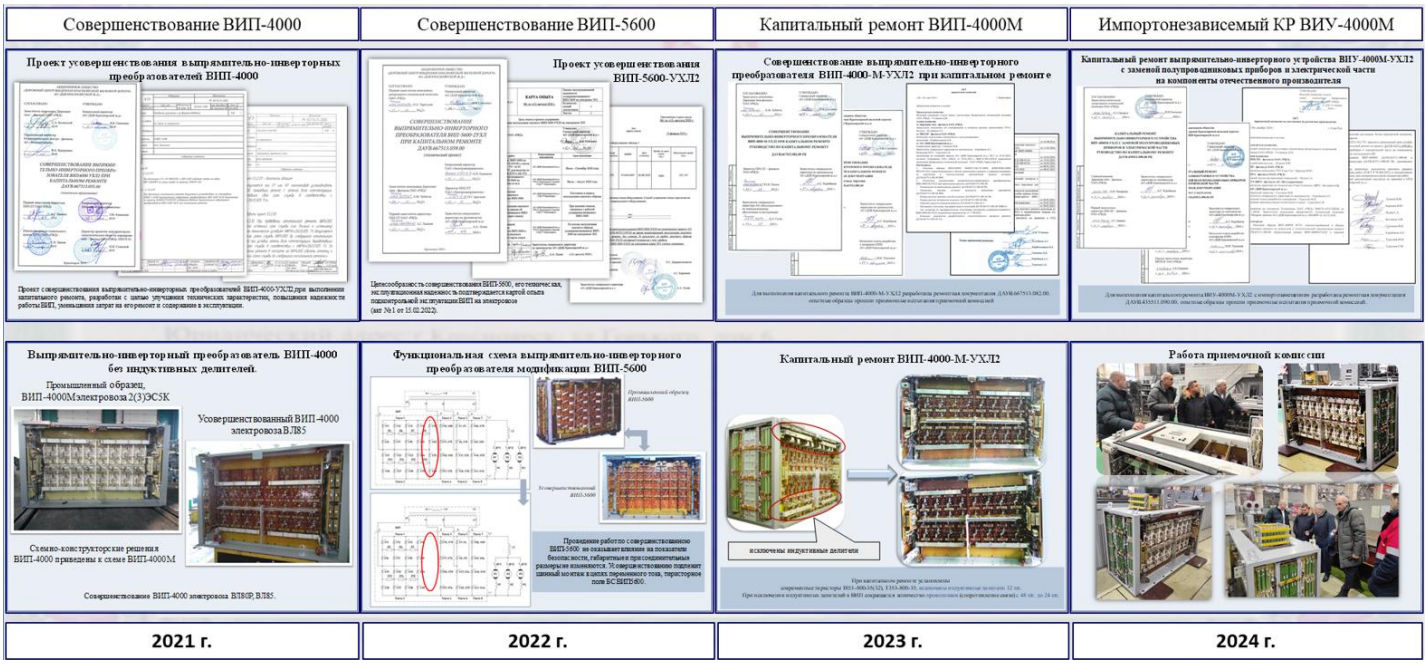


Характерные последствия отказов блоков БВВ-057: в ДЦВ Красноярской ж.д. выявлена и устранена конструктивная первопричина опасных отказов.

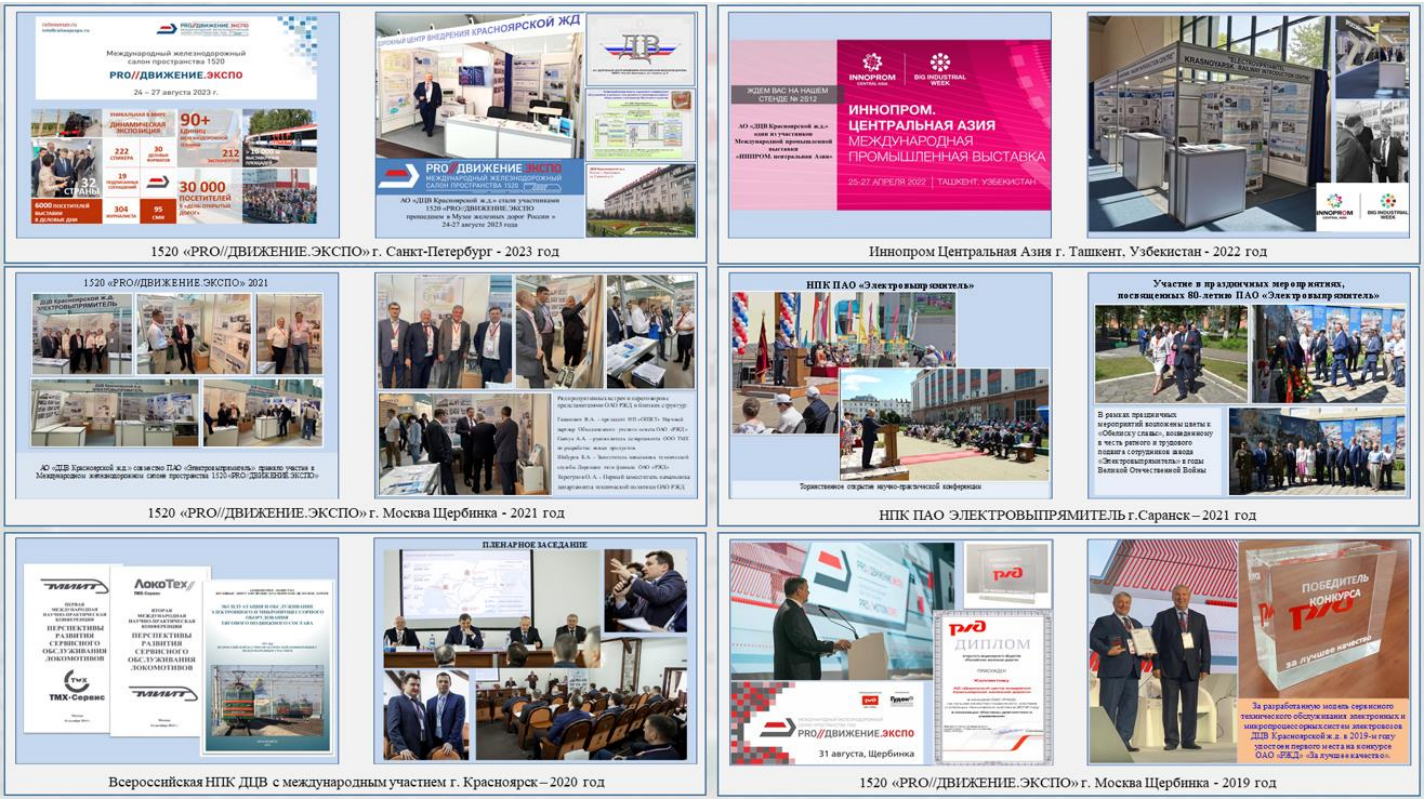




ТОиР электронного оборудования электровозов ДЦВ Красноярской ж.д.



Совершенствование ВИП электровозов.



1520 «PRO//ДВИЖЕНИЕ.ЭКСПО» г. Санкт-Петербург - 2023 год

Иннопром Центральная Азия г. Ташкент, Узбекистан - 2022 год

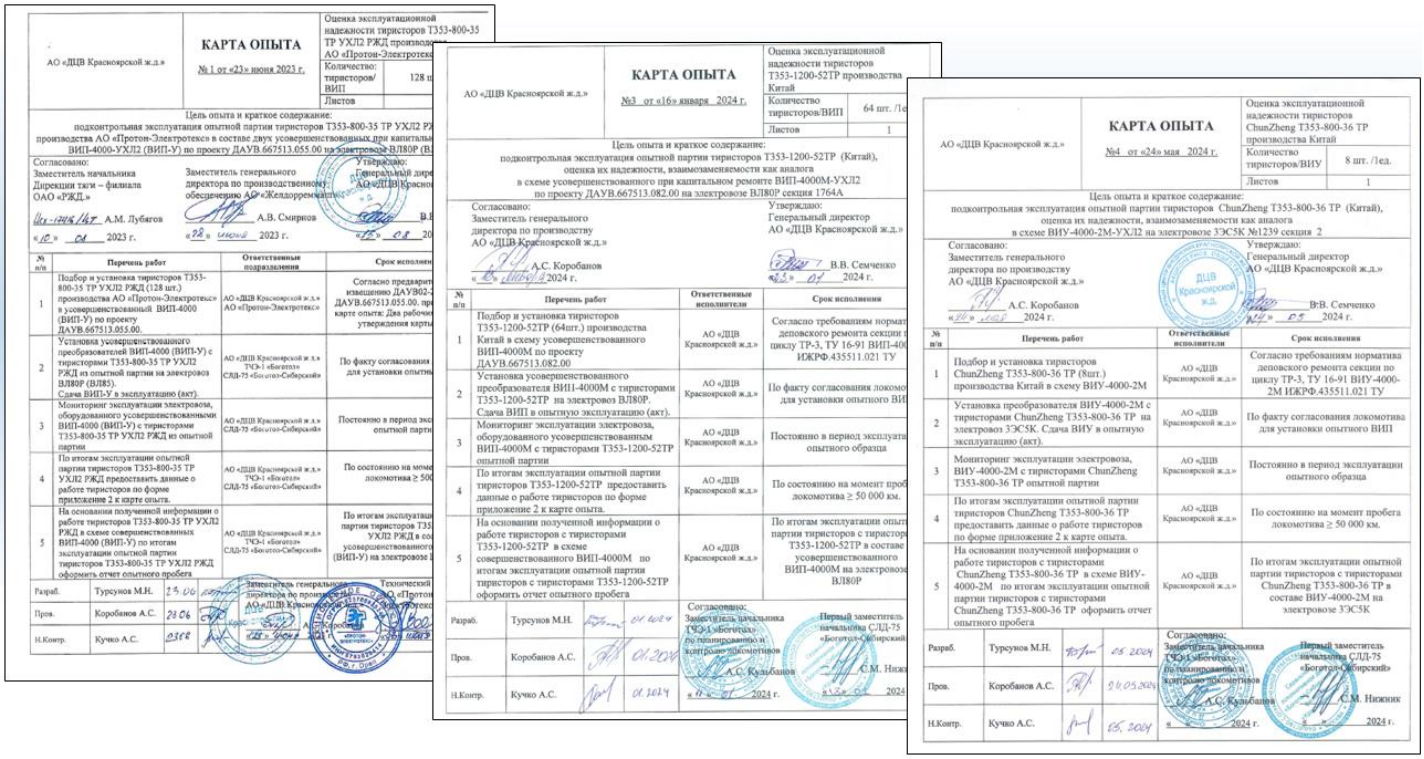
1520 «PRO//ДВИЖЕНИЕ.ЭКСПО» г. Москва Щербинка - 2021 год

НПК ПАО ЭЛЕКТРОВЫПРЯМИТЕЛЬ г.Саранск – 2021 год

Всероссийская НПК ДЦВ с международным участием г. Красноярск – 2020 год

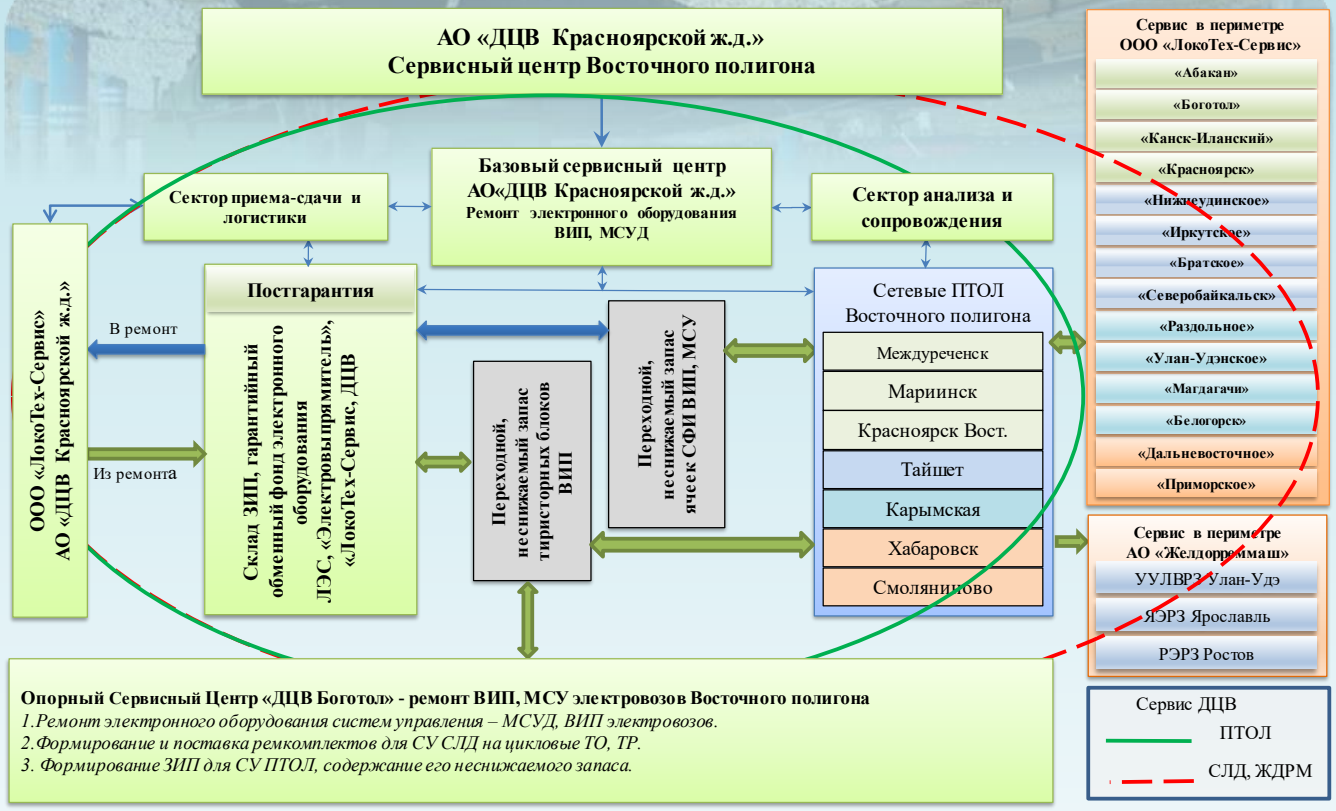
1520 «PRO//ДВИЖЕНИЕ.ЭКСПО» г. Москва Щербинка - 2019 год

Участие ДЦВ Красноярской ж.д. в научно-практических конференциях и выставках: ДЦВ всегда готов поделиться накопленным опытом сервисного ТОиР.



Технологический суверенитет и реализация импортонезависимых технологий: эксплуатационные испытания альтернативных силовых тиристоров в составе ВИП, ВИУ импортного производства.

Дорожный центр внедрения Красноярской железной дороги



https://www.dcv.ru/

Производственно-научная деятельность ДЦВ ведется совместно с отраслевыми производителями электронного оборудования тягового подвижного состава, конструкторскими и технологическими подразделениями заводов, а так же в рамках программы технологического суверенитета с партнерами из дружественных стран.

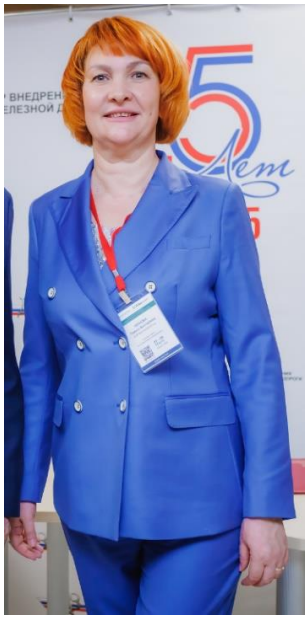
С обложки (задняя сторона) журнала «Локомотив», 2025, № 4.

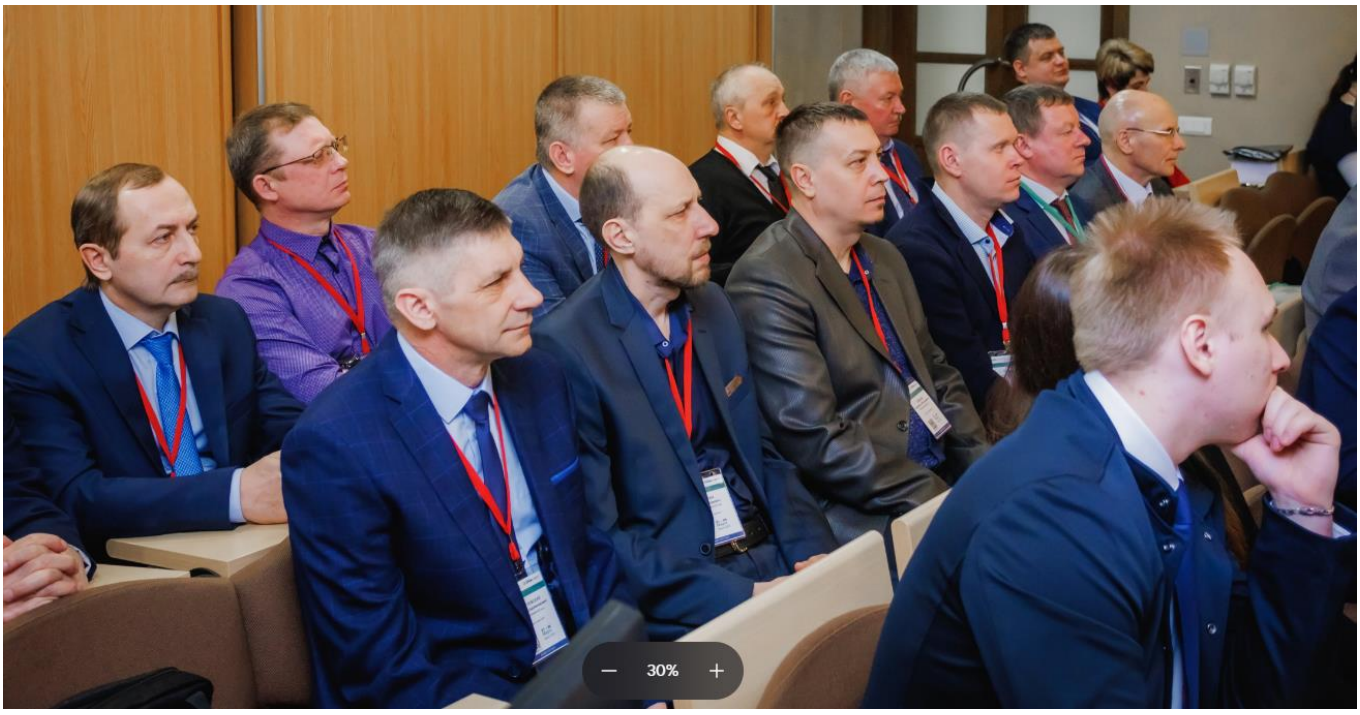
ФОТООТЧЁТ ПЛЕНАРНОГО ЗАСЕДАНИЯ НПК

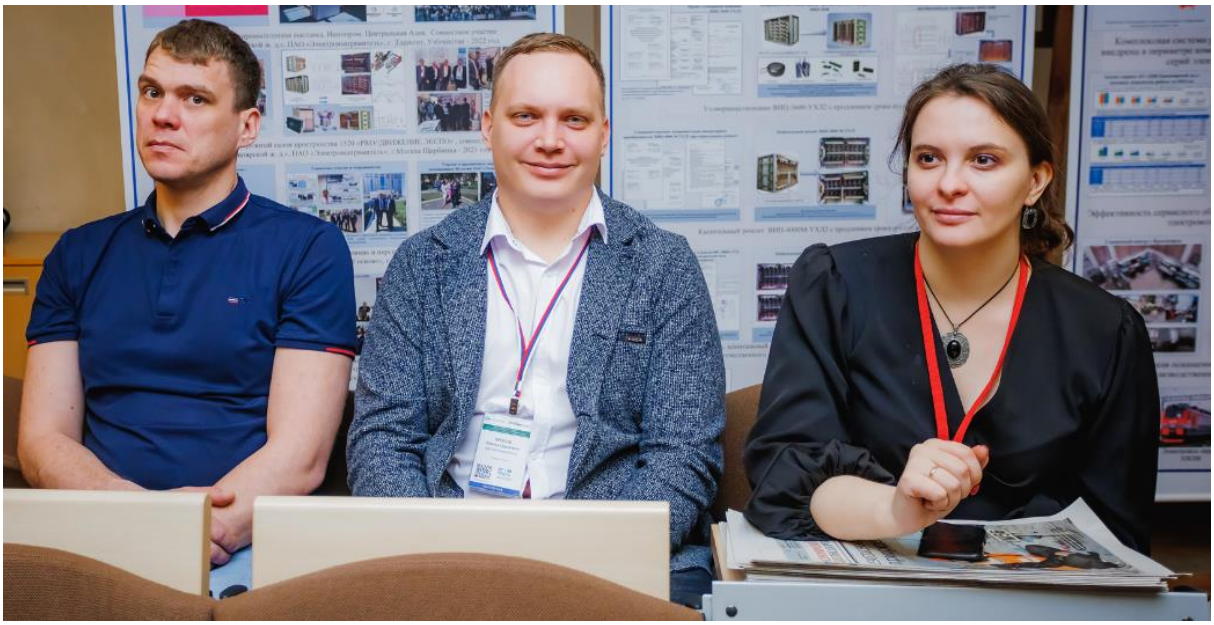
Сопредседатели НПК:

– к.т.н., генеральный директор ДЦВ Красноярской ж.д. Семченко Виктор Васильевич;
– д.э.н., директор КРИЖТ ИрГУПС Савченко Евгений Евгеньевич.

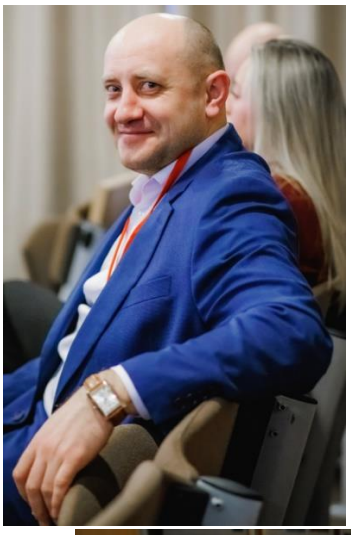
Президиум пленарного заседания НПК: д.э.н. Е. Е. Савченко, к.т.н. В. В. Семченко,
Р. В. Кукишев (главный инженер Красноярской ж.д., соучредитель ДЦВ),
Я. Г. Балунов (генеральный директор Желдорконсалтинг, соучредитель ДЦВ),
д.т.н. И. К. Лакин (учёный секретарь НПК)

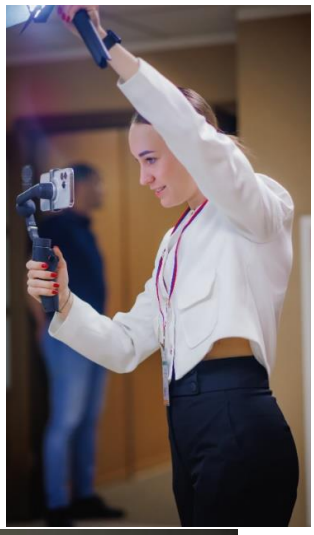






ДЦВ Красноярской ж.д. – организатор и самый активный участник НПК





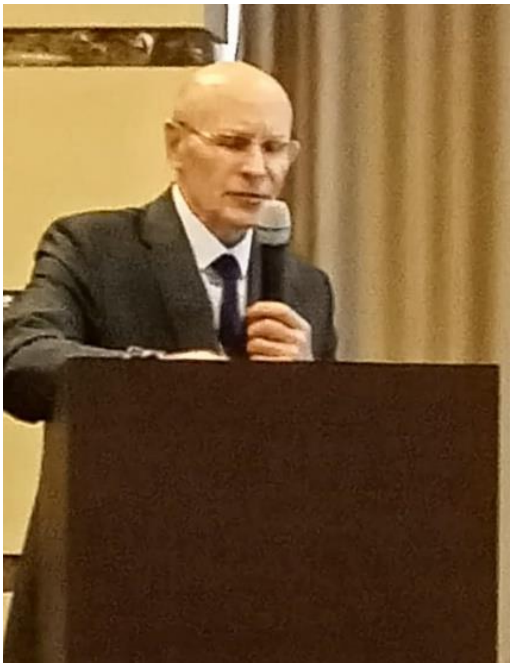
УЧАСТНИКИ ПЛЕНАРНОГО ЗАСЕДАНИЯ НПК

Китайские участники НПК и деловые партнёры ДЦВ Красноярской ж.д.
Si Wei и Zhancheng Gao

ПОДАРКИ ОТ УЧАСТНИКОВ НПК

д.т.н. В. В. Грачёв (ПГУПС, СПб)

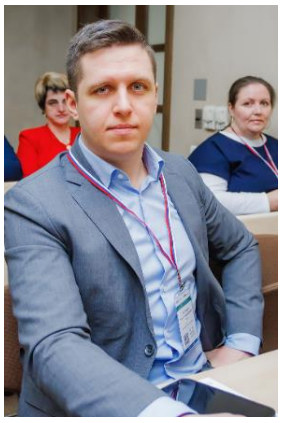
д.т.н. А. С. Космодамианский (РУТ, Москва)


д.т.н. С. Г. Шантаренко (ОмГУПС, Омск)

д.т.н. О. В. Мельниченко (ИрГУПС, Иркутск)

Доктора технических наук ПГУПС, РУТ, ОмГУПС, ИрГУПС – члены экспертного совета – приняли активное участие в обсуждении и оценке стендовых докладов в течение марта месяца. 28 марта 2025 г. на пленарном заседании подведён итог, одобрена новая форма работы.

КРИЖТ



«Все флаги в гости к нам»

Пятый приглашённый профессор был ещё и учёным секретарём и ведущим НПК

«Отцы и дети», и мама: все вместе – участники НПК

Семейное участие в НПК с самым молодым специалистом

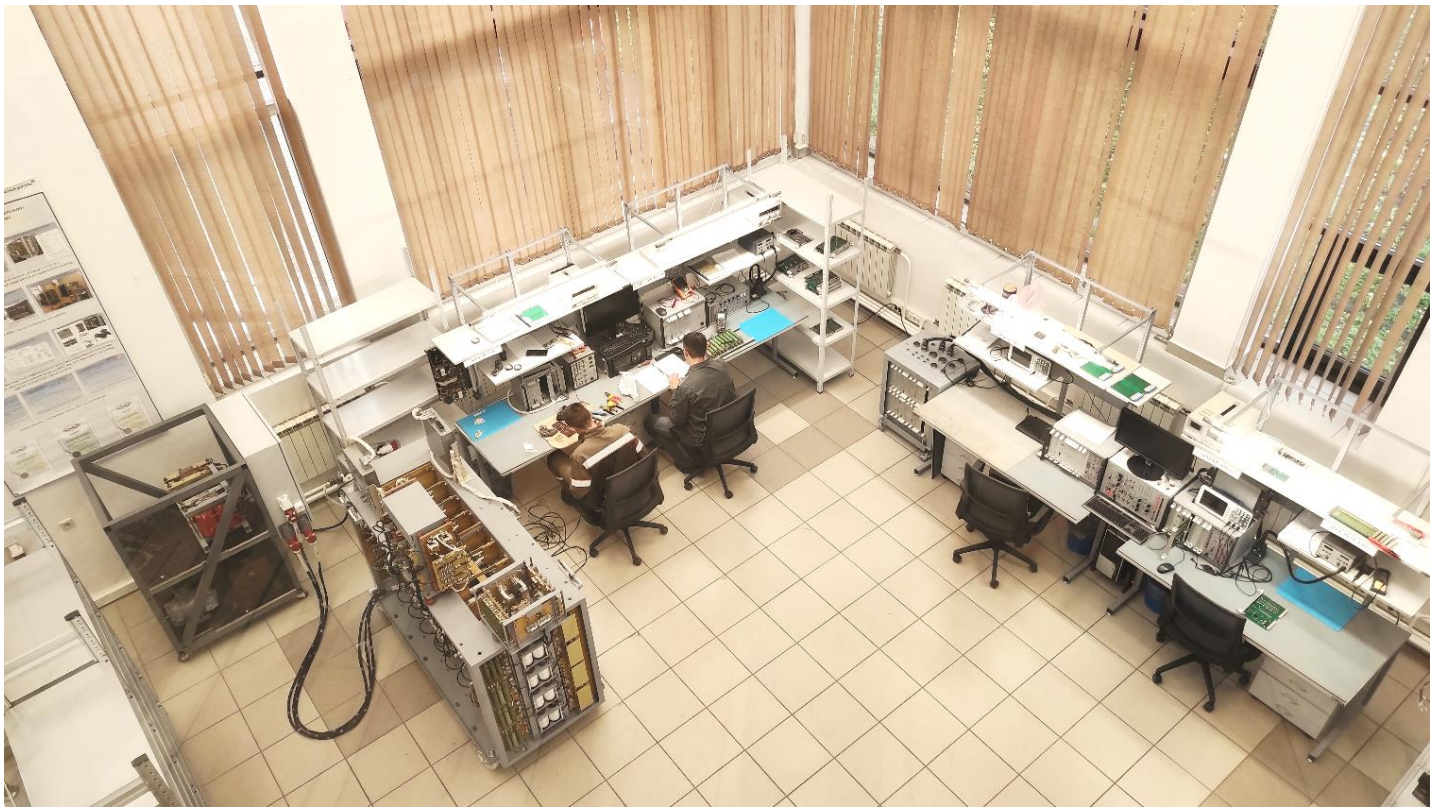
Директора филиалов ЛокоТех-Сервис (Красноярск и ЗСиб), ПКТБ Н и КрЭВРЗ

Директор КРИЖТ, генеральный директор ДЦВ, главный инженер Красноярской ж.д.

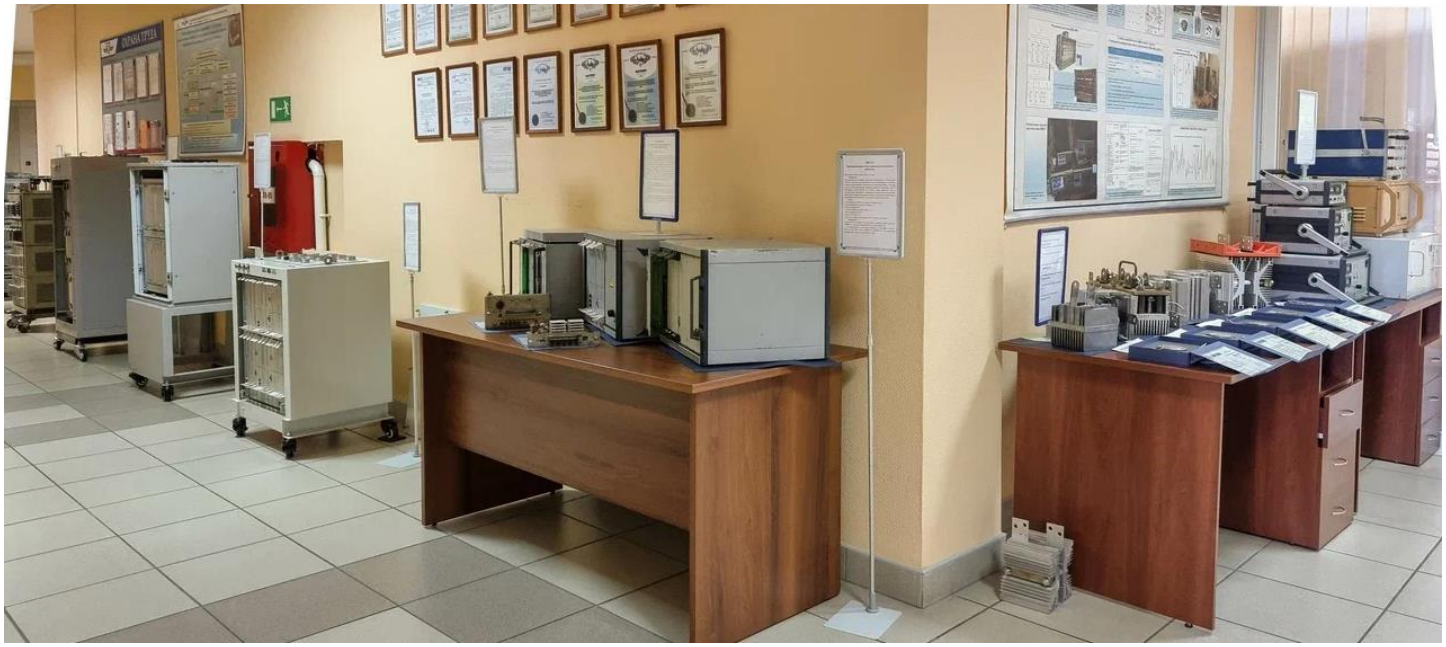
Общий вид помещения пленарного заседания НПК

Культурная программа с посещением достопримечательностей Красноярска и Края входила в программу НПК

Кроме пленарных заседаний и культурной программы очная часть НПК включала посещение офиса ДЦВ, где, наряду с показом производства, была организована ретроспективная выставка электронного и микропроцессорного оборудования



Продемонстрированный участникам НПК базовый опорный сервисный центр ремонта микропроцессорных систем управления электровозов Восточного полигона



Выставка электронного оборудования всех поколений электровозов переменного тока с выпрямительно-инверторными преобразователями (ВИП)

Легендарные первопроходцы – блоки управления выпрямительно-инверторных преобразователей (БУВИП) первых электровозов с ВИП серий ВЛ80Р, ВЛ65, ВЛ85. Теперь локомотивами управляют микропроцессорные системы управления и диагностирования (МСУД). Все они обслуживаются в ДЦВ Красноярской ж.д.

БУВИП-113 на транзисторах и диодах – завершил первый этап освоения электроники на локомотивах, начатый блоками БУВИП-80 и БУВИП-100

БУВИП-133 на микросхемах серии 133 – второе поколение систем управления. Завершил становление принципов управления. В алгоритмах современных МСУД используются реализованные на микросхемах принципы БУВИП-133

А это МСУ, на которые заменялись морально устаревшие БУВИП.
Справа – МСУЭ для ВЛ80Р, спроектированный в ДЦВ Красноярской ж.д., после испытания которого им были модернизированы более 100 электровозов ВЛ80Р.
И все эти блоки обслуживаются в ДЦВ Красноярской ж.д.

Тиристоры с радиаторами и первые модели диагностического оборудования

Тиристоры с радиаторами всех поколений и перспективная модель от ДЦВ (справа)

«Блок индикации» современных электровозов – это полноценный промышленный компьютер, позволяющий машинисту контролировать техническое состояние цепей управления, а также сохраняющий диагностическую информацию для ремонтного персонала, в т.ч. для сервисного обслуживания в ДЦВ Красноярской ж.д.
Сами блоки индикации также обслуживаются в ДЦВ.

Специально подготовленная для НПК уникальная сравнительная экспозиция силовых тиристоров локомотивов различных производителей в разобранном виде

Подарки от Красноярских космонавтов – легендарного АО «Решетнёв», а также макет локомотива «Ермак», спроектированный в ДЦВ Красноярской ж.д. и частями распечатанный на 3D-принтере

ГУДОК
ВЫХОДИТ С 23 ДЕКАБРЯ 1917 ГОДА
12+
1 АПРЕЛЯ 2025 ГОДА
ВТОРНИК № 45/46 (28060, 28061)
ЕЖЕДНЕВНАЯ ТРАНСПОРТНАЯ ГАЗЕТА
WWW.GUDOK.RU

«Цифра» займётся ремонтом

Техника | Повышение надёжности электронного оборудования локомотивов на Восточном полигоне РЖД стало главной темой Второй научно-практической конференции «Техническое обслуживание и ремонт подвижного состава (ТОиР)», которая собрала 27–29 марта в Красноярске более 100 специалистов из России, Китая, Белоруссии и других стран.

Автор ● **Екатерина Щербакова,** *корреспондент газеты «Красноярский железнодорожник», Красноярск*

Работа НПК освещалась отраслевой прессой: на конференции присутствовали корреспонденты газеты «Гудок» для последующей публикации двух статей. Несколько публикаций предусмотрено в отраслевом журнале «Локомотив».

ЛАРИСА ЧЕРНОВА

Специалист проверяет выпрямительно-инверторный преобразователь

Эксперты обсудили необходимость глубокой цифровизации ремонтных процессов и внедрения передовых методов. Конференцию при содействии ОАО «РЖД» организовали АО «Дорожный центр внедрения Красноярской железной дороги» (ДЦВ) и Красноярский институт железнодорожного транспорта.

В 2024 году специалисты Красноярского ДЦВ провели техническое обслуживание более 242 тыс. секций электровозов, выявив и устранив свыше 6 тыс. неисправностей, сообщил участникам мероприятия главный инженер Красноярской дороги Роман Кукишев. «Это колоссальная работа, которая напрямую влияет на надёжность подвижного состава. Благодаря системному подходу удаётся минимизировать простои и повышать эффективность перевозок на всём Восточном полигоне», – подчеркнул он.

Генеральный директор ООО «Желдорконсалтинг» Ярослав Балунов отметил значение деятельности Красноярского ДЦВ для железнодорожной отрасли: «Это не просто ремонтное предприятие, а ключевой технологический хаб. Их опыт в обслуживании микропроцессорных систем управления – золотой стандарт для всей сети дорог. Особенно впечатляют усилия красноярцев по импортозамещению: они находят собственные решения, которые позволяют поддерживать парк в работоспособном состоянии».

Особое внимание участники конференции уделили наукоёмким передовым технологиям сервисного обслуживания и ремонта, цифровизации технологических процессов ТОиР.

Как сообщил генеральный директор Красноярского ДЦВ Виктор Семченко, за последние три года интенсивность отказов выпрямительно-инверторных преобразователей электровозов удалось снизить до 0,31 случая на 1 млн км пробега при допустимом нормативе 0,33. По его словам, с внедрением импортонезависимой технологии в дальнейшем можно значительно повысить надёжность работы электронного оборудования: «Наша модель сервиса доказала свою эффективность. Сегодня локомотивы проходят в рамках жизненного ремонтного цикла ТР-1 (50 тыс. км) между плановыми ремонтами без отказов электроники».

Виктор Семченко также рассказал об основных направлениях развития сервисного обслуживания, в том числе о внедрении автоматизированных систем диагностики: «Сервисные участки сетевых пунктов технического обслуживания локомотива ДЦВ на Восточном полигоне имеют автоматизированные рабочие места для контроля электроники локомотивов в эксплуатации на линии. Данные с датчиков передаются в единую систему, что позволяет прогнозировать и своевременно устранять отказы».

Одно из важных достижений ДЦВ – повышение надёжности микропроцессорных систем управления и диагностики электровоза, совершенствование и реализация совместно с производителями схемных решений ТОиР в эксплуатации.

В 2025 году Красноярский ДЦВ планирует расширить применение киберфизических технологий для удалённого мониторинга оборудования, внедрить предиктивную аналитику для прогнозирования отказов. «Восточный полигон – ключевой для грузоперевозок всей сети. Наша задача – минимизировать простои локомотивов за счёт умного сервиса», – резюмировал генеральный директор дорожного центра внедрения.

ДЦВ совместно с китайскими партнёрами тестирует современные тиристоры производства КНР для их альтернативного использования в импортных силовых преобразователях, установленных на российских электровозах.

Китайские коллеги поделились опытом модернизации силовых преобразователей тягового подвижного состава КНР, что особенно актуально для парка электровозов «Ермак» на базе преобразователей импортного производителя.

Директор Красноярского института железнодорожного транспорта Евгений Савченко отметил, что совместные проекты с ДЦВ позволяют не только внедрять новые технологии, но и готовить кадры, способные работать с современной техникой.

В 2025 году Красноярский ДЦВ планирует расширить применение киберфизических технологий для удалённого мониторинга оборудования, внедрить предиктивную аналитику для прогнозирования отказов

ЭЛЕКТРОННЫЕ СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ

(СТАТЬИ УЧАСТНИКОВ КОНФЕРЕНЦИИ)

npk.dcv.ru

Первая часть НПК ТОиР состояла из электронных стендовых докладов по аналогии с очными в 2020-м году, но проходили дистанционно в марте 2025-го года на сайте НПК https://npk.dcv.ru

По решению конференции все стендовые доклады публикуются в настоящем Сборнике в виде статей с указанием авторов и организаций (в конце статьи). Статьи приведены в авторском варианте с редакционными правками и исправлением замеченных опечаток. Редакционная коллегия заранее приносит извинения за возможные ошибки.

УДК 621.43:629.3 ГРНТИ 73.29.41

Gao Zhancheng

ADVANTAGES OF HIGH-POWER THYRISTORS IN LOCOMOTIVE RECTIFIER CABINETS REPLACING SERIES/PARALLEL SMALL-POWER THYRISTORS WITH FULLY CRIMPED HIGH-POWER THYRISTORS

Preface

Thyristors (also known as Silicon-Controlled Rectifiers, SCRs) are critical components in locomotive rectifier cabinets, particularly in traditional electric locomotives and modern diesel-electric traction systems. Early electric locomotives, lacking high-power thyristors, utilized series/parallel connections of small- and medium-power thyristors to meet system requirements. However, this approach imposed stringent demands on thyristor parameters, resulted in bulky systems, and reduced reliability. With technological advancements, replacing series/parallel small-power thyristors with fully crimped high-power thyristors offers significant advantages in retrofitting locomotive rectifier cabinets.

I. Historical Overview of Thyristor Development

1957: General Electric (GE) successfully developed the first thyristor, marking the entry of power electronics into the era of controlled rectification. Early thyristors were primarily used to replace bulky mechanical switches and inefficient vacuum tubes, offering high-power control capabilities.

1960s: The concept of fast thyristors emerged, with research focusing on improving switching speeds and reducing losses to accommodate high-frequency applications.

1970s: Reverse Conducting Thyristors (RCTs) were developed to simplify circuit design and reduce system costs by integrating reverse-conducting diodes. Thyristors also began to be applied in large-scale power systems such as High-Voltage Direct Current (HVDC) transmission.

1980s: Innovations in gate drive technology, including optocouplers and integrated driver circuits, improved response speed and stability. Derivatives such as bidirectional thyristors (TRIACs) expanded alternating current (AC) control capabilities.

1990s: Thyristor technology entered a phase of high-frequency operation and modular design, expanding into renewable energy applications (e.g., wind turbine inverters) and electric vehicle (EV) charging systems.

Post-2000: The introduction of digital drive technology and intelligent control algorithms, combined with wide-bandgap materials like silicon carbide (SiC), significantly enhanced voltage/temperature tolerance and switching efficiency, enabling support for more complex power electronic systems.

Application Expansion: Thyristors have become core components in smart grids, high-speed rail traction converters, and industrial frequency converters. They continue to evolve toward ultra-high voltage (e.g., >10 kV) and miniaturization (e.g., chip-scale packaging), complementing IGBTs and MOSFETs in cost-sensitive, high-reliability systems such as renewable energy integration and energy storage.

The evolution of thyristors, from early single-function devices to key components in power electronic systems, has consistently focused on efficiency improvements, integration, and adaptability to diverse scenarios. Future advancements in materials and intelligent control will further solidify their irreplaceability in high-power applications.

II. Physical Model, Internal Structure, and Circuit Symbols of Thyristors

1. Physical Model (Fig. 1):

a) Thyristor schematic symbol;
b) Semiconductor structure;
c) Equivalent circuit.

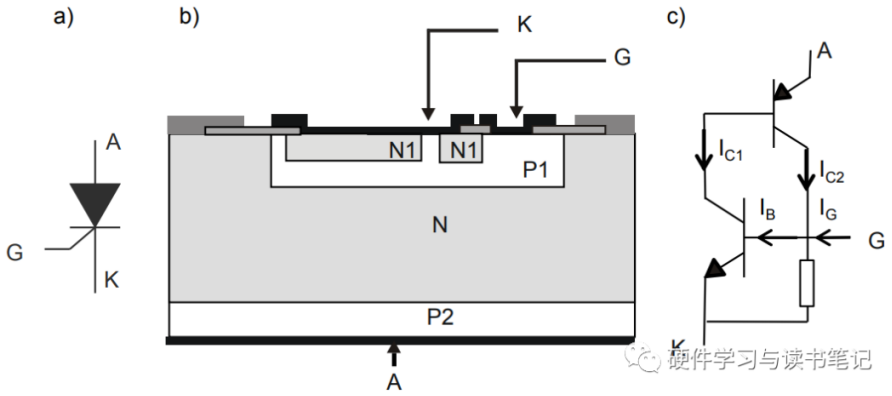


Figure 1 *Physical model of a thyristor*

A thyristor comprises four semiconductor layers (P-N-P-N) forming three PN junctions. In the blocking state, regardless of forward or reverse bias, at least one PN junction remains reverse-biased. Unlike diodes, thyristors are controllable; unlike transistors, their anode current does not scale proportionally with gate current. Conduction is triggered when the gate current reaches a threshold (typically tens of milliamperes). Once latched, the thyristor remains conducting (carrying currents from tens to thousands of amperes) until the anode current drops below a holding value or a reverse voltage is applied.

2. Internal Structure and Circuit Symbols (Fig. 2):

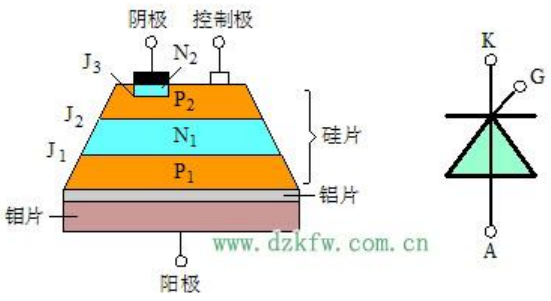


Figure 2 Internal structure and circuit symbols of a thyristor

3. Cross-Sectional Views of Alloy-Type and Fully Crimped Thyristor Packaging

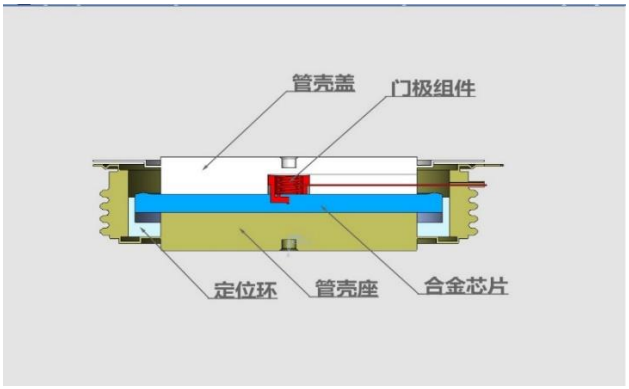


Figure 3 *Cross-sectional view of alloy-type thyristor packaging*

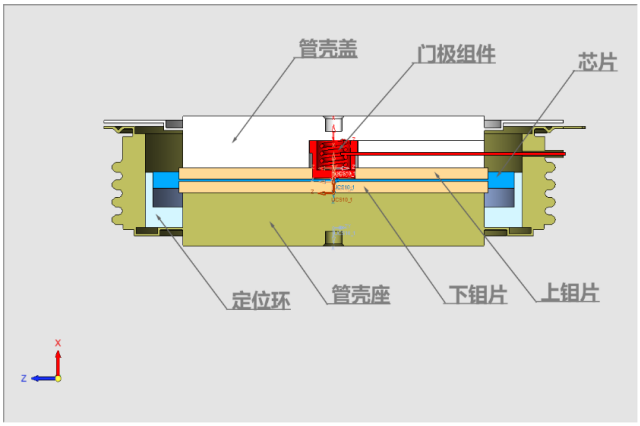


Figure 4 *Cross-sectional view of fully crimped thyristor packaging*

III. Specific Applications and Roles of Thyristors in Locomotive Rectifier Cabinets

1. Primary Functions of Thyristors in Locomotive Rectifier Cabinets

Thyristors are semiconductor power devices capable of controlled conduction under high voltage and current conditions. In locomotive rectifier cabinets, thyristors are primarily used for AC-to-DC conversion (rectification) and precise DC output control.

1.1 Rectification: A three-phase bridge rectifier circuit composed of thyristors converts alternating current (AC) from the locomotive's main generator into direct current (DC) for traction motors.

1.2 Voltage Regulation: By adjusting the thyristor firing angle (phase control), the DC output voltage can be modulated to control traction motor speed and locomotive velocity.

2. Application Scenarios for Thyristor Rectifier Cabinets

Thyristor rectifier cabinets are widely used in:

2.1 DC Traction Electric Locomotives: Examples include early Chinese models such as the SS3B and SS4 series, which utilize thyristor rectifier cabinets as primary conversion devices.

2.2 DC Traction Diesel-Electric Locomotives: Some diesel-electric locomotives employ diesel generator sets to supply power, with thyristor rectifier cabinets providing DC power to traction motors.

2.3 Transitional AC Traction Locomotives: Early AC traction locomotives used thyristor rectifier cabinets as intermediate stages before mature main inverter technology became available.

3. Technical Characteristics of Thyristor Rectifier Cabinets

3.1 High Power Handling: Thyristors withstand high voltages and currents, making them suitable for high-power locomotive applications.

3.2 Controllability: Output voltage can be flexibly adjusted via firing angle control to meet varying operational demands.

3.3 Reliability: Simple structure and long service life ensure stable operation in harsh environments.

3.4 High Cooling Requirements: Thyristors generate significant heat during operation, necessitating efficient cooling systems (e.g., forced air or water cooling).

4. Advantages and Disadvantages of Thyristor Rectifier Cabinets

Advantages:

4.1 Relatively simple structure and low cost.

4.2 Flexible control enabling smooth voltage regulation.

4.3 Mature technology with easy maintenance.

Disadvantages:

4.4 Relatively low efficiency and high energy losses.

4.5 Potential harmonic pollution to the grid, requiring additional filtering.

4.6 Unsuitable for high-frequency switching, limiting use in modern high-performance AC traction systems.

5. Modern Developments and Replacement Trends

With advancements in power electronics—particularly the emergence of Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBTs) and Gate Turn-Off Thyristors (GTOs)—traditional thyristor rectifier cabinets are gradually being superseded by advanced converter technologies.

Modern AC traction electric locomotives predominantly employ IGBT-based Pulse Width Modulation (PWM) inverters, which offer higher efficiency and superior dynamic performance.

Nevertheless, thyristor rectifier cabinets remain relevant for retrofitting older locomotives or specific applications.

6. Case Studies

Examples from China’s early SS-series electric locomotives:

6.1 SS3B Locomotive: Utilizes a three-phase fully controlled bridge rectifier circuit, where thyristors rectify AC from the traction transformer to drive DC traction motors.

6.2 SS4 Locomotive: Features optimized thyristor rectifier cabinet designs for improved reliability and efficiency.

In summary, thyristors played a pivotal role in the evolution of electric locomotive traction systems. While modern technologies have largely replaced their dominance, their contributions to locomotive traction development remain irreplaceable.

IV. Technical Requirements for Series-Connected Thyristors in Locomotive Rectifier Cabinets

1. Voltage Balancing

1.1 Issue: Manufacturing variations in static blocking characteristics (e.g., reverse leakage current, forward recovery charge) can cause uneven voltage distribution among series-connected thyristors.

Solutions:

1.1.1 Voltage-balancing resistors: Parallel resistors across each thyristor to equalize static voltage distribution.

1.1.2 RC snubbers: Parallel resistor-capacitor networks to suppress dynamic voltage imbalances (e.g., surge voltages or excessive dv/dt).

1.1.3 Zener diode protection: Parallel Zener diodes to clamp maximum voltage.

2. Trigger Synchronization

2.1 Issue: Trigger sensitivity differences may cause staggered turn-on of series-connected thyristors, leading to voltage imbalance.

Solutions:

2.1.1 High-quality gate driver circuits ensure simultaneous trigger pulse delivery.

2.1.2 Balancing inductors or capacitors in the trigger circuit compensate for delays.

3. Thermal Design

3.1 Issue: Harsher operating conditions for series-connected thyristors require uniform thermal management.

Solutions:

Implement efficient cooling systems (e.g., forced air/water cooling) to ensure uniform temperature distribution.

V. Technical Requirements for Parallel-Connected Thyristors in Locomotive Rectifier Cabinets

1. Current Sharing

1.1 Issue: Forward voltage-current characteristic mismatches may cause uneven current distribution among parallel-connected thyristors, leading to overloading.

Solutions:

1.1.1 Current-balancing inductors: Small inductors in series with each thyristor’s anode circuit.

1.1.2 Current-balancing resistors: Resistors in series with each thyristor’s anode circuit.

1.1.3 Device matching: Select thyristors with closely matched characteristics.

2. Trigger Synchronization

2.1 Issue: Non-simultaneous triggering may cause early-triggered thyristors to carry excessive current.

Solutions:

2.1.1 Precision gate drivers ensure synchronized trigger pulses.

2.1.2 Balancing capacitors in the trigger circuit compensate for delays.

3. Thermal Design

3.1 Issue: Higher total power dissipation in parallel configurations demands effective thermal management.

Solutions:

3.1.1 High-efficiency heat sinks or cooling systems.

3.1.2 Regular inspection of heat sink contact surfaces to minimize thermal resistance.

VI. Comprehensive Considerations for Series/Parallel Thyristors in Rectifier Cabinets

1. Device Selection:

1.1 Prioritize thyristors from the same manufacturer and batch for parameter consistency.

1.2 Ensure voltage/current ratings include sufficient margins to avoid operating near limits.

2. Protection Measures:

2.1 Overvoltage protection: Add RC snubbers in series configurations.

2.2 Overcurrent protection: Install fast-acting fuses or current sensors in parallel configurations.

2.3 Short-circuit protection: Implement rapid protection devices in the main circuit.

3. Installation and Maintenance:

3.1 Ensure environmental compliance (temperature, humidity, vibration).

3.2 Regularly inspect thyristor conditions and replace aged/damaged devices.

VII. Case Study: Replacing Series/Parallel Small-Power Thyristors with Fully Crimped High-Power Thyristors

1. Original Design of SS3B Locomotive Rectifier Cabinets:

- Cabinet I: 32 thyristors (KP600A/2800V) + 26 diodes (ZP800A/3000V).
- Cabinet II: 30 thyristors + 24 diodes.
- Total: 112 semiconductor devices (62 thyristors + 50 diodes), 800 kg per cabinet.

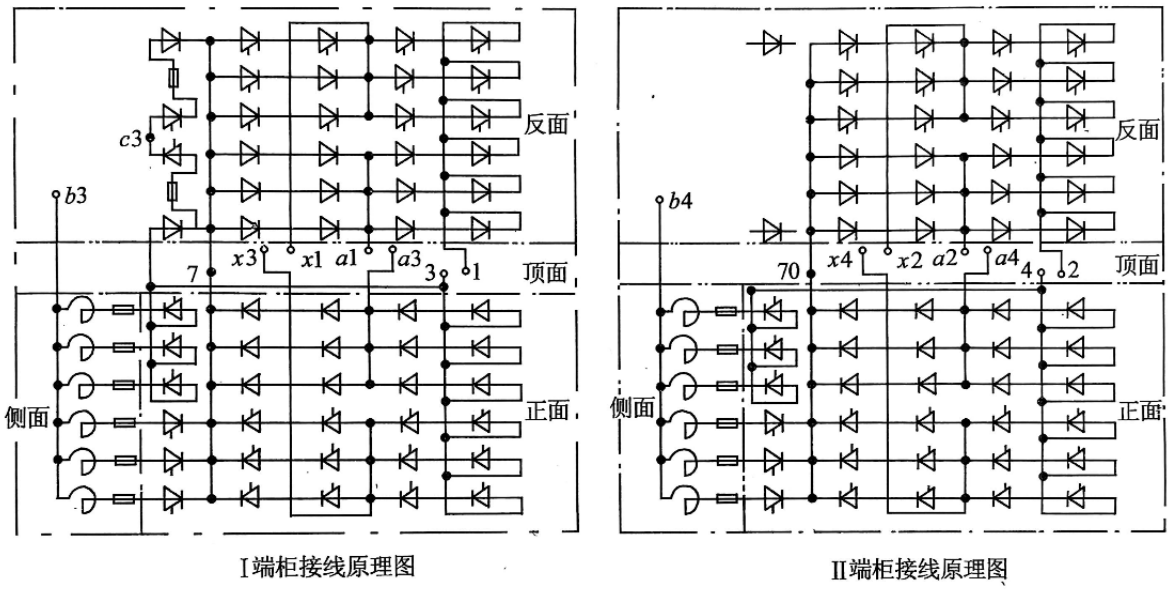


图 4 – 68　整流柜接线原理图

Figure 5 *Circuit diagram of SS3B Locomotive's Cabinet I & II*

Figure 6 *Physical photo of SS3B rectifier cabinet*

2. Retrofitted Design with Fully Crimped High-Power Thyristors:
   - Cabinet I: 12 thyristors (KP3600A/3000V) + 8 diodes (ZP4600A/3000V).
   - Cabinet II: 10 thyristors + 8 diodes.
   - Total: 38 semiconductor devices (22 thyristors + 16 diodes), 380 kg per cabinet.

Figure 7 *Retrofitted thyristors and diodes with heat sinks*

Figure 8 *Retrofitted thyristors and diodes with heat sinks*

VIII. Summary

Series/parallel thyristor configurations impose high technical demands, requiring careful attention to voltage/current balancing, trigger synchronization, and thermal management. Proper circuit design and protection strategies ensure stable operation under high-voltage/high-current conditions.

Replacing series/parallel small-power thyristors with fully crimped high-power thyristors in locomotive rectifier cabinets—demonstrated in the SS3B retrofit—offers the following advantages:

1. Enhanced Reliability: Eliminates voltage/current balancing issues and reduces failure points.
2. Simplified Design: Fewer components, no auxiliary circuits (e.g., snubbers).
3. Higher Efficiency: Reduced losses from balancing elements.
4. Space and Cost Savings: Compact footprint, lower maintenance, and production costs.
5. Improved Dynamics: Faster switching and consistent parameters.
6. Retrofit-Friendly: Ideal for modernizing legacy systems.

Conclusion

The adoption of fully crimped high-power thyristors in lieu of series/parallel small-power thyristors delivers transformative benefits in reliability, efficiency, space utilization, and cost-effectiveness. This approach is particularly advantageous for retrofitting aging locomotive rectifier cabinets, as exemplified by the SS3B case. With ongoing advancements in power electronics, high-power thyristors remain indispensable in high-voltage, high-current applications.

在机车整流柜用全压接大功率晶闸管替代小功率晶闸管串并联的优势

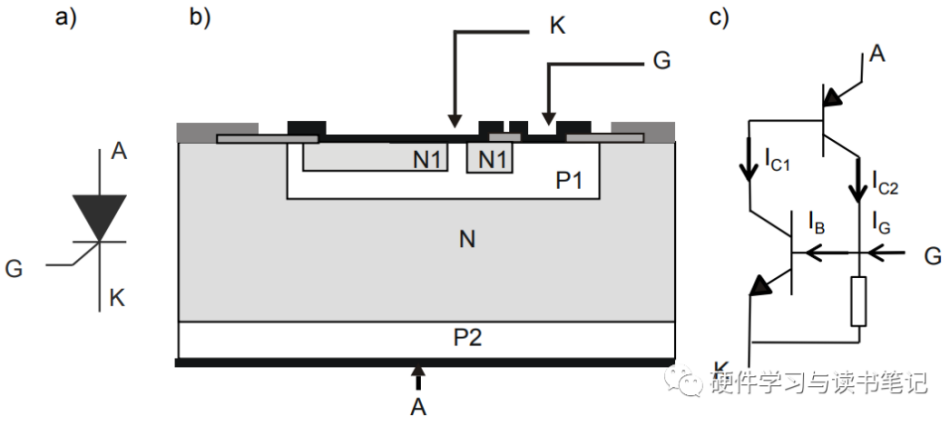
前言：晶闸管（也叫可控硅，SCR）在机车整流柜中的应用是非常重要的，尤其是在传统电力机车和一些现代内燃机车的电传动系统中，然而早期的电力机车，因为没有大功率晶闸管管，采用了中小功率晶闸管串并联来满足要求，对晶闸管参数要求及其严苛，体积大，可靠性低，随着科技的发展，用全压接大功率晶闸管替代中小功率晶闸管，减少串并联、改造电力机车整流柜具有非常明显的优势。

一、简单回顾晶闸管发展历史

- **1957年**：美国通用电气（General Electric）成功开发出第一只晶闸管，标志着可控整流时代的到来
- **1960年代**：提出快速晶闸管（Fast Thyristor）的概念，重点在于提高开关速度和降低损耗，适应高频应用
- **1970年代**：为满足工业自动化需求，研发逆导晶闸管（RCT），集成反向导电二极管以简化电路设计、降低成本；晶闸管开始应用于高压直流输电（HVDC）等大型系统
- **1980年代**：驱动技术革新（采用光耦合器和集成驱动电路），提升响应速度与稳定性，发展出双向晶闸管（TRIAC），扩展交流控制能力
- **1990年代**：进入高频化与模块化阶段，应用领域扩展到可再生能源（风力发电逆变器）、电动汽车充电系统等
- **2000年后**：引入数字驱动技术与智能控制算法，结合宽禁带材料（如SiC），显著提升耐压、耐温及开关效率，支持更复杂的电力电子系统
- **应用拓展**：晶闸管在智能电网、高速铁路牵引变流器、工业变频器等场景中成为核心元件，并向超高压（如10kV以上）和微型化（如芯片级封装）方向发展，与IGBT、MOSFET等器件互补，在新能源并网和储能系统中发挥低成本、高可靠性的优势
- **总结**：晶闸管技术演进始终围绕效率提升、集成化及多场景适应性展开，未来材料创新与智能控制将进一步推动其在高功率领域的不可替代性

二、晶闸管的物理模型、内部结构示意图及电路符号

- 1. 物理模型（如图1）
- • a）晶闸管元件符号
- • b）半导体结构



- c）等效电路

图1：晶闸管的物理模型

- 说明：晶闸管由四层、三个PN结组成；在阻断状态下，无论正向还是反向加电压，至少有一个PN结处于反偏；与二极管和三极管比较，晶闸管具有可控性和独特的导通特性，一旦导通后除非降低阳极电流或施加反向电压，否则保持导通状态

- **2. 晶闸管的内部结构示意图及电路符号**

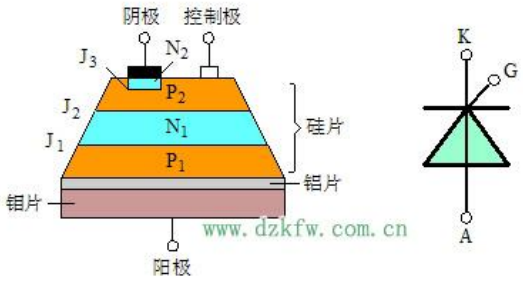


图2：晶闸管的内部结构示意图及电路符号

- **3. 封装结构剖面图**

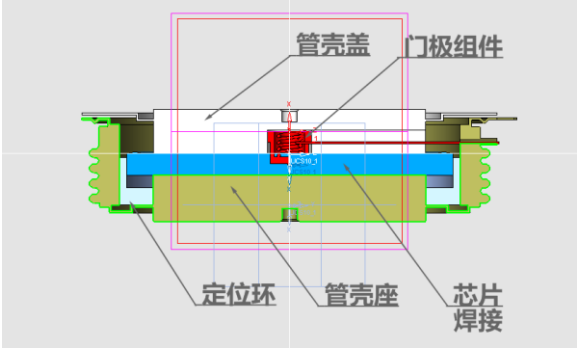


图3：合金芯片晶闸管封装结构剖面图

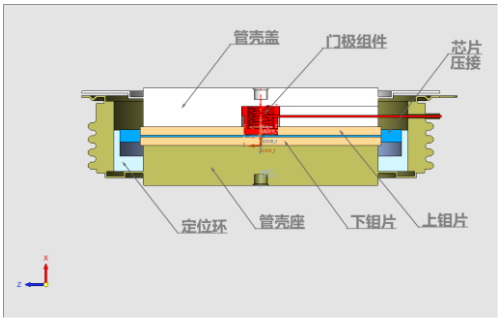


图4：全压接芯片晶闸管封装结构剖面图

三、晶闸管在机车整流柜中的具体应用情况及作用

- **1. 晶闸管在机车整流柜中的主要功能**
  - 晶闸管作为半导体功率器件，主要用于：
    - **1.1 整流功能**：通过三相桥式整流电路将机车主发电机输出的交流电转换为直流电，供牵引电动机使用
    - **1.2 调压功能**：通过调节触发角（相位控制）改变输出直流电压，实现对牵引电动机转速和机车运行速度的控制
- **2. 晶闸管整流柜的应用场景**
  - **2.1 直流传动电力机车**：例如国产韶山系列（如SS3B、SS4等），采用晶闸管整流柜作为主变流装置
  - **2.2 直流传动内燃机车**：部分内燃机车使用柴油发电机组供电，晶闸管整流柜为牵引电动机提供直流电源
  - **2.3 过渡型交流传动机车**：在主逆变器技术不成熟时，仍采用晶闸管整流柜作为中间环节
- **3. 晶闸管整流柜的技术特点**
  - **3.1 高功率处理能力**：能承受高电压和大电流
  - **3.2 可控性**：通过调节触发脉冲相位，灵活调整输出电压
  - **3.3 可靠性**：结构简单、使用寿命长，适应恶劣环境
  - **3.4 散热要求高**：工作中产生大量热量，需配备高效冷却系统（如强迫风冷或水冷）
- **4. 晶闸管整流柜的优缺点**
  - **优点**：
    - 4.1 结构相对简单，成本较低
    - 4.2 控制灵活，实现平滑电压调节
    - 4.3 技术成熟，维修方便
  - **缺点**：
    - 4.4 效率较低，能量损耗大
    - 4.5 可能产生谐波污染，需要额外滤波装置
    - 4.6 不适用于高频开关场合，限制了在现代高性能交流传动系统中的应用
- **5. 现代发展与替代趋势**
  - 随着IGBT、GTO等新型功率器件的出现，传统晶闸管整流柜逐步被先进变流技术取代
  - 现代交流传动电力机车多采用基于IGBT模块的PWM逆变器，实现更高效率与更好动态性能
  - 在老旧机车改造或特定应用中，晶闸管整流柜仍发挥重要作用
- **6. 实际案例**
  - **6.1 SS3B型机车**：采用三相桥式全控整流电路，通过晶闸管将牵引变压器输出的交流电整流为直流电，驱动直流牵引电动机
  - **6.2 韶山4型机车**：优化了晶闸管整流柜设计，提高可靠性与效率
  - 总结：晶闸管在机车整流柜中的应用虽逐渐被新技术取代，但在电传动技术发展中具有不可替代的作用

四、在机车整流柜中的应用晶闸管串联技术要求

- **1. 均压问题**

- 1.1 **问题描述**：制造工艺差异导致各晶闸管静态阻断特性（反向漏电流、正向恢复电荷等）不一致，串联时电压分布不均
- **解决方案**：
  - 1.1.1 均压电阻：每个晶闸管两端并联均压电阻，平衡静态电压分配
  - 1.1.2 RC缓冲电路：并联由电阻和电容组成的RC网络，抑制动态电压不平衡（如浪涌电压或dv/dt过快）
  - 1.1.3 稳压二极管保护：并联稳压二极管，限制最高电压

- **2. 触发一致性**
  - 2.1 **问题描述**：触发灵敏度不同可能导致串联晶闸管部分先导通，造成电压分布不均
  - **解决方案**：
    - 2.1.1 使用高质量触发驱动电路，确保所有晶闸管同时接收触发脉冲
    - 2.1.2 在触发回路中加入均衡电抗器或电容，补偿触发延迟
- **3. 散热设计**
  - 3.1 **问题描述**：串联晶闸管工作条件苛刻，需确保良好散热
  - **解决方案**：采用高效冷却系统（如强迫风冷或水冷），确保各晶闸管温度分布均匀

五、在机车整流柜中的应用晶闸管并联技术要求

- **1. 均流问题**
  - 1.1 **问题描述**：晶闸管正向伏安特性差异导致并联时电流分配不均，可能出现过载
  - **解决方案**：
    - 1.1.1 均流电抗器：在每个晶闸管阳极回路中串联小电感，平衡动态电流
    - 1.1.2 均流电阻：在每个晶闸管阳极回路中串联均流电阻，平衡静态电流
    - 1.1.3 匹配选型：选择伏安特性尽可能一致的晶闸管
- **2. 触发一致性**
  - 2.1 **问题描述**：并联晶闸管需要同时导通，否则先导通者会承担大部分电流，导致过载
  - **解决方案**：
    - 2.1.1 使用精密触发驱动电路，确保所有晶闸管同时接收触发脉冲
    - 2.1.2 在触发回路中加入均衡电容，补偿触发延迟
- **3. 散热设计**
  - 3.1 **问题描述**：并联晶闸管整体功耗较高，需确保散热性能
  - 3.2 **解决方案**：采用高效散热器或冷却系统，确保各晶闸管温升控制在允许范围
  - 3.3 **附加措施**：定期检查散热器接触面，防止因热阻过大而影响散热效果

六、整流柜中晶闸管串并联综合注意事项

- **1. 器件选型**
  - 1.1 优先选择同一厂家、同一批次的晶闸管，确保参数一致性
  - 1.2 考虑晶闸管额定电压与电流裕量，避免工作点接近极限
- **2. 保护措施**
  - 2.1 过压保护：在串联电路中增加过压吸收电路（如RC缓冲电路）
  - 2.2 过流保护：在并联电路中增加快速熔断器或过流检测装置
  - 2.3 短路保护：在主电路中设置快速保护装置，防止短路对晶闸管造成损害

- **3. 安装与维护**
  - 3.1 确保安装环境符合要求（温度、湿度、振动等）
  - 3.2 定期检查晶闸管运行状态，及时更换老化或损坏器件

七、用全压接大功率晶闸管替代小功率晶闸管串并联的案例

- **1. 案例展示**

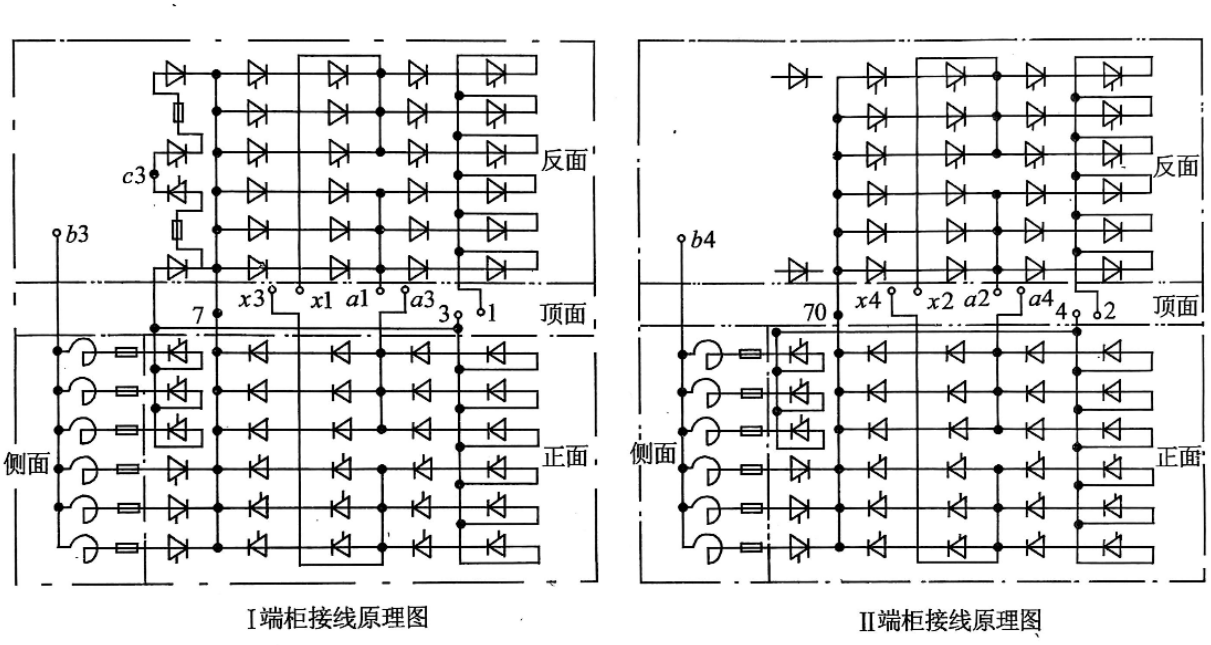


图 4－68　整流柜接线原理图

图5：SS3B电力机车Ⅰ号和Ⅱ号整流柜电路原理图

图6：SS3B电力机车整流柜实物照片

- **2. 改造前情况**
  - Ⅰ号柜：晶闸管32只，整流管26只
  - Ⅱ号柜：晶闸管30只，整流管24支
  - 总计：晶闸管62只，整流管50只，共112只，每柜重800公斤
  - 产品型号：
    - 晶闸管型号：KP600A/2800V
    - 整流管型号：ZP800A/3000V

图7：改造前各元件加散热器的外形图

- **3. 改造后情况（用全压接大功率晶闸管替代）**
  - Ⅰ号柜：晶闸管12只，整流管8只
  - Ⅱ号柜：晶闸管10只，整流管8支
  - 总计：晶闸管22只，整流管16只，共38只，每柜重380公斤
  - 产品型号：
    - 晶闸管型号：KP3600A/3000V
    - 整流管型号：ZP4600A/3000V

图8：改造后各元件加散热器的外形图

八、总结

- 概述晶闸管串联和并联技术要求较高，必须充分考虑均压、均流、触发一致性等问题
- 通过合理的电路设计和保护策略，可确保晶闸管在高电压、大电流条件下稳定运行
- 用全压接高压大电流晶闸管替代小功率晶闸管串并联结构是优化设计的常见思路
- 具体优势包括：

- **提高可靠性**：减少均压/均流问题，降低故障风险
- **简化电路设计**：减少外部补偿元件及触发控制复杂性
- **提高效率**：降低损耗、优化散热设计
- **节省空间**：减少器件数量，简化机械结构
- **降低成本**：减少外围元件和维护成本，提高生产效率
- **改善动态性能**：响应速度更快，参数一致性更好
- **适用于老旧机车改造**：是老旧机车整流柜现代化升级的最佳选择

ПРЕИМУЩЕСТВА ЗАМЕНЫ МАЛОМОЩНЫХ ТИРИСТОРОВ, СОЕДИНЁННЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО И ПАРАЛЛЕЛЬНО, НА ПОЛНОСТЬЮ ОБЖАТЫЕ ВЫСОКОМОЩНОСТНЫЕ ТИРИСТОРЫ В ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ ШКАФАХ ЛОКОМОТИВОВ

Аннотация: *Применение тиристоров (также известных как кремниевые управляемые выпрямители, SCR) в силовых шкафах локомотивов имеет критическое значение, особенно в традиционных электровозах и некоторых современных дизель-электрических локомотивах. Ранние электровозы, из-за отсутствия мощных тиристоров, использовали маломощные и среднемощные тиристоры, соединенные последовательно и параллельно, чтобы удовлетворить требования. Этот подход накладывал строгие требования к параметрам тиристоров, что приводило к большим объемам и низкой надежности. С развитием технологий замена маломощных и среднемощных тиристоров на мощные тиристоры с полным давлением для уменьшения последовательных и параллельных соединений и модернизации силовых шкафов локомотивов предлагает значительные преимущества.*

Ключевые слова: *тяговый подвижной состав, силовой преобразователь, тиристоры*

1. Краткая история развития тиристоров

1957: General Electric (GE) успешно разработала первый тиристорный продукт, что ознаменовало вступление силовой электроники в эру управляемого выпрямления. Ранние тиристоры в основном использовались для замены громоздких механических переключателей и неэффективных вакуумных ламп, предлагая возможности управления высокой мощностью.

1960-е годы: Была введена концепция быстрых тиристоров, с исследованиями, сосредоточенными на улучшении скорости переключения и снижении потерь для адаптации к высокочастотным приложениям.

1970-е годы: Для удовлетворения потребностей промышленной автоматизации были разработаны тиристоры с обратной проводимостью (RCT), интегрирующие диоды с обратной проводимостью для упрощения конструкции схем и снижения системных затрат. Тиристоры также начали использоваться в крупномасштабных энергетических системах, таких как высоковольтная передача постоянного тока (HVDC).

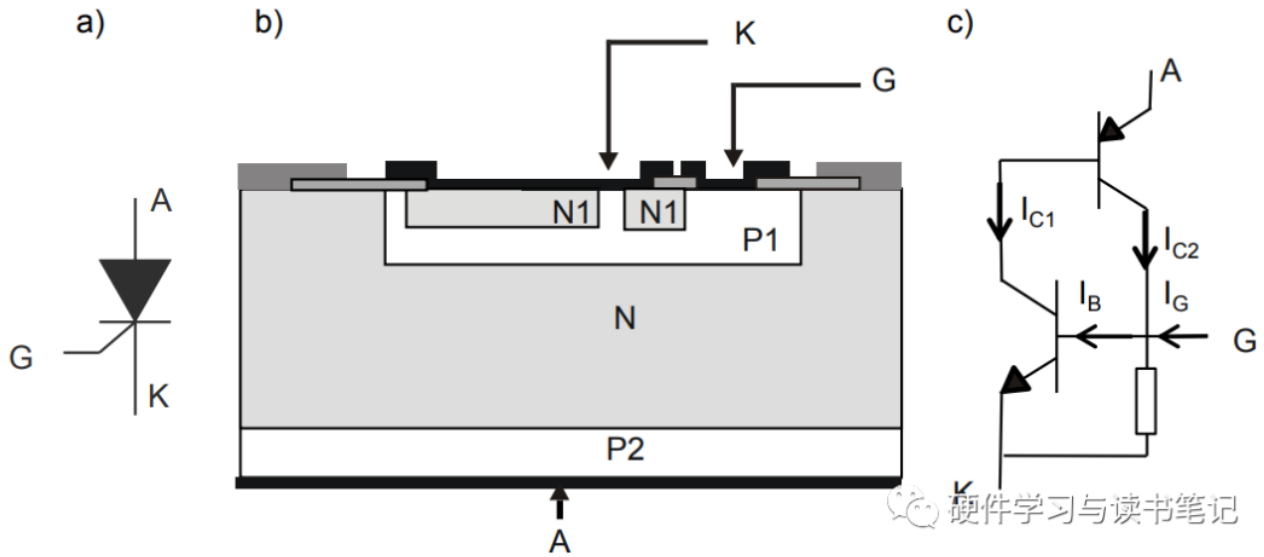
1980-е годы: Инновации в технологии управления, такие как оптопары и интегрированные схемы управления, улучшили скорость реакции и стабильность. Производные устройства, такие как двунаправленные тиристоры (TRIAC), расширили возможности управления переменным током.

1990-е годы: Технология тиристоров вошла в фазу высокочастотного и модульного развития, расширяясь на новые рынки, такие как возобновляемая энергетика (например, инверторы для ветровой энергии) и системы зарядки электромобилей.
После 2000 года: Внедрение цифровых технологий управления и интеллектуальных алгоритмов управления, в сочетании с материалами с широкой запрещенной зоной, такими как карбид кремния (SiC), значительно улучшило устойчивость к напряжению, температурную устойчивость и эффективность переключения, поддерживая более сложные силовые электронные системы.
Расширение применения: Тиристоры стали ключевыми компонентами в интеллектуальных сетях, тяговых преобразователях для высокоскоростных поездов и промышленных частотных преобразователях. Они также развивались в направлении сверхвысокого напряжения (например, выше 10 кВ) и миниатюризации (например, корпуса на уровне чипов).

Дополняя устройства, такие как IGBT и MOSFET, тиристоры продолжают предлагать экономически эффективные и надежные решения в интеграции возобновляемой энергии в сеть и системах хранения энергии.
От ранних устройств с одной функцией до ключевых компонентов в силовых электронных системах, технология тиристоров развивалась вокруг повышения эффективности, интеграции и адаптации к множеству сценариев. Будущие инновации в материалах и интеллектуальное управление еще больше укрепят их незаменимость в высокомощных приложениях.

2. Физическая модель, внутренняя структура и условные обозначения тиристоров

1. Физическая модель (Рисунок 1):



a) Условное обозначение тиристора, b) Полупроводниковая структура, c) Эквивалентная схема.

***Рисунок 1**: Физическая модель тиристора*

Тиристор состоит из четырех слоев и трех PN-переходов. P-легированный анодный слой находится внизу, за ним следует N-базовая область, P-базовая область и N+ катодный слой. В блокирующем состоянии, независимо от того, приложено ли прямое или обратное напряжение, PN-переход остается обратно смещенным. Тиристоры являются симметричными блокирующими устройствами. По сравнению с диодами, они

предлагают управляемость; по сравнению с транзисторами, они не демонстрируют пропорционального увеличения анодного тока с увеличением тока управления. Только когда ток управления достигает определенного порога (обычно десятки миллиампер), анод-катод переходит из блокирующего состояния в проводящее. После начала проводимости тиристор может выдерживать токи от десятков до тысяч ампер, и управляющий электрод, как правило, теряет контроль, поддерживая состояние проводимости. Чтобы выключить его, анодный ток должен быть уменьшен ниже определенного уровня или приложено обратное напряжение. После выключения способность к управлению восстанавливается.

2. Внутренняя структура и условные обозначения:

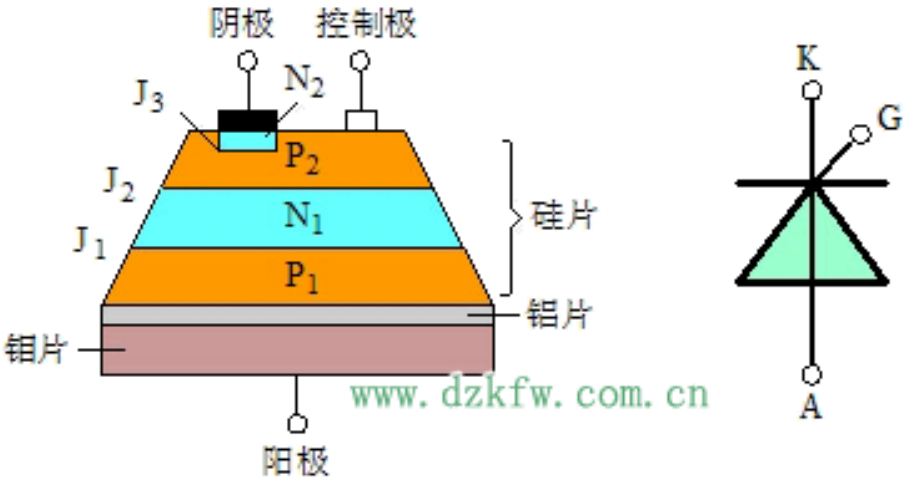


***Рисунок 2**: Внутренняя структура и условные обозначения тиристора*

3. Поперечное сечение структуры корпуса тиристора с полным давлением:

3. Конкретные применения и роли тиристоров в силовых шкафах локомотивов

1. Основные функции тиристоров в силовых шкафах локомотивов:

Тиристоры являются полупроводниковыми силовыми устройствами с управляемой проводимостью, способными работать при высоком напряжении и большом токе. В силовых шкафах локомотивов тиристоры в основном используются для преобразования переменного тока в постоянный (выпрямление) или для точного управления выходным постоянным током.

1.1 Функция выпрямления: Через трехфазную мостовую схему выпрямления, состоящую из тиристоров, переменный ток, генерируемый главным генератором локомотива, преобразуется в постоянный для использования тяговыми двигателями.

1.2 Функция регулирования напряжения: Путем регулирования угла включения тиристора (фазовое управление) можно изменять выходное постоянное напряжение, что позволяет управлять скоростью тяговых двигателей и движением локомотива.

2. Сценарии применения тиристорных силовых шкафов:

Тиристорные силовые шкафы широко используются в следующих типах локомотивов:

2.1 Электровозы с постоянным током: Например, ранние отечественные электровозы серии Шаосань (например, SS3B, SS4), которые используют тиристорные силовые шкафы в качестве основных преобразовательных устройств.

2.2 Дизель-электрические локомотивы с постоянным током: Некоторые дизельные локомотивы используют дизельные генераторные установки для подачи питания, а тиристорные силовые шкафы обеспечивают постоянный ток для тяговых двигателей.
2.3 Переходные локомотивы с переменным током: Некоторые ранние локомотивы с переменным током, до полного развития технологии главных инверторов, все еще использовали тиристорные силовые шкафы в качестве промежуточных этапов.
3. Технические характеристики тиристорных силовых шкафов:
3.1 Высокая мощность обработки: Тиристоры могут выдерживать высокие напряжения и большие токи, что подходит для передачи высокой мощности в локомотивах.
3.2 Управляемость: Путем регулирования угла включения импульсов управления можно гибко регулировать выходное напряжение для удовлетворения различных условий эксплуатации.
3.3 Надежность: Тиристоры имеют простую конструкцию, длительный срок службы и могут стабильно работать в суровых условиях.
3.4 Высокие требования к охлаждению: Из-за значительного выделения тепла во время работы силовые шкафы обычно оснащены эффективными системами охлаждения (например, принудительное воздушное или водяное охлаждение).
4. **Преимущества и недостатки тиристорных силовых шкафов**:
Преимущества:
4.1 Относительно простая конструкция и низкая стоимость.
4.2 Гибкое управление, позволяющее плавно регулировать напряжение.
4.3 Зрелая технология, простота обслуживания.
Недостатки:
4.4 Относительно низкая эффективность, значительные потери энергии.
4.5 Возможное гармоническое загрязнение сети, требующее дополнительных фильтрующих устройств.
4.6 Не подходят для высокочастотных переключающих приложений, что ограничивает их использование в современных высокопроизводительных системах с переменным током.
5. **Современное развитие и тенденции замены**:
С развитием силовой электроники, особенно с появлением новых силовых устройств, таких как IGBT (биполярные транзисторы с изолированным затвором) и GTO (тиристоры с управляемым выключением), традиционные тиристорные силовые шкафы постепенно заменяются более передовыми технологиями преобразования.
В современных электровозах с переменным током главные преобразователи обычно используют IGBT-модули в инверторах с широтно-импульсной модуляцией (PWM), предлагая более высокую эффективность и лучшую динамическую производительность. Однако тиристорные силовые шкафы все еще играют важную роль в модернизации старых локомотивов или в определенных сценариях применения.
6. Практические примеры:
В качестве примеров можно привести ранние отечественные электровозы серии Шаосань:

6.1 Локомотив SS3B: Использует трехфазную полностью управляемую мостовую схему выпрямления, применяя тиристоры для выпрямления переменного тока от тягового трансформатора в постоянный, приводя в действие тяговые двигатели постоянного тока.
6.2 Локомотив SS4: Дальнейшая оптимизация конструкции тиристорного силового шкафа, повышение надежности и эффективности.

В заключении, применение тиристоров в силовых шкафах локомотивов представляет собой важный этап в развитии электровозов. Хотя современные технологии постепенно заменяют их доминирующую позицию, тиристоры сыграли незаменимую роль в эволюции технологии электрической тяги локомотивов.
4. Технические требования для последовательного соединения тиристоров в силовых шкафах локомотивов
1. Проблемы распределения напряжения:
1.1 Проблема: Из-за производственных вариаций статические блокирующие характеристики (обратный ток утечки, заряд восстановления и т.д.) каждого тиристора могут отличаться, что приводит к неравномерному распределению напряжения при последовательном соединении.
Решения:
1.1.1 Резисторы для выравнивания напряжения: Параллельные резисторы для выравнивания напряжения на каждом тиристоре для балансировки статического распределения напряжения.
1.1.2 RC-снабберные цепи: Параллельные RC-цепи (резистор и конденсатор) на каждом тиристоре для подавления динамического дисбаланса напряжения (например, скачки напряжения или чрезмерное dv/dt).
1.1.3 Защита стабилитронами: в некоторых случаях стабилитроны могут быть подключены параллельно тиристорам для ограничения максимального напряжения.
2. Согласованность включения:
2.1 Проблема: последовательно соединенные тиристоры должны включаться одновременно, но различия в чувствительности включения могут привести к тому, что некоторые тиристоры включатся раньше, вызывая неравномерное распределение напряжения.
Решения:
2.1.1 Высококачественные схемы управления включением: Обеспечивают одновременное получение импульсов включения всеми тиристорами.
2.1.2 Балансировочные индуктивности или конденсаторы: Добавление балансировочных индуктивностей или конденсаторов в цепь включения для компенсации задержек включения.
3. Тепловой расчет:
3.1 Проблема: последовательно соединенные тиристоры могут работать в более жестких условиях, требуя эффективного управления теплом.
Решения:
Использование эффективных систем охлаждения (например, принудительное воздушное или водяное охлаждение) для обеспечения равномерного распределения температуры на каждом тиристоре.

5. Технические требования для параллельного соединения тиристоров в силовых шкафах локомотивов

1. Проблемы распределения тока:

1.1 Проблема: Из-за различий в вольтамперных характеристиках параллельно соединенные тиристоры могут испытывать неравномерное распределение тока, что приводит к перегрузке некоторых тиристоров. Решения:

1.1.1 Индуктивности для выравнивания тока: Последовательные индуктивности (индуктивности для выравнивания тока) в анодной цепи каждого тиристора для балансировки динамического распределения тока.

1.1.2 Резисторы для выравнивания тока: Последовательные резисторы в анодной цепи каждого тиристора для балансировки статического распределения тока.

1.1.3 Подбор по параметрам: Выбор тиристоров с максимально схожими вольт-амперными характеристиками для параллельного соединения.

2. Согласованность включения:

2.1 Проблема: Параллельно соединенные тиристоры должны включаться одновременно; в противном случае первый включившийся тиристор будет нести большую часть тока, что приведет к перегрузке.

Решения:

2.1.1 Прецизионные схемы управления включением: Обеспечивают одновременное получение импульсов включения всеми тиристорами.

2.1.2 Балансировочные конденсаторы: Добавление балансировочных конденсаторов в цепь включения для компенсации задержек включения.

3. Тепловой расчет:

3.1 Проблема: параллельно соединенные тиристоры имеют более высокие общие потери мощности, требуя эффективного управления теплом.

Решения:

Использование эффективных радиаторов или систем охлаждения для обеспечения того, чтобы повышение температуры каждого тиристора оставалось в допустимых пределах.

3.2 Регулярная проверка: Регулярная проверка контактных поверхностей радиаторов для избежания чрезмерного теплового сопротивления.

6. Комплексные соображения для последовательного и параллельного соединения тиристоров в силовых шкафах

1. Выбор устройств:

1.1 Предпочтение тиристорам от одного производителя и партии для обеспечения согласованности параметров.

1.2 Учет номинального напряжения и тока тиристоров с достаточным запасом, чтобы избежать работы на пределе.

2. Меры защиты:

2.1 Защита от перенапряжения: Добавление цепей поглощения перенапряжения (например, RC-снабберных цепей) в последовательных цепях.

2.2 Защита от перегрузки по току: Добавление быстродействующих предохранителей или устройств обнаружения перегрузки по току в параллельных цепях.

2.3 Защита от короткого замыкания: Установка быстродействующих защитных устройств в главной цепи для предотвращения повреждения тиристоров от короткого замыкания.

3. Установка и обслуживание:

3.1 Обеспечение соответствия условий установки требованиям (например, температура, влажность, вибрация).

3.2 Регулярная проверка рабочих условий тиристоров и своевременная замена старых или поврежденных устройств.

7. Пример: Замена маломощных тиристоров, соединенных последовательно и параллельно, на мощные тиристоры с полным давлением.

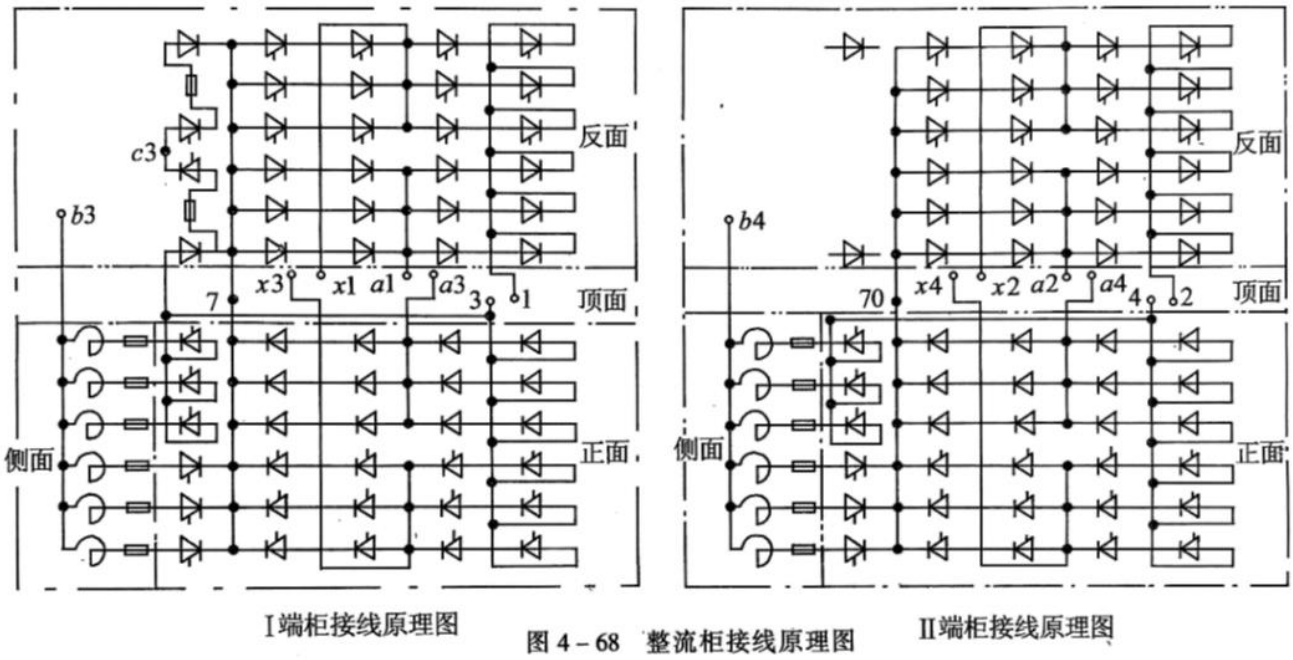


***Рисунок 3**: Схема силовых шкафов № I и № II в электровозе SS3B*

***Рисунок** 4: Фотография силового шкафа электровоза SS3B.*

3. Количество и модели тиристоров и выпрямителей, используемых в силовых шкафах до модернизации:
- Шкаф № I: 32 тиристора, 26 выпрямителей.
- Шкаф № II: 30 тиристоров, 24 выпрямителя.
- Общее количество полупроводниковых компонентов: 62 тиристора, 50 выпрямителей, всего 112 компонентов. Каждый шкаф весил 800 кг.
- Модель тиристора: KP600A/2800V
- Модель выпрямителя: ZP800A/3000V

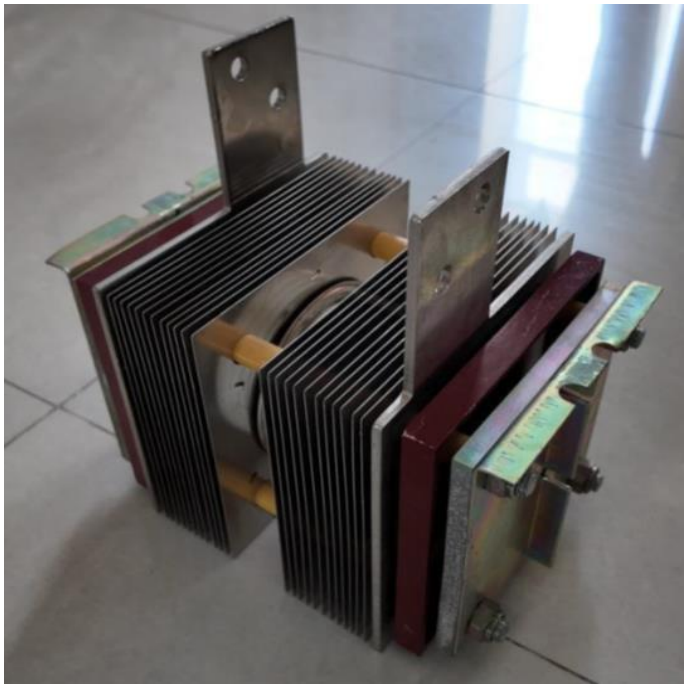


***Рисунок 5**: Общий чертеж электронных компонентов и радиатора в сборе*

***Рисунок 6**: Общий чертеж электронных компонентов и радиатора в сборе*

4. После замены маломощных тиристоров, соединенных последовательно и параллельно, на мощные тиристоры с полным давлением:
- Шкаф № I: 12 тиристоров, 8 выпрямителей.
- Шкаф № II: 10 тиристоров, 8 выпрямителей.
- Общее количество полупроводниковых компонентов: 22 тиристора, 16 выпрямителей, всего 38 компонентов. Каждый шкаф весил 380 кг.

- Модель тиристора: KP3600A/3000V
- Модель выпрямителя: ZP4600A/3000V

5. Резюме:

Технические требования для последовательного и параллельного соединения тиристоров высоки, что требует тщательного рассмотрения вопросов распределения напряжения, тока и согласованности включения, а также соответствующих решений. Благодаря разумной конструкции схем и стратегиям защиты тиристоры могут стабильно и надежно работать при высоком напряжении и большом токе.

Замена маломощных тиристоров, соединенных последовательно и параллельно, на мощные тиристоры с полным давлением в силовых шкафах локомотивов является распространенным подходом к оптимизации конструкции, успешно примененным в модернизации SS3B. Конкретные преимущества и выгоды заключаются в следующем:

1. Повышенная надежность:

1.1 Уменьшение проблем распределения напряжения/тока: Маломощные тиристоры, соединенные последовательно и параллельно, требуют решений для распределения напряжения и тока, что может привести к перегрузке или повреждению. Мощные тиристоры могут выдерживать требуемое напряжение и ток с одним устройством, избегая этих сложностей.

1.2 Снижение риска отказов: в последовательных и параллельных конфигурациях отказ любого тиристора может повлиять на всю цепь. Мощные тиристоры уменьшают количество устройств, тем самым снижая вероятность отказа.

2. Упрощенная конструкция схемы:

2.1 Меньше внешних компонентов: Маломощные тиристоры, соединенные последовательно и параллельно, часто требуют дополнительных компонентов, таких как резисторы для выравнивания напряжения, индуктивности для выравнивания тока и RC-снабберные цепи, что увеличивает сложность схемы. Мощные тиристоры могут использоваться напрямую без дополнительных компенсирующих компонентов.

2.2 Упрощенное управление включением: Мощные тиристоры требуют только одного сигнала включения, тогда как последовательные и параллельные конфигурации требуют точной синхронизации нескольких сигналов включения, что усложняет конструкцию.

3. Повышенная эффективность:

3.1 Снижение потерь: Резисторы для выравнивания напряжения и индуктивности для выравнивания тока в последовательных и параллельных конфигурациях генерируют дополнительные потери мощности. Мощные тиристоры устраняют эти дополнительные компоненты, повышая общую эффективность.

3.2 Оптимизированное управление теплом: Мощные тиристоры концентрируют плотность мощности, облегчая проектирование эффективных систем охлаждения. В то время как несколько маломощных тиристоров в последовательных и параллельных конфигурациях сложнее управлять теплом.

4. Экономия места:

4.1 Меньше компонентов: Мощные тиристоры заменяют несколько маломощных тиристоров, значительно уменьшая количество компонентов и экономя место.

4.2 Упрощенная механическая конструкция: Последовательные и параллельные конфигурации требуют сложных соединений и креплений, тогда как мощные тиристоры упрощают механическую конструкцию.
5. Снижение затрат:
Хотя мощные тиристоры могут иметь более высокую стоимость за единицу, их общие системные преимущества очевидны:
5.1 Снижение затрат на периферийные компоненты: Нет необходимости в резисторах для выравнивания напряжения, индуктивностях для выравнивания тока или других дополнительных компонентах.
5.2 Снижение затрат на обслуживание: Меньше компонентов означает снижение усилий по обслуживанию и более низкие долгосрочные эксплуатационные затраты.
5.3 Повышение эффективности производства: Упрощенные процессы проектирования и сборки могут ускорить производственные циклы.
6. Улучшенная динамическая производительность:
6.1 Более высокая скорость реакции: Мощные тиристоры обычно предлагают лучшие динамические характеристики (например, скорость переключения и устойчивость к dv/dt), адаптируясь к более сложным условиям эксплуатации.
6.2 Согласованность параметров: Согласованность параметров одного мощного тиристора превосходит согласованность нескольких маломощных тиристоров, соединенных вместе, улучшая динамическую производительность системы.
7. Лучше подходит для модернизации старых силовых шкафов локомотивов:
С развитием силовой электроники процессы производства мощных тиристоров постоянно улучшаются, что позволяет им удовлетворять большинство требований высокого напряжения и большого тока. В силовых шкафах локомотивов мощные тиристоры могут достигать более высокой плотности мощности и надежности.

Заключение:

Замена маломощных тиристоров, соединенных последовательно и параллельно, на мощные тиристоры с полным давлением предлагает значительные преимущества в надежности, эффективности, затратах и экономии места, что делает их лучшим выбором для модернизации старых силовых шкафов локомотивов.

BEIJING XINCHUANG CHUNSHU RECTIFIER Co. (КИТАЙ)

Gao Zhancheng: д.т.н., профессор, генеральный директор

УДК 621.373.8:621.785:629.4.01 ГРНТИ 44.29.29, 55.35.29

Д. А. Бирюкова

ЛАЗЕРНАЯ МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕТАЛЛОВ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ АГРЕГАТОВ И УЗЛОВ ТЕПЛОВОЗОВ

Аннотация. *В статье рассматривается актуальная проблема повышения эксплуатационной надежности агрегатов и узлов тепловозов, применением передовых методов структурирования поверхностей деталей для повышения их износостойкости и долговечности. Анализируются как апробированные современные методы модификации металлических поверхностей, включая лазерное упрочнение, легирование, наплавку и термохимическую обработку, так и перспективная технология лазерной маркировки, формирующая особый рельеф поверхности, который способствует созданию благоприятных условий для удержания смазочного материала. В результате уменьшаются потери энергии в узлах трения, повышается их ресурс и эксплуатационная надежность. Внедрение данной технологии позволит существенно повысить эксплуатационные характеристики деталей, снизить износ и увеличить межремонтный интервал, что будет способствовать оптимизации производственных процессов ремонтных предприятий.*

Ключевые слова: *лазерная модификация поверхностей металлов, лазерная маркировка поверхностей узлов и агрегатов тепловозов, повышение эксплуатационной надежности тепловозов.*

В современной локомотивостроительной и локомотиворемонтной отраслях особое внимание уделяется инновационным технологиям обработки поверхностей металлических деталей. Применение передовых методов структурирования позволяет существенно улучшить рабочие характеристики силовых агрегатов локомотивов и повысить экономическую эффективность их эксплуатации.

Выделяют три ключевых направления в области модификации поверхностей, каждое из которых предлагает уникальные технологические решения:

- механическая обработка, включающая как финишную обработку с помощью режущего инструмента, так и деформационное упрочнение поверхностного слоя; этот метод позволяет добиться необходимых параметров шероховатости и прочности.
- химический метод, основанный на контролируемом травлении поверхности для обеспечения формирования требуемого микрорельефа избирательным удалением материала.
- термическая обработка, представляющая собой воздействие высокой температурой для создания специфического микропрофиля поверхности; этот подход особенно эффективен при работе с материалами, чувствительными к химическому воздействию.

Выбор конкретного метода структурирования зависит от множества факторов, основными из которых являются тип обрабатываемого материала, конструктивные особенности детали и требуемые эксплуатационные характеристики.

В ходе механической обработки материалов с помощью режущего инструмента или абразивных частиц происходит формирование специфической поверхности [1]. Резание приводит к удалению микрочастиц различного размера, в результате чего образуются характерные борозды. Интересно, что даже при переходе от грубой обработки к ее финишной стадии микронеровности сохраняют значительное разнообразие своих геометрических характеристик. Особого внимания требуют острые кромки, возникающие в процессе обработки – они негативно влияют на фрикционные свойства и долговечность изделия, поэтому их необходимо скруглять.

Альтернативный подход к структурированию поверхности представляет собой химическое травление с использованием специальных шаблонов [2]. Этот метод демонстрирует высокую эффективность благодаря возможности одновременной обработки всех углублений. Важное преимущество заключается в универсальности применения – технология подходит для материалов различной твёрдости и изделий сложной конфигурации. Однако практическому внедрению препятствует существенный недостаток – необходимость использования множества дорогостоящих шаблонов для определения оптимальных параметров структуры.

Революционным решением в области модификации поверхностей стало изобретение метода вибронакатывания, автором которого является Ю. Г. Шнейдер [3]. Принцип технологии базируется на контролируемом изменении структуры верхнего слоя металла под воздействием колеблющегося элемента при одновременном поступательном перемещении обрабатываемой детали. На протяжении более двух десятилетий данный метод считался одним из самых эффективных способов структурирования. Тем не менее, его применение ограничено рядом факторов – так, технология не подходит для работы с хрупкими материалами, тонкими плёнками и кристаллами, а также накладывает ограничения на геометрию обрабатываемых изделий [4].

В современном мире стремительного технологического прогресса возникает острая потребность в инновационных решениях для модификации поверхностей. Это обусловлено постоянно растущими требованиями к эксплуатации различного оборудования. Традиционные методы обработки уже не справляются с новыми вызовами, что побуждает исследователей искать альтернативные подходы к структурированию материалов.

Особенно актуальной эта проблема становится в условиях интенсификации производственных процессов и ужесточения эксплуатационных нагрузок. Машины и аппараты работают в более агрессивных средах, при экстремальных температурах и повышенных нагрузках, что требует принципиально новых решений в области поверхностной обработки.

Разработка современных методов структурирования поверхностей открывает широкие возможности для создания материалов с улучшенными характеристиками

износостойкости, трения и коррозионной стойкости. Это становится ключевым фактором в повышении эффективности и долговечности технического оборудования нового поколения.

Одним из инновационных методов является обработка поверхности металлов лазерами. Лазерная обработка позволяет создавать сложные трехмерные структуры с высокой точностью и разрешением. Лазеры могут использоваться для гравировки, маркировки, резки и сварки металлов, а также для изменения их физических и химических свойств.

Лазерная обработка поверхностей металлов обладает рядом преимуществ:

- возможность локального воздействия на поверхность;
- высокая концентрация энергии в ограниченном временном диапазоне;
- отсутствие вредных выбросов;
- возможность обработки в обычных атмосферных условиях;
- транспортировка луча на значительные расстояния [5].

В современном локомотиворемонтном комплексе активно применяются лазерные технологии обработки металлических поверхностей. Эти инновационные технологии успешно используются при ремонте различных агрегатов и узлов (рисунок 1). Основные области применения, их достоинства и недостатки представлены в таблице 1.

Рисунок 1 – Основные технологии лазерной модификации поверхностей

Таблица 1 - Технологии лазерного структурирования поверхностей металлов [6]

Технология структури-рования	Суть метода	Область применения	Преимущества	Недостатки
Упрочнение	нагрев поверхности до сверхкритических температур с быстрым охлаждением	детали машин, инструменты, узлы трения	повышение износостойкости, минимальное коробление, локальность обработки	высокая стоимость оборудования, требует точного контроля режимов
Легирование	нанесение легирующих элементов на поверхность	износостойкие детали, узлы трения, режущий инструмент	улучшение механических свойств, повышение коррозионной стойкости, улучшение тепловых свойств	сложность контроля качества, возможность образования дефектов, ограничения в обработке
Наплавка	нанесение расплавленного материала на поверхность	восстановление размеров деталей, наложение износостойких покрытий	возможность восстановления изношенных деталей, гибкость процесса, возможность обработки сложных поверхностей	требует точного контроля параметров, высокая стоимость оборудования, необходимость подготовки поверхности
Термо-химическая обработка	нанесение покрытий с изменением химического состава поверхности	детали, работающие в агрессивных средах	улучшение коррозионной стойкости, повышение износостойкости, возможность получения специальных свойств	ограничения по глубине обработки, сложность технологического процесса, требования к квалификации персонала

Лазерное упрочнение позволяет значительно повысить износостойкость трущихся поверхностей деталей без изменения их геометрии. Этот метод особенно эффективен при обработке шеек валов, поверхностей качения и других ответственных узлов.

Лазерное легирование обеспечивает насыщение поверхностного слоя металла легирующими элементами, что существенно улучшает эксплуатационные характеристики деталей. Метод широко применяется при ремонте деталей, работающих в условиях интенсивного износа и высоких нагрузок.

Лазерная наплавка позволяет восстанавливать геометрические размеры изношенных деталей с высокой точностью. Этот метод особенно ценен при ремонте дорогостоящих узлов и агрегатов, где восстановление традиционными методами затруднено или экономически нецелесообразно.

Термохимическая обработка с использованием лазерного излучения обеспечивает формирование защитных покрытий с особыми физико-химическими свойствами. Метод применяется для защиты деталей от коррозии, окисления и других видов поверхностного

разрушения [7]. Распределение сферы применения различных технологий в условиях современного локомотиворемонтного производства представлено на рисунке 2.

Рисунок 2 – Различные технологии лазерной модификации поверхностей

Лазерное упрочнение, легирование и наплавка нашли широкое применение в ремонте локомотивов, а вот термохимическая обработка является одним из инновационных методов. Этот метод позволяет существенно увеличить износостойкость деталей за счет формирования особого микрорельефа и изменения физико-химических свойств поверхностного слоя.

Преимущества термохимической обработки особенно заметны при восстановлении коленчатых валов, шатунов и элементов зубчатых передач. Метод позволяет создавать на поверхности деталей специальные зоны с повышенной твердостью, которые эффективно распределяют нагрузку при трении. При этом глубина модификации составляет 0,1–0,5 мм, что обеспечивает оптимальное сочетание прочности и пластичности материала.

Экономический эффект от внедрения данных технологий достигает 20–30% за счет увеличения ресурса деталей и сокращения времени ремонта. При этом срок службы восстановленных узлов возрастает в 1,5–2 раза по сравнению с традиционными методами ремонта [8].

Помимо широко распространенных методов модификации поверхностей металлов, представляет значительный интерес еще один менее известный, но не менее перспективный метод – лазерная маркировка. Она заключается в воздействии высокоэнергетическим лазерным лучом на поверхность материала, что приводит к его локальному испарению и окислению, существенно изменяя трибологические характеристики материалов. В процессе обработки формируется особый рельеф поверхности, который способствует созданию благоприятных условий для удержания смазочного материала. В результате уменьшаются потери энергии в узлах трения, повышается их ресурс и эксплуатационная надежность.

Основные преимущества микроструктурированного покрытия в контексте снижения трения:

- формирование микрополостей, которые эффективно удерживают смазку и создают гидродинамический эффект;
- уменьшение эффективной площади контакта между трущимися поверхностями;
- изменение характера трения с граничного на смешанный или жидкостный;
- снижение интенсивности износа за счет оптимизации распределения нагрузки.

При этом лазерная обработка позволяет создавать направленные микроканавки и углубления, которые способствуют циркуляции смазочного материала и его равномерному распределению по поверхности трения. Это особенно важно для высоконагруженных узлов тепловоза, таких как коленчатые валы и подшипники.

Экспериментальные данные показывают, что после применения лазерной маркировки коэффициент трения снижается на 20–30%, а ресурс деталей увеличивается в 1,5 – 2 раза. При этом улучшенные антифрикционные свойства сохраняются даже при высоких нагрузках и температурах эксплуатации [9].

Дополнительным преимуществом данной технологии является сохранение механической прочности материала, поскольку модифицируется только поверхностный слой без существенного изменения геометрии детали.

Технологический процесс не требует применения химических реагентов и дополнительных материалов, что делает его экологически безопасным и экономически выгодным. При этом точность позиционирования лазерного луча позволяет работать с деталями сложной конфигурации, не нарушая их геометрических параметров.

Поэтому внедрение микроструктурирования путем лазерной маркировки поверхностей можно рассматривать как один из перспективных методов повышения эксплуатационной надежности агрегатов и узлов тепловозов. Данный метод позволяет существенно продлить срок службы критически важных компонентов локомотива, таких как коленчатые валы, цилиндрические блоки, поршни и элементы трансмиссий.

Особенно важно отметить, что лазерная маркировка не только улучшает характеристики отдельных деталей, но и способствует повышению эффективности работы тепловоза в целом. Это достигается за счет:

- снижения затрат на техническое обслуживание и ремонт;
- уменьшения вероятности аварийных отказов;
- повышения стабильности работы узлов в различных эксплуатационных условиях;
- возможности проведения модернизации существующего парка машин без существенного изменения конструкции.

Применение технологии лазерной маркировки в других отраслях машиностроения показывает, что после обработки ответственных узлов трения вероятность внеплановых ремонтов снижается на 40%, а межремонтный интервал увеличивается на 25–30%. При этом технология совместима с существующей системой планово-предупредительных ремонтов и может быть легко интегрирована в производственный процесс.

В перспективе метод лазерной маркировки может стать стандартным технологическим решением при ремонте и модернизации тепловозного парка, что позволит существенно повысить надежность железнодорожного подвижного состава и снизить эксплуатационные расходы.

Библиографический список

1. Технология механической обработки деталей: учеб. пособие / А.Д. Комаров, Желтов И.Н., Моисеев В.К., Шалавин В.В., Шаров А.А. – Самара : Издательство СГАУ, 2003 . – 60 с.
2. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки // Г.Л. Амитан, И.А. Байсупов, Ю.М. Барон и др.; Под общ. ред. В.А. Волосатова. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. – 719 с.: ил.
3. Шнейдер Ю.Г. Технология финишной обработки давлением. – СПб.: Политехника, 1998. – 414 с.
4. Вейко Вадим Павлович, Дышловенко Светлана Сергеевна Лазерное микроструктурирование поверхностей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2001. №4.
5. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
6. Лазерная техника и технология. Методы поверхностной лазерной обработки. А.Г. Григорьянц, А.Н. Сафонов – М. Машиностроение. 1985. – 191 с.
7. Коваленко В.С., Головко Л.Ф., Черненко В.С. Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера. — К.: Техника, 1990. — 192 с.
8. Мухаммадазим Акбаралиевич Рустамов Методы термической обработки для повышения прочности зубчатых колес // Scientific progress. 2021.
9. Гнеденков С. В., Синебрюхов С. Л., Хрисанфова О. А., Гордиенко П. С., Вовна В. И., Чередниченко А. И. Антифрикционные свойства покрытий, полученных методом микродугового оксидирования на титане // Исследовано в России. 2002.

Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I (ФГБОУ ВО ПГУПС)

Кафедра «Локомотивы и локомотивное хозяйство»

Бирюкова Д. А.: ассистент.

УДК 629.423.32 ГРНТИ 55.41.29

А. Ф. Боок, А. А. Курганов, Т. М. Сергунина, А. А. Хапугин, Д. Ю. Немаев, Р. Ш. Биктиев, А. В. Гришанин

ВЫПРЯМИТЕЛЬНО-ИНВЕРТОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЭЛЕКТРОВОЗОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА НОВОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЕ

Аннотация: *Представлен анализ путей повышения надёжности выпрямительно-инверторных преобразователей электровозов. Представлен новый тиристорный преобразователь М-ОПП-950-1,1к-(1-)У2 для поосного регулируемого тягового электропривода магистральных электровозов.*

Ключевые слова: *Тиристор, охладитель, тяговый преобразователь, интенсивность отказов.*

Техническое состояние преобразовательной техники электропривода определяется параметрами ее компонентной базы, в первую очередь – силовыми полупроводниковыми приборами (СПП). Тяговый электропривод на базе коллекторных двигателей постоянного тока в нашей стране по-прежнему играет значимую роль в организации грузовых и пассажирских перевозок. Данные преобразователи комплектуются тиристорами и диодами отечественного производства [1]. Исторически специализируясь в области производства силового полупроводникового приборостроения, ПАО «Электровыпрямитель» обладает полностью законченным технологическим циклом изготовления диодов и тиристоров на основе монокристаллического кремния. В настоящее время сохраняется возможность серийного выпуска тиристоров и диодов, надежно зарекомендовавших себя в электроподвижном составе ОАО «РЖД».

Надежность узлов электровозов при вождении поездов повышенной массы, на сложных профилях пути во многом зависит от соблюдения установленных режимов эксплуатации и технического обслуживания локомотивов. По состоянию на 01.01.2025 г. количество эксплуатируемых преобразователей ВИП-4000-2М разработки и производства ПАО «Электровыпрямитель» в составе электровозов серии 2(3)ЭС5К, выпускаемых ООО «ПК «НЭВЗ», составляет 4374 единиц, из них 2092 единицы – в гарантийном парке. В 2024 г. статистика отказов преобразователей составила 0,144 случаев на 1 млн. км пробега, что на 44,19% меньше, чем в 2023 г. Значительный вклад в поддержание нормального технического состояния преобразователей и локомотивов, эксплуатируемых на Восточном полигоне вносит АО «ДЦВ Красноярской железной дороги», коллектив которого осуществляет свою многолетнюю и успешную работу [2]. Напомним, что, согласно техническим условиям, данный параметр установлен на уровне 0,303 случаев на 1 млн. км. Каждый преобразователь ВИП-4000-2М комплектуется тиристорами Т853-800 в количестве 64 шт. Таким образом, на текущий момент в подконтрольной эксплуатации в составе электровозов серии 2(3)ЭС5К находятся порядка 280 000 шт. тиристоров.

Из 34 случаев неисправностей, отнесенных за преобразователем ВИП-4000-2М, 16 случаев связаны с отказом тиристоров Т853-800. Вероятные причины их отказов

определялись исходя из анализа характера повреждений полупроводниковых элементов тиристоров на основании результатов первичного расследования, с учетом расшифровки файлов микропроцессорной системы управления и диагностики (МСУД). Анализ записей файлов регистратора МСУД не может дать полную картину причин возникновения неисправности преобразователя ВИП-4000-2М, так как дискретность записи данных в регистраторе МСУД составляет 100 мс, при срабатывании защит – 10 мс. Переходные процессы при работе тиристоров протекают с временами, находящимися в субмиллисекундной длительности импульсов напряжения и токов.

Аварийный характер выхода из строя тиристоров ВИП-4000-2М по причине внешних факторов также описан в ряде работ [3, 4]. Основная часть повреждений и сбоев работы силовой части электровозов происходят из-за отказа электронных элементов и сбоев в работе цепей системы управления. Половина таких отказов приходится на пропуск импульсов управления на управляющие электроды тиристоров плеч преобразователя. В случае отказа любого выходного канала аппаратуры формирования импульсов управления, «ложного» включения возникает отказ отдельных выходных каскадов на всех преобразователях электровоза.

Задача повышения надежности преобразователей электроэнергии связана, в том числе, с сокращением количества применяемых СПП. Иными словами, чем меньше номенклатура и меньшее количество элементов насчитывается в составе электронного устройства, тем надежнее его работа. В процессе эволюции СПП происходит непрерывное увеличение допустимой плотности тока, сопровождающееся снижением уровня статических и динамических потерь. Опираясь на результаты анализа эксплуатации тиристоров Т853-800 и ВИП-4000-2М, новые требования и решения по повышению энергоэффективности преобразователей [5], был разработан новый преобразователь М-ОПП-950-1,1к-(1-)У2. Преобразователь М-ОПП-950-1,1к-(1-)У2 относится к новому поколению тягового преобразователя для электровозов переменного тока серии 2(3,4)ЭС5К с поосным регулированием силы тяги, который может заменить серийно выпускаемый преобразователь ВИП-4000-2М-УХЛ2. Преобразователь имеет два исполнения: М-ОПП-950-1,1к-У2 укомплектован блоком реактивных токов (БРТ) и М-ОПП-950-1,1к-1-У2 – без блока БРТ. Применение плеча БРТ, основу которого составляет схемное решение по управлению реактивной энергией, позволяет повысить коэффициент мощности электровоза на 4% до величины 0,88. Повышение коэффициента мощности на 4 % дает снижение удельного расхода электроэнергии электровоза в режиме тяги поездов примерно на 4-5 % по сравнению с существующими электровозами серии «Ермак».

Преобразователь по габаритным, установочным и присоединительным размерам, а также по схемам подключения взаимозаменяем с ВИП-4000-2М-УХЛ2 и ВИУ-4000-2М-УХЛ2.

В основу преобразователя заложен производимый ПАО «Электровыпрямитель» тиристор Т373-1600 собственной разработки. Его основные параметры приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные параметры тиристора Т373-1600

Наименование параметра	**Значение**
Повторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии / повторяющееся импульсное обратное напряжение, В	4000
Максимально допустимый средний ток в открытом состоянии, А, f = 50 Гц, T_C = 70°С	1915 (85°С) 2348 (70°С)
Ударный ток в открытом состоянии, кА, t_p = 10 мс, T_j = 125°С	34
Импульсное напряжение в открытом состоянии, В (I_T = 5030 А, T_j = 25°С)	2,10
Пороговое напряжение, В	1,10
Динамическое сопротивление, мОм	0,27
Время выключения, мкс d_{iT}/dt = -10 А/мкс, d_{vD}/dt = 50 В/ мкс	400
Ток обратного восстановления, А	100
Тепловое сопротивление переход – корпус, °С/Вт	0,0079
Усилие сжатия, кН	40 – 70
Габаритно-присоединительные размеры, диаметр ×диаметр контакта × высота, мм	112 ×75 × 26,8
Масса, кг	1,20

Количество тиристоров для комплектации одного преобразователя М-ОПП-950-1,1к-(1-)У2 составляет 32 шт.

Основное влияние на ресурс преобразовательных устройств оказывают тепловые характеристики. В преобразователе применены новые воздушные охладители О573 (рисунок 1) собственной разработки [6] с высокой удельной теплопроводностью, которые имеют более развитую теплоотдающую поверхность. Вместе с выбором нового СПП с помощью специализированного программного обеспечения произведен тепловой расчет системы охлаждения М-ОПП-950-1,1к-(1-)У2, в результате чего получены данные по температуре и скорости воздуха в межрёберном пространстве (рисунок 2).

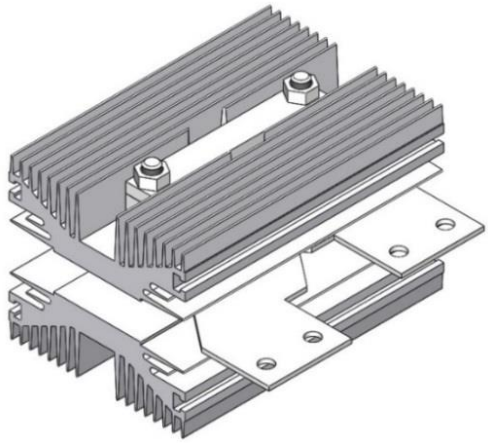


Рисунок 1 – Охладитель О573

Проведены испытания (моделирование) при естественном и принудительном охлаждении для определения переходного теплового импеданса (состояния) данного охладителя (рисунок 3).

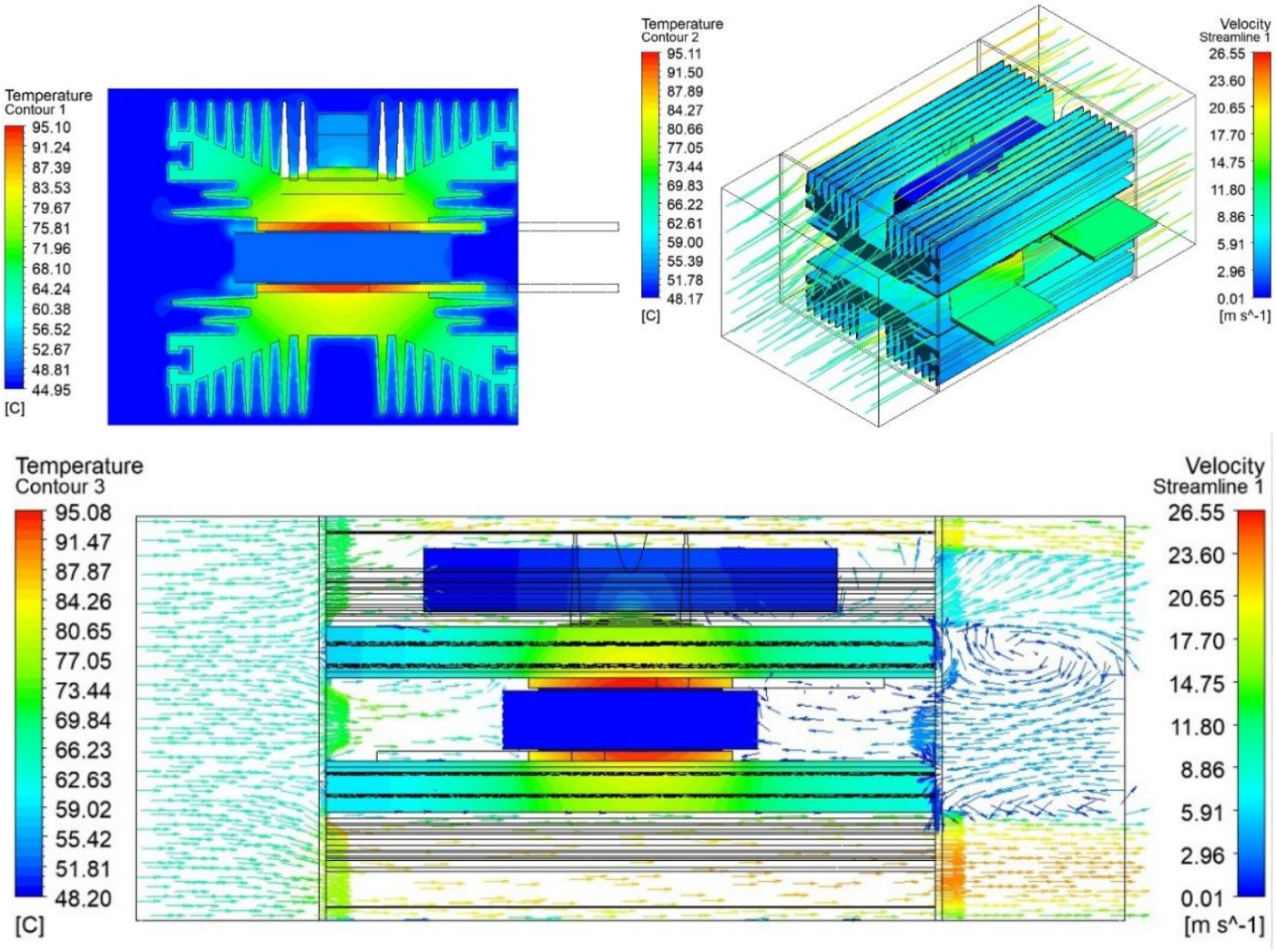


Рисунок 2 – Распределение температуры и скорости воздуха в охладителе O573

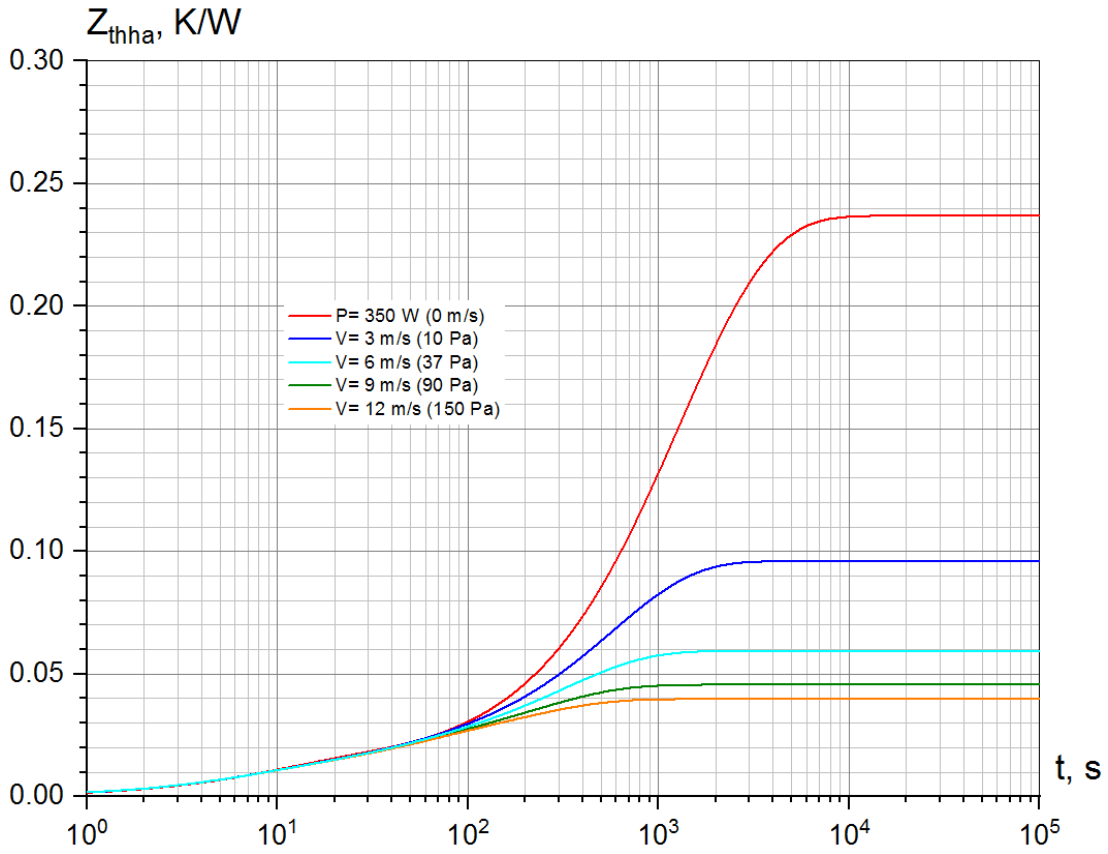


Рисунок 3 – Тепловой импеданс охладителя O573 с тиристором T373-1600

Преобразователь М-ОПП-950-1,1к-(1-) У2 состоит из 32-х тиристоров в сборе с охладителем О573, находящихся в 16-ти секциях, изолированных друг от друга. Каждая секция выполнена из 2-х последовательно установленных тиристорных блоков тиристора. Для объективного определения тепловой картины проведено моделирование одной секции (рисунок 4).

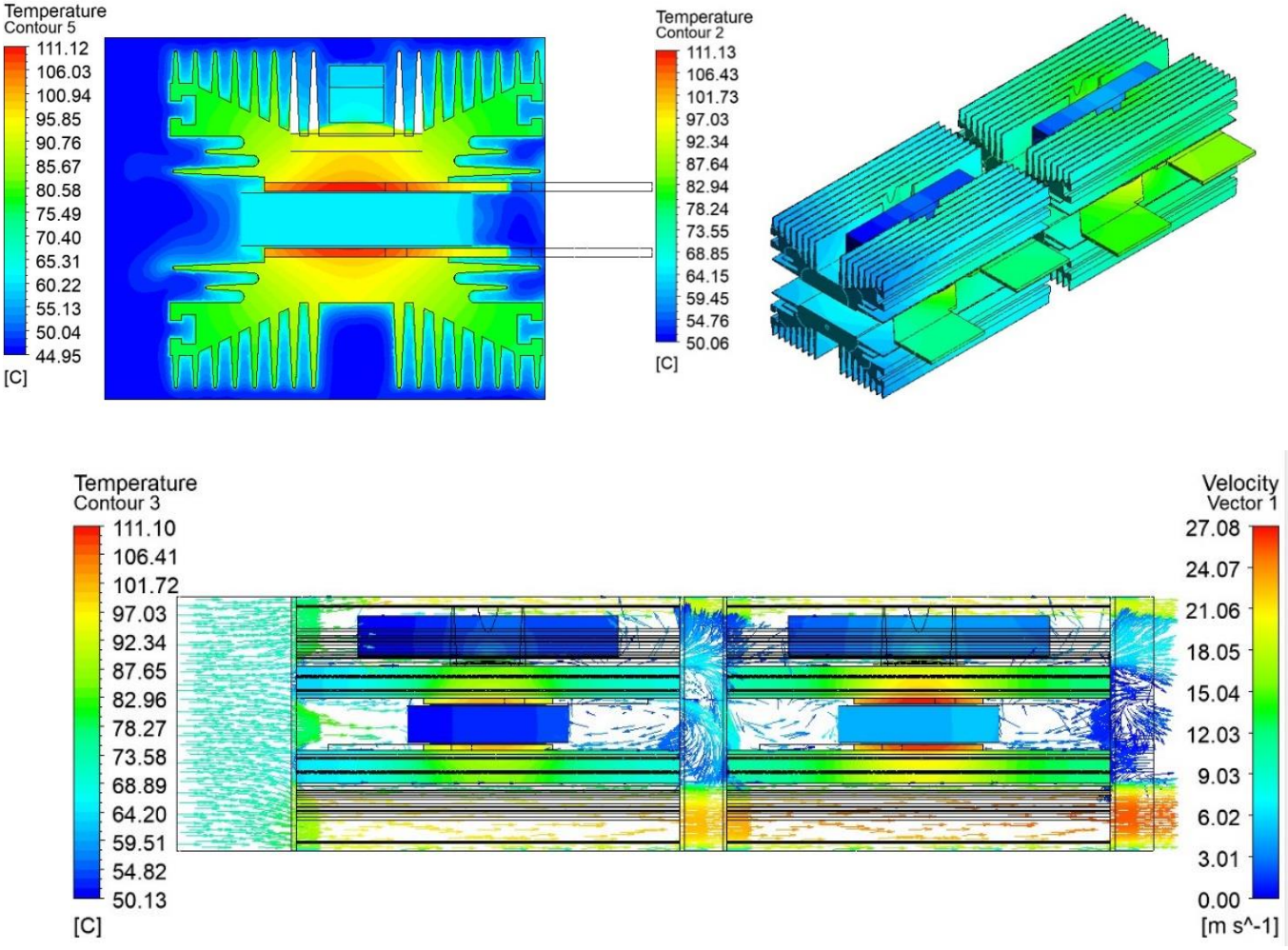


Рисунок 4 – Распределение температуры и скорости воздуха в охладителе О573 для секции блока тиристора

В отличие от диагностики исправности тиристоров плеча в преобразователе ВИП-4000-2М-УХЛ2 в преобразователе М-ОПП-950-1,1к-У2 применена цифровая диагностика исправности каждого тиристора и системы формирования импульсов, позволяющая своевременно диагностировать техническое состояние преобразователя.

Преобразователь М-ОПП-950-1,1к-У2 обладает лучшим показателем надежности, расчетное значение параметра интенсивности отказов преобразователя не более 0,115 случая на 1 млн. км пробега.

Повышенная надежность преобразователя ведет к снижению затрат на приобретение комплектующих изделий сервисными локомотивными депо при ремонтно-восстановительных работах преобразователя, экономии затрат по контракту жизненного цикла локомотива, а также снижению трудоемкости при обслуживании преобразователя.

В преобразователе М-ОПП-950-1,1к-У2 имеется возможность размещения дополнительного оборудования, например – размещение выпрямительной установки возбуждения (ВУВ).

Применение выпрямительно-инверторного преобразователя в новом исполнении вместе с усовершенствованным алгоритмом управления [7], позволят повысить работоспособность электровоза в режиме рекуперативного торможения, что в значительно степени повышает безопасность движения поездов, сохраняет энергоэффективность электровозов переменного тока, повышает пропускную способность тяговых плеч при эксплуатации тягового электроподвижного состава.

Список использованных источников:

1 Локомотивам – современные полупроводниковые приборы / Г.Ю. Каменцев // Локомотив. 2012. №7. С. 6-8.

2 Семченко В.В., Лакин И.К. Особенности управления надёжностью оборудования локомотивов на примере выпрямительно-инверторных преобразователей // Материалы научно-практической конференции «Современное состояние и перспективы развития силовой электроники и преобразовательной техники на ее основе», г. Саранск – 2021 г., с. 65-68.

3 Устинов Р.И. Повышение работоспособности выпрямительно-инверторных преобразователей электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения // Диссертация на соискание учёной степени к.т.н., Хабаровск – 2020 г. 180 с.

4 Власьевский С.В., Скорик В.Г., Супрун Д.А. Математическая модуль для исследования электромагнитных процессов при аварийных режимах силового преобразователя электровоза переменного тока // Материалы научно-практической конференции «Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования ТПС», г. Красноярск – 2021 г. с. 184-189.

5 Устройство для повышения коэффициента мощности выпрямительно-инверторного преобразователя однофазного переменного тока. Патент на полезную модель RU 192 613 U1.

6 Охладитель для силовых полупроводниковых приборов. Патент на промышленный образец № 139475.

7 Способ управления многозонным выпрямительно-инверторным преобразователем однофазного переменного тока. Патент на изобретение RU 2 716 493 C1.

ПАО «Электровыпрямитель», г. Саранск

Боок Александр Фридрихович: заместитель генерального директора по техническому развитию

Курганов А. А.
Сергунина Т. М.
Хапугин А. А.
Немаев Д. Ю.
Биктиев Р. Ш.
Гришанин А. В.

УДК 621.382 ГРНТИ 47.33.29

А. Т. Бормотов, М. А. Тогаев, Д. В. Пышков, В. Г. Мускатиньев, А. В. Гришанин

IGBT МОДУЛИ ДЛЯ КОМПЛЕКТАЦИИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА С АСИНХРОННЫМИ ТЯГОВЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Аннотация: *Описаны особенности конструкции IGBT модулей для применения в тяговом электроприводе железнодорожного транспорта. Представлен ряд IGBT и FRD модулей, разработанных специалистами российского предприятия в условиях санкционных ограничений для перспективного подвижного состава.*

Ключевые слова: *IGBT модуль, асинхронный электропривод, энерготермоциклы, прочность изоляции.*

Дальнейшее улучшение тяговых свойств электроподвижного состава будет производиться по пути повышения тягово-энергетических показателей тягового электропривода, с одной стороны, и эффективности использования сцепного веса локомотива, с другой. В настоящее время приоритетным является применение асинхронного тягового привода в электроподвижном составе железных дорог. В его состав входят собственно асинхронный тяговый двигатель и система преобразования электроэнергии. Использование асинхронного тягового двигателя усложняет систему преобразования электроэнергии электровоза и характеризуется высокой степенью взаимосвязи и взаимного влияния процессов между отдельными элементами тягового привода. Это требует использования новых подходов к проектированию.

Сравнительный анализ [1] показывает, что коэффициент мощности асинхронного привода составляет 0,99, что значительно выше по сравнению с 0,65 у коллекторного привода. Коэффициент нелинейных искажений тока асинхронного привода равен 0,15 в сравнении с 0,53 у коллекторного. Коэффициент мощности является важнейшей энергетической характеристикой электровоза и характеризует нагрузку на контактную сеть и устройства энергоснабжения, поэтому эффективность преобразования электрической энергии в асинхронном тяговом приводе электровозов в режиме тяги ощутимо выше. Аналогичное заключение возникает и по коэффициенту нелинейных искажений тока, который является количественной мерой искажений тока, вызванных работой тягового преобразователя.

Создание электроподвижного состава нового поколения тесно связано с развитием преобразовательной техники и, в первую очередь, с разработками и внедрением преобразователей частоты с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Для опережающего развития средств тяги параллельно с развитием электровозов переменного тока с применением коллекторного привода постоянного тока в настоящее

время происходит разработка новых серий электровозов и электропоездов с применением асинхронных двигателей переменного тока.

Появление и постоянное совершенствование силовых полупроводниковых приборов (СПП) с МОП-управлением помогло силовой электронике сделать прорыв в направлении повышения плотности мощности и повышения КПД преобразовательных устройств. Ключевой технологией, обеспечивающей широкий диапазон от нескольких десятков ватт до нескольких мегаватт, стала технология биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT-технология). От начала производства в 1980-х годах первых серийных IGBT они прошли большой путь развития и стали стандартными силовыми ключами во многих областях силовой электроники.

Многокристальные модули на основе чипов биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT) и быстровосстанавливающихся диодов (FRD) – одна из самых востребованных групп среди ключевых элементов силовой электроники с высоким уровнем функциональной интеграции. Конструктивно применение беспотенциальных модулей имеет ряд преимуществ: изолированное основание модулей от потенциальных контактов, упрощенный монтаж и ошиновка силовых схем, уменьшенные массогабаритные показатели, меньшая стоимость эксплуатации по сравнению с комплектами приборов таблеточного исполнения. Развитие модульной конструкции приборов силовой электроники определено постоянно возрастающими параметрами преобразовательного оборудования, их мощностью и степенью интеграции. ПАО «Электровыпрямитель» по направлению мощных транзисторных IGBT и диодных FRD модулей ведет работы более 25 лет. За этот период накоплен значительный опыт и компетенции в области разработки, производства и эксплуатации модулей [2-6]. В линейке разработанной продукции порядка 350 наименований IGBT, FRD модулей в 14 унифицированных конструктивных исполнениях на токи до 4800 А и напряжение до 6500 В, включая гибридные IGBT модули с SiC диодами Шоттки. Габаритно-присоединительные размеры большинства модулей, серийно освоенных в производстве, совместимы с общепринятыми размерами модулей зарубежных аналогов. Возможны следующие варианты схемных исполнений IGBT модулей: одиночный ключ, полумост, чоппер: верхний (с диодом со стороны коллектора) или нижний (с диодом со стороны эмиттера), двунаправленный ключ (с общим эмиттером), два ключа, одиночный ключ без диода обратного тока, чоппер с диодом инверсной полярности.

Особенности конструкции и технологии изготовления модулей для транспорта

При сборке многокристальных модулей применяется внутреннее параллельное соединение чипов, изготовленных по различным технологическим процессам. В первую очередь именно характеристики применяемых чипов определяют систему выходных статических и динамических параметров модулей.

Тяговые преобразователи эксплуатируются в значительно тяжёлых режимах, связанных с многочисленными циклами «разгон – выбег – торможение». Для этих целей разработана линейка специализированных IGBT модулей серии «Т» для тягового электропривода железнодорожного транспорта. IGBT модули в процессе эксплуатации подвергаются большому количеству энерготермоциклов, которые постепенно разрушают их конструкцию из-за различия коэффициентов термического расширения компонентов силовых модулей. В IGBT модулях транспортного исполнения для повышения их энерготермоциклостойкости используются более сложные, в сравнении с модулями для общепромышленного применения, технологические и конструкционные решения. Особенностями модулей серии «Т» являются применение металломатричных композиционных материалов AlSiC, металлокерамических плат с высокой теплопроводностью на основе керамики из нитрида алюминия, бесфлюсовой пайки высокотемпературными припоями, новых конструкторско-технологических решений для повышения надёжности соединений, полученных методом ультразвуковой сварки и др.

Обеспечение необходимой электрической прочности изоляции между основанием и потенциальными токовыводами модуля – необходимое условие их безотказной работы. Электрическая прочность изоляции Visol большинства модулей находится в пределах 2500 – 6000 В RMS (для общепромышленного исполнения) и 4000 – 10200 В RMS (для модулей транспортного исполнения). Для отдельных типов модулей разработаны конструктивы с повышенным значением Visol (13000 В RMS), которое обеспечивается конструктивно-технологическими особенностями модулей. В качестве изоляторов для модулей транспортного исполнения применяются металлокерамическими платами на основе нитрида алюминия. Внутренний объем модуля заполняется компаундами с высокими диэлектрическими свойствами, который обеспечивает изоляцию внутри модуля и защиту чипов IGBT и FRD от воздействия внешней среды и прямого попадания влаги. Дополнительными способами снижения напряженности электрических полей внутри корпуса является оптимальная конструкция деталей, определяемая для каждого типоразмера. При производстве модулей используются конструкционные пластмассы, допускающие эксплуатацию в широком диапазоне температур, от минус 80 до плюс 150 °С. Большинство конструкционных деталей модулей изготавливается из отечественных материалов на собственных производственных мощностях: для изготовления металлических деталей применяются автоматизированные механообрабатывающие станки и универсальные фрезерные центры, корпусные детали из пластмасс производятся посредством литья на термопластавтоматах. Все применяемые материалы пожаробезопасны и относятся к классу самозатухающих и не поддерживающих горение.

Модули для тягового электропривода изготавливаются с использованием конструкционных материалов с минимальным разбросом коэффициентов термического

расширения, поэтому цена этих изделий является более высокой по сравнению с модулями общепромышленного применения.

Из-за введения санкционных ограничений доступ к ряду ранее применявшихся компонентов был приостановлен, в связи с чем в ранее освоенные изделия потребовалось внести изменения. В период 2022-2024 гг. произведена доработка и освоено производство ряда мощных модулей 12, 17 и 33 класса.

В периметре группы ТМХ ведутся проекты по разработке перспективного подвижного состава на базе тягового привода с асинхронными электродвигателями. Специалистами ООО «ТМХ-Инжиниринг» разработана линейка преобразователей для подвижного состава электровозов, тепловозов (магистральных и маневровых), унифицированной платформы моторвагонного подвижного состава, включая водородный поезд. В условиях санкционных ограничений и дефицита доступа к ряду высокотехнологичных электронных компонентов, в ТМХ принята стратегия по унификации на уровне компонентов, в том числе IGBT модулей. Преобразователи для тягового привода подвижного состава современных электровозов 2ЭС9, ЭП21(22), 2ЭС5С, водородного поезда В-Пегас, силового электрооборудования тепловоза 3ТЭ30Г реализованы по схемам многоуровневых инверторов напряжения на базе IGBT модулей с блокирующим напряжением 3300 В.

Для удовлетворения потребностей комплектации серии преобразователей и электрооборудования подвижного состава разработана новая серия модулей МТКИ-1500-33Т, М2ДЧ-1200-33Т, МДЧ-800-33Т, МТКИ-1500-33ТВ, М2ДЧ-1200-33ТВ на напряжение 3300 В. Модули серии «Т» выполнены в корпусах с электрической прочностью изоляции 6,0 кВ (рисунок 1), серии «ТВ» – 10,2 кВ (рисунок 2). На текущий момент изготовлены и испытаны опытные партии модулей, в том числе на устойчивость к перегрузкам и воздействию токов короткого замыкания, и реализуются мероприятия по подготовке производства к их серийному выпуску.

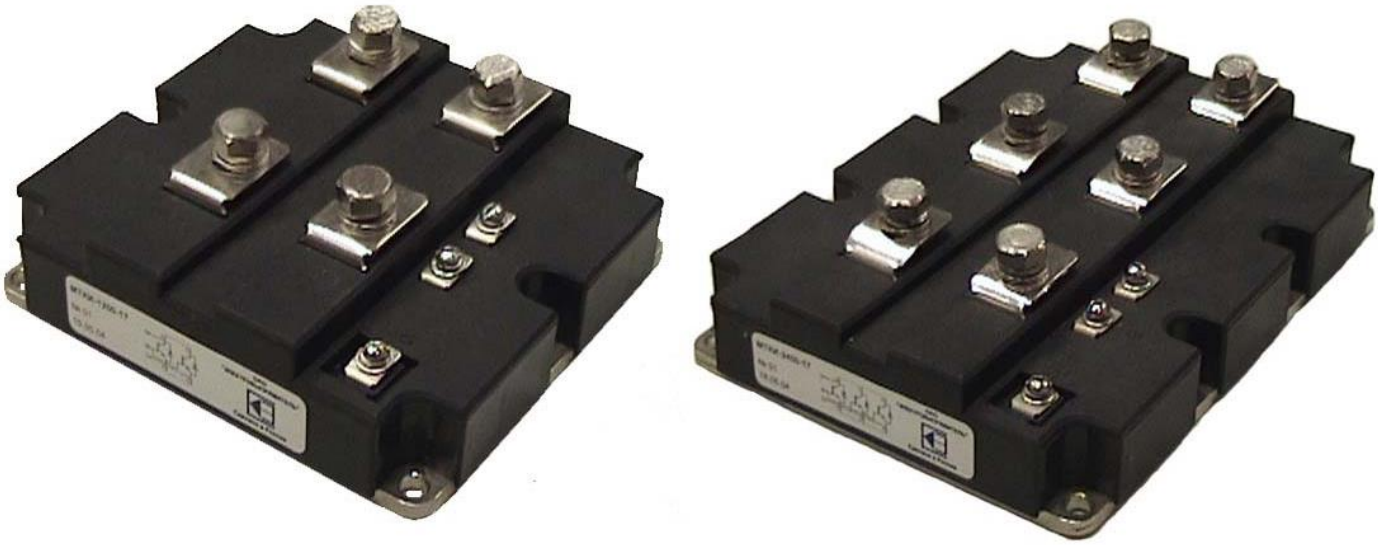


Рисунок 1 – Конструктивы модулей серии «Т»

Рисунок 2 – Конструктивы модулей серии «ТВ»

Список использованных источников:

1. А. А. Зарифьян, А. М. Евстафьев. Показатели качества потребления энергии в коллекторном и асинхронном тяговых приводах электровозов переменного тока // Известия ПГУПС, Санкт-Петербург - 2023. с. 987-998.
2. Некоторые вопросы эксплуатации IGBT-модулей. Часть 3. Влияние параметров цепи управления на коммутационные характеристики / В. Мускатиньев, А. Бормотов, А. Гришанин, М. Тогаев, Д. Пышков, И. Федяев // Силовая электроника. 2020. № 6. С. 22-25.
3. Некоторые вопросы эксплуатации IGBT-модулей. Часть 2. Еще раз о высокой частоте и малых токах / В. Мускатиньев, М. Тогаев, Д. Немаев, А. Бормотов, Д. Пышков, И. Федяев // Силовая электроника. 2020. № 3. С. 24-27.
4. Влияние параметров цепи управления на коммутационные характеристики высоковольтных IGBT модулей / В. Мускатиньев, М. Тогаев, А. Бормотов, И. Федяев, Д. Пышков // Международная конференция по автоматизированному электроприводу (АЭП-2020). Россия, Санкт-Петербург, 4–7 октября 2020.
5. Параметры и характеристики IGBT-модулей на напряжение 1200 В при низких температурах / В. Мускатиньев, М. Тогаев, В. Мартыненко, А. Бормотов // Силовая электроника. 2018. № 5. С. 98-100.
6. А.Т. Бормотов, В.Г. Мускатиньев, А.В. Гришанин. IGBT модули для тягового электропривода рельсового подвижного состава // Техника железных дорог. № 1. 2025 г.

ПАО «Электровыпрямитель», г. Саранск

Бормотов А. Т.,

Тогаев М. А.,

Пышков Д. В.,

Мускатиньев В. Г.,

Гришанин А. В.

ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
ЭЛЕКТРОВЫПРЯМИТЕЛЬ

УДК:621.317.33 ГРНТИ 73.29.17

А. В. Бородкин

АКТУАЛЬНОСТЬ РАЗРАБОТКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО И ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ЛОКОМОТИВНЫХ ПРИЕМНЫХ КАТУШЕК АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛОКОМОТИВНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ

Аннотация. *Техническое диагностирование является неотъемлемой частью системы обслуживания и ремонта железнодорожного подвижного состава, обеспечивающей комплексный контроль наиболее ответственных узлов и агрегатов. Несмотря на постоянное совершенствование системы технического обслуживания и ремонта, ее эффективность напрямую зависит от рисков, создаваемых «человеческим фактором», во многом влияющих на точность и достоверность результатов технической диагностики. Для обеспечения высокой контролепригодности конкретного изделия необходима разработка и внедрение многоканальных информационно-измерительных систем с элементами предиктивной аналитики, позволяющей достоверно определить латентные (скрытые) и детерминирующие (предопределяющие) тенденции и прогнозное состояние контролируемого изделия и функционирующие в составе автоматизированных систем управления (АСУ). В данной статье рассматриваются актуальность и основополагающие принципы разработки многоканальных измерительных комплексов и формализация базовых требований к многофункциональным системам контроля локомотивных приемных катушек, являющихся первичным звеном рельсоиндуктивной связи автоматической локомотивной сигнализации.*

Ключевые слова: *локомотивные приемные катушки, контропригодность, измерительный комплекс, безопасность движения поездов, автоматическая локомотивная сигнализация.*

Основой транспортной системы Российской Федерации является железнодорожный транспорт, обладающий огромным перевозочным потенциалом. При этом безусловное обеспечение безопасности движения – незыблемый приоритет Российских железных дорог, который определен Стратегией развития железнодорожного транспорта до 2030 года. [1] Безопасность железнодорожных перевозок обеспечивается в том числе системами интервального регулирования движения поездов, которые на современном этапе цифровой трансформации железнодорожного транспорта представляют собой системы бессветофорной сигнализации, построенные на принципах комплексирования глобального и локального позиционирования, автоматического управления рельсовым транспортом с применением радиоканалов и технологий машинного зрения. Однако по сей день из 85,6 тыс. км эксплуатационной длины магистральных железных дорог России около 63 тыс. км оборудовано автоблокировкой и системой автоматической локомотивной сигнализации (АЛС) [2; 3], технологические

принципы которой были внедрены в середине 50-х годов прошлого столетия. Поэтому на время совершенствования и необходимого перевооружения инфраструктуры отечественных железных дорог на технологически суверенные цифровые технологии классическая парадигма АЛС остается важным элементом обеспечения безопасности движения. Данное обстоятельство не только не обесценивает, но и подчеркивает значимость работ, проводимых в области фундаментальных принципов передачи сигналов с пути на локомотив с использованием рельсовых цепей и направленных на снижение эксплуатационных и ремонтных издержек, свойственных устройствам предыдущих поколений.

Ключевым компонентом системы АЛС, обеспечивающим связь между передающими (путевыми) и приемными (бортовыми) устройствами, выступают локомотивные приемные катушки, содержание которых в технически исправном состоянии является критичным фактором обеспечения безопасности движения.

Существующая система планово-предупредительного ремонта железнодорожного подвижного состава и его составных частей, целью которой является комплекс организационных и технических мероприятий, направленных на предупреждение прогрессивно нарастающего износа и поддержание оборудования в постоянной готовности к работе, включает в себя, в том числе, регламентированные операции по периодическому контролю измеряемых параметров локомотивных приемных катушек. Традиционный подход к определению технического состояния приемных катушек сводится к экспертной оценке значимости контролируемых опорных характеристик в определенный момент времени. Измеренные величины сравниваются с установленными в конструкторской документации нормативными значениями показателей контролепригодности, в соответствии с которыми принимается суждение о пригодности объекта к эксплуатации. [4] То есть параметрический контроль (проверка соответствия параметров установленным нормам) основан на измерении ряда базовых параметров, которые определяют работоспособность катушки в целом и считаются определяющими. Параметрами, характеризующими состояние приемной катушку, являются ее индуктивность (L), добротность (Q), активное сопротивление (R), сопротивление изоляции (Rиз) и наведенная ЭДС. Проверка данных характеристик проводится измерительным методом, т.е. при помощи непосредственных измерений соответствующими техническими средствами.

Конструкторской документацией производителей приемных катушек рекомендовано применение следующих измерительных устройств:

– для измерения сопротивления изоляции – мегаомметр с номинальным выходным напряжением 500 В;

– для измерения активного сопротивления и ЭДС вольтметр универсальный, цифровой типа В7-38;

– измеритель иммитанса Е7-15 или Е7-14 - для измерения индуктивности и добротности.

Как видно номенклатура измерительных устройств не лишена недостатков, заключающихся в избыточной функциональности отдельных приборов и как следствие увеличении их габаритов и сложности управления, а также необходимости применения различных измерительных кабелей при смене измеряемого параметра. В соответствие с чем технологическая продолжительность и трудоемкость работ, затраченных на вспомогательные операции, составляет не менее 60-80% от общего времени диагностирования катушек. Для сокращения времени на проведение измерительных операций необходимо параллельное проведение измерений нескольких характеристик. Наиболее распространенным комплексным средством измерения, позволяющим провести последовательное диагностирование практически по всем необходимым параметрам, является допустимый к применению руководством по эксплуатации локомотивных приемных катушек [5] измеритель параметров ИП-ЛК. [6]

Данный прибор позволяет, в том числе, производить измерение сопротивление изоляции. Эксплуатация приемных катушек под влиянием значительных механических нагрузок может привести к механическим напряжениям в конструктиве катушки и последующему разрушению изоляции с уменьшением ее сопротивления (Rиз). Температурное расширение проводов из-за климатического непостоянства также может привести к ускорению процессов старения и разрушения изоляции катушки. Возможное проникновение в катушку влаги, в свою очередь также способствует уменьшению сопротивления изоляции и может вызвать замыкание между витками в слое, а ее замерзание способствует замыканию проводов, их обрыву или шунтированию части витков. Для выяснения степени повреждения и допустимости дальнейшей эксплуатации катушки проводится измерение ее сопротивления изоляции. При проведении данной измерительной операции, в соответствии с требованиями [7] необходимо подать постоянное напряжение на голую жилу вывода катушки, чем определяется отношение поданного напряжения к величине тока утечки. Чем хуже изоляция, тем значение Rиз ближе к нулю и тем больший ток утечки. Поэтому при вращении рукоятки динамо-машины механического аналогового мегаомметра вырабатывается высокое напряжение, с помощью которого и измеряется сопротивление изоляции на измеряемом участке. При пользовании ИП-ЛК величина подаваемого в измеряемую цепь напряжения составляет всего 5 В, что явно недостаточно и не позволяет определить степень изношенности изоляции и соответственно предупредить неожиданные и нежелательные случаи короткого замыкания обмотки катушки.

Особенностью приемной катушки является значительная величина индуктивности, которая определяет величину наведенной ЭДС, характеризующей уровень принятого сигнала. Согласно своей документации, прибор ИП-ЛК обеспечивает измерение индуктивности и добротности на тестовой частоте 75 Гц при напряжении 1 В. Разработчик приемных катушек при этом регламентирует производить измерение данных параметров на частоте 100±1 Гц. Выбор данного значения объясняется тем, что основой многих цифровых приборов прошлого поколения, предназначенных для измерения параметров электрических цепей, является использование мостовых методов, что сопровождается заметным усложнением их схемотехники и автоматизации процессов

уравновешивания. Такие приборы могут работать только на фиксированных частотах, а у большинства рекомендованных измерителей иммитанса наиболее близкой к рабочим частотам автоматической локомотивной сигнализации (25, 50, 75 и 175 Гц, выбираемой в зависимости от вида тяги поездов и рода тягового тока) является частота тестового сигнала 100 Гц. Например:

- Е7-14М имеет программируемый по 8-ми точкам тестовый сигнал в диапазоне частот от 100 Гц до 100 кГц (100 Гц, 120 Гц, 1 кГц,10 кГц, 20 кГц, 30 кГц, 60 кГц, 100 кГц);
- для Е7-14 частота измерения: 100 Гц, 1 и 10 кГц;
- для Е7-15 частота измерения: 100 Гц и 1 кГц;
- для Е7-15М частота измерения:100 Гц, 120 Гц, 1 кГц.

Соответственно применение ИП-ЛК для измерения индуктивности не может гарантировать достоверности значений контролируемых параметров. Экспериментальные измерения индуктивности, проведенные измерителем иммитанса на 100 Гц и ИП-ЛК при 75 Гц, показали, что разница полученных значений из-за отличия тестовой частоты может достигать 1 Гн. Поскольку существует указанная зависимость, то контроль достаточно сложной и характеризуемой множеством факторов непредсказуемого влияния величины индуктивности, целесообразно проводить при частоте колебаний источника питания, соответствующей рабочему режиму АЛС. Справедливости ради необходимо отметить, что выпускаемые еще в СССР приборы Е7-14 и Е7-15 сильно устарели и их выпуск прекращен. В настоящее время возможности и достижения науки, техники и технологий позволяют создавать более совершенные решения, построенные на самой современной аппаратной базе, позволяющей реализовать устройства измерения с динамическим диапазоном рабочей частоты. Например, измеритель иммитанса Е7-20 [4] или созданный на его основе портативный вариант – прибор Е7-25, имеют регулируемый от 25 Гц до 1 МГц диапазон установки тестовой частоты. Однако сравнительная стоимость подобных устройств требует оптимизации применяемых технических средств диагностирования. Исходя из приведенных доводов производитель приемных катушек в своей документации указывает, что при проверке основных электрических параметров (сопротивление, индуктивность, добротность) с использованием ИП-ЛК окончательное решение о пригодности катушки необходимо принимать по результатам последующей перепроверки с использованием более точных приборов.

Таким образом при внешней простоте существующего подхода диагностирования технического состояния локомотивных приемных катушек, его практическая реализация не исключает как условную вероятность ложного отказа (повреждения) – вероятность того, что исправная катушка в результате диагностирования признается как имеющая повреждение или отказ и принимается неисправной, так и вероятность необнаруженного отказа (повреждения), при котором неисправная (неработоспособная) катушка в результате контроля признается исправной или работоспособной. [8] Кроме того, в современной практике анализа сложившийся метод проведения контроля не обеспечивает объективности технического диагностирования катушек как минимум

потому, что при отсутствии базовых библиотек эксплуатационных параметров запись информации и экспертная оценка осуществляются вручную, а основной задачей определения технического состояния катушки является установление значений контролируемых параметров в текущий момент времени, исключая при этом вопросы прогнозирования состояния локомотивных катушек с заданной вероятностью на предстоящий интервал эксплуатации.

В связи с чем, вопрос трансформации бумажной технологии учета технического состояния катушек в перспективную цифровую модель [9] посредством разработки концептуально новых методов, методик, алгоритмов и средств диагностирования, предназначенных для сбора и первичной обработки информации с высоким быстродействием и логической интерпретацией значений контролируемых параметров, особенно важен и должен служить предметом специальных исследований. [10]

Перспективы развития систем диагностирования лежат в области обеспечения многоканальных параллельных измерений. В отличие от традиционного множества приборов для контроля технического состояния локомотивных приемных катушек, предлагаемый к разработке аппаратно-программный комплекс является многофункциональным средством измерений, позволяющим при сравнительно простой аппаратной реализации избавиться от сложных и громоздких коммутирующих устройств и, тем самым, существенно уменьшить габариты устройства. [11] Возможность автоматизации измерений как отдельных этапов контроля качества приемной катушки и цифровая обработка результатов позволят значительно сократить время, необходимое для проведения измерительных операций, а также снять или существенно ослабить ограничения по условиям их проведения и обеспечить необходимую точность. [12]

Принцип функционального разделения измерителя на программную и аппаратную части позволит сделать рациональный выбор и конфигурацию электронно-компонентной базы для решения широкого круга измерительных задач, сохраняя при этом компактность комплекса, а гибкость программного обеспечения определяет его много-функциональность. Оценка прецизионности (свойство, характеризующее отклонения реальных параметров от заявленных) при параметрическом контроле, а также множества факторов, характеризующих условия проведения измерений, может быть получена в результате применения математических и схемотехнических моделей и соответствующих программных инструментов. В соответствие с чем, после определения функциональных и технических требований, предъявляемых к измерительному комплексу, целесообразна разработка его программно-математической модели, позволяющей путем вычислительного эксперимента имитировать параметрический контроль процесса измерений (оценка качества и эффективность технологического процесса на основе измерения определенных параметров), с концептуальной проработкой аппаратной реализации. [13]

Анализ отечественного и зарубежного опыта в области электротехники и разработки аппаратно-программных измерительных устройств позволяет сформулировать основные требования к их построению, которые для обеспечения

новаторских возможностей измерений и гибкости системы должны отвечать приведенным ниже условиям. [14; 15]

– высокая производительность – за счет применения современной архитектуры и последних технологий в области компонентой базы, обеспечивающих широкие возможности параллельного контроля;

– компактность и адаптивность, достигаемая посредством совокупности параллельных программно-аппаратных измерительных каналов, на вход которых через многоразрядный мультиплексор подаются сигналы от различных источников;

– возможность одномоментного измерения нескольких компонент, что позволит получить максимум измерительных возможностей при минимальном времени контроля и затратах на изготовление измерительной оснастки;

– единая линия периферийного интерфейса для проведения инвариантных измерений;

– обеспечение функциональности измерителя только в рамках требуемых измеряемых параметров;

– предельно простое управление и использование в условиях эксплуатации;

– многофункциональность и гибкость, реализуемая программной составляющей, которая не должна иметь ограничений по длительности измерений и объему получаемых данных и обеспечивать возможность модификации сценариев проводимых измерений во время их исполнения;

– простота создания тестовых последовательностей;

– обеспечение дискретизации измеренных величин по времени и преобразование в цифровой код;

– математическая многовариантная обработка и сохранение результатов измерений в специальной базе данных с целью их последующей визуализации как в текстовом, так и в графическом формате (так называемый режим осциллографа);

– построение амплитудных и площадных спектров допустимых значений контролируемых параметров, а также выделение на спектрограмме области измеренных величин;

– обработка измеренных данных в соответствии с формализованными алгоритмами и выявление корневых причины возможных неисправностей приемных катушек, которые не всегда лежат на поверхности, а могут быть скрыты, например, в нарушениях технологии обслуживания, применении несоответствующих материалов и запасных частей, сложной фоноцелевой обстановкой (эксплуатация в достаточно жестких условиях, создаваемых внешней средой);

– получение результатов измерений через удаленный доступ по локальной сети или через интернет.

Предлагаемое решение подразумевает, что конечный пользователь имеет возможность как получить автоматически проанализированный результат измерений технико-эксплуатационных характеристик катушек в конкретный момент времени, так и проанализировать тенденцию их деградационного старения по базе ранее измеренных значений, выстроенных в когнитивно-визуализированную зависимость, отображаемую в

виде числовых значений, изменяющихся точечных данных, графической панели или текста. Это способствует наглядному воспроизведению и достоверному индивидуальному прогнозированию тенденций состояния приемной катушки, и оперативному принятию адекватных решений по допуску ее в эксплуатацию.

В зависимости от требуемых задач, удаленные пользователи посредством сетевого доступа через Ethernet или по каналам GSM, либо Wi-Fi связи, могут подключаться к системе сбора данных, вычислительному кластеру комплекса, а также к рабочим местам внешнего контура системы диагностики. Это позволяет организовывать быстрый доступ к архивам данных, а также, при необходимости, синхронизировать копии архивов для последующей обработки данных на местах. [10] Соответственно в данном решении добавляется возможность «бесшовной» интеграции технической диагностики в автоматизированные информационные системы управления, учета и контроля технических средств железнодорожного подвижного состава. Интеграционные процессы, протекающие относительно информационного взаимодействия отраслевых автоматизированных систем, позволяют вывести техническую диагностику на принципиально новый уровень, предусматривающий решение широкого круга задач по формированию из разрозненных информационных ресурсов единого информационного пространства и цифровую интероперабельную инфраструктуру (классификаторы, нормативно-справочная информация (НСИ), унифицированные формы документов, электронный словарь терминов и т.п.) для деятельности и функционирования всех участников перевозочного процесса. Соответственно потенциал разработки и внедрения комплекса имеет большие перспективы в будущем, в части интегрирования в научно-технические проекты «Цифровое депо», «Умный локомотив» и различные интеллектуальные системы диагностики АЛС, а также позволит создать дополнительный инструмент в теории управления техническим состоянием подвижного состава и организации работы ремонтного персонала.

Список использованных источников

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г., утвержденная распоряжением Правительства РФ от 17.06.2008 № 877-р.
2. [Электронный ресурс] // «Российские железные дороги» : [официальный сайт]. — URL: https://www.rzd.ru (дата обращения 01.10.2024).
3. Юсупов Р.Р. О снижении влияния помех от линий электропередачи на функционирование канала автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа / Р.Р.Юсупов, А.С.Хохрин // Вестник ВНИИЖТ. 2024. Т. 83, №1. С. 70–80.
4. MIL-HDBK-2165. Testability handbook for systems and equipment // Depatment of Defense, Washington, 1995.
5. Катушка приемная КП. Руководство по эксплуатации АГБР.060.00.00РЭ. – 58 л.
6. Измеритель ИП-ЛК. Руководство по эксплуатации. КМСИ.411252.026 РЭ.
7. ГОСТ 3345-76. Кабели, провода и шнуры. Метод определения электрического сопротивления изоляции : Межгосударственный стандарт : утвержден и введен в

действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 23.06.76 г. № 1508 : взамен ГОСТ 3345-67 : дата введения 01.01.78 : издание официальное с изменениями № 1, 2, утвержденными в сентябре 1981 г., июне 1988 г. (ИУС 11-81, 10-88) / -22 с. - Текст : непосредственный.

8. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 26.12.89 № 4143 – Москва : ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2009. -13 с. - Текст : непосредственный.
9. Поморцев В.А. Информатизация локомотивного комплекса в рамках концепции «Цифровая железная дорога» / Поморцев В.А. // Вестник СамГУПС. 2019. №1 (43). – С.118-123.
10. Попов Ю.В. Контролируемость, контролепригодность. / Попов Ю.В. // Тенденции развития науки и образования. 2020. №66-2. С. 35-42.
11. Светлов А.В. Аппаратно-программный комплекс для измерения параметров электрических цепей / Светлов А.В., Ушенина И.В. // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. № 1, 2008. Технические науки. Электроника, измерительная и радиотехника. – С. 81-89.
12. Паршуков М. Ю. Принципы построения аппаратно-программных комплексов для формирования и измерения параметров импульсных сигналов / Паршуков М.Ю, Светлов А.В., Ханин И.В., Мишра П. // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 3 (11). – С. 102–112.
13. Атрохов В.Н. Математическая модель измерительного комплекса для определения внешних параметров вибраторных активных фазированных антенных решеток в ближней зоне / Атрохов В.Н., Литвинов А.В., Мищенко С.Е., Шацкий В.В. // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2021. №4. — URL: https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.4.2 (дата обращения 26.02.2025).
14. Мартяшин А.И. Перспективные направления развития измерителей параметров многоэлементных электрических цепей / Мартяшин А.И., Светлов А.В. // Актуальные проблемы науки и образования : труды международ. Юбилейного симпоз. : в 2-х т. – Пенза : Информационно-издательский центр ПГУ, 2003. – 2 т. – С. 288–290.
15. Моисеев В.В. Измерительный комплекс для экспресс-контроля параметров приемных катушек автоматической локомотивной сигнализации / Моисеев В.В., Тюпин С.В. // Описание изобретения к патенту. Дата регистрации: 04.08.2017 (RU) (73). Патентообладатель(и): Открытое акционерное общество «Российские железные дороги».

Проектно-конструкторское бюро локомотивного хозяйства –

филиал ОАО «РЖД» (ПКБ ЦТ), г.Москва

Бородкин А. В.: заместитель начальника отдела

УДК 621.3 ГРНТИ 45.29.31

А. В. Бублик, В. В. Бублик, Н. В. Есин, О. В. Гателюк, Д. И. Попов

СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ АСИНХРОННЫХ МАШИН

Аннотация. *В настоящее время существует множество технических, технологических и схемотехнических решений, позволяющих произвести реализацию различных методов проведения испытаний асинхронных машин, используя опыт холостого хода, опыт короткого замыкания и метод взаимного нагружения. В статье приведено описание и анализ применения на практике таких схемных решений.*

Ключевые слова*: асинхронная машина, электрический двигатель, генератор, статор, ротор, частотный преобразователь, трансформатор, синус-фильтр, скольжение, коэффициент мощности, опыт короткого замыкания, опыт холостого хода.*

Anton V. Bublik, Vladimir V. Bublik, Nicolay V. Yesin, Oleg V. Gateliuk, Denis I. Popov

Abstract*: Currently, there are many technical, technological and circuit design solutions that allow the implementation of various methods and techniques for testing asynchronous machines using the experience of idling, short-circuit experience and the method of mutual loading. The article describes and analyzes the practical application of such circuit solutions.*

Keywords*: asynchronous machine, electric motor, generator, stator, rotor, frequency converter, transformer, sine filter, slip, power factor, short circuit experience, idling experience*

На завершающем этапе процесса ремонта асинхронных электрических машин возникает вопрос об их испытании. Для этого достаточно собрать специальную схему, которая позволит произвести опыт холостого хода и опыт короткого замыкания. Такая схема состоит из автоматического выключателя, контакторов, силового трансформатора, имеющего три вторичные обмотки, и испытуемой асинхронной машины. Каждая из обмоток трансформатора соединена в звезду. Выходные напряжения вторичных обмоток подобраны таким образом, что одна из обмоток реализует номинальное напряжения, а две другие повышенное и пониженное напряжение, при котором реализуется опыт холостого хода. Испытание при повышенном напряжении проводится на холостом ходу для определения междувитковых замыканий. Данная схема приведена на рисунке 1.

Но на практике этого бывает недостаточно. Асинхронную машину нужно испытывать так же и на повышенную частоту вращения. При этом изменение частоты вращения асинхронной машины возможно путем изменения числа пар полюсов, либо изменив частоту питающего напряжения. Для изменения частоты питающего напряжения в выше описанную схему добавляется частотный преобразователь (рис. 2).

Описанные выше схемные решения не позволяют испытать асинхронную машину под нагрузкой, то есть при номинальной нагрузке, превышении по моменту, кратковременной перегрузки по току и т.д.

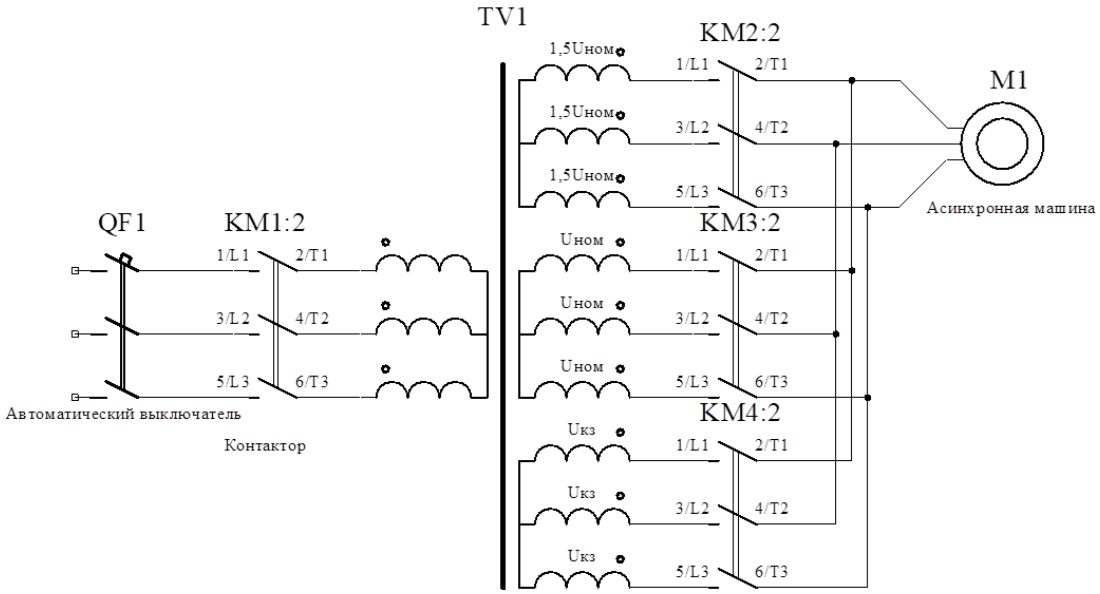


Рисунок 1 – Схема испытания асинхронной машины методом холостого хода и короткого замыкания

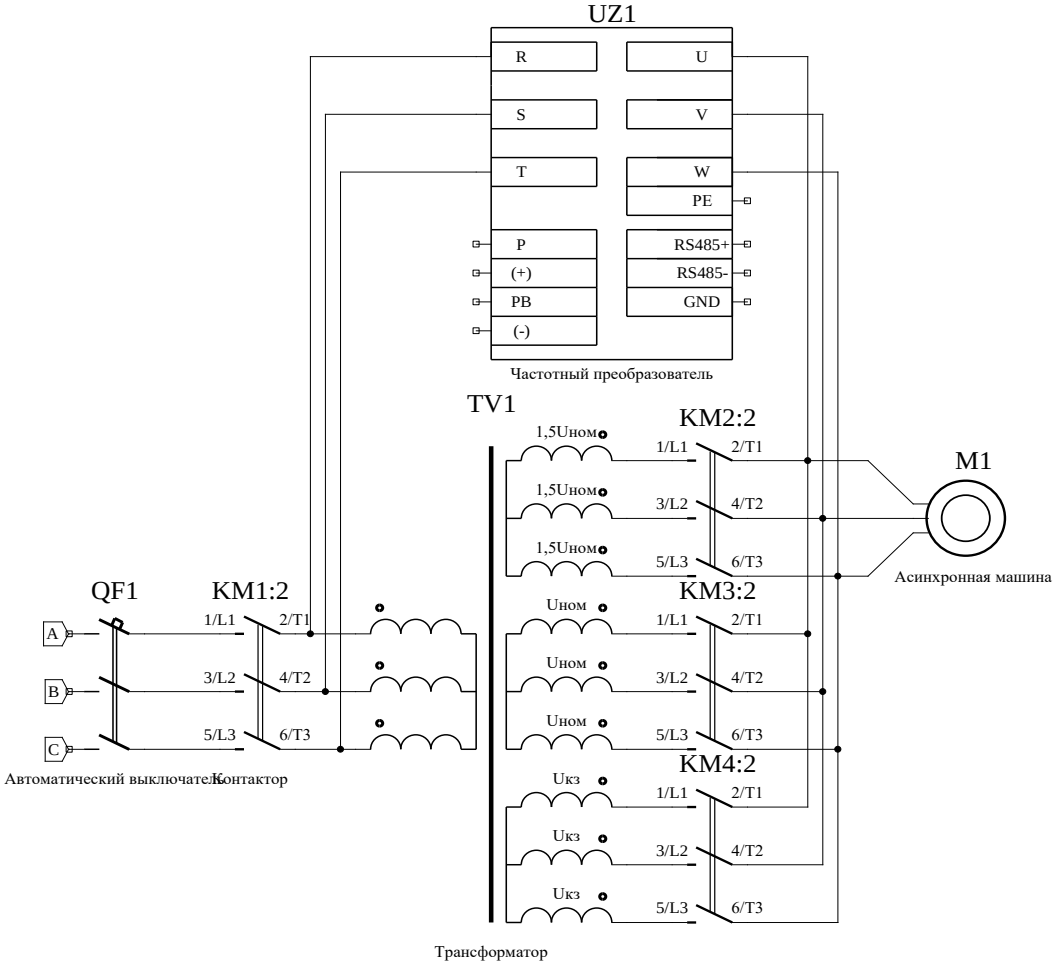
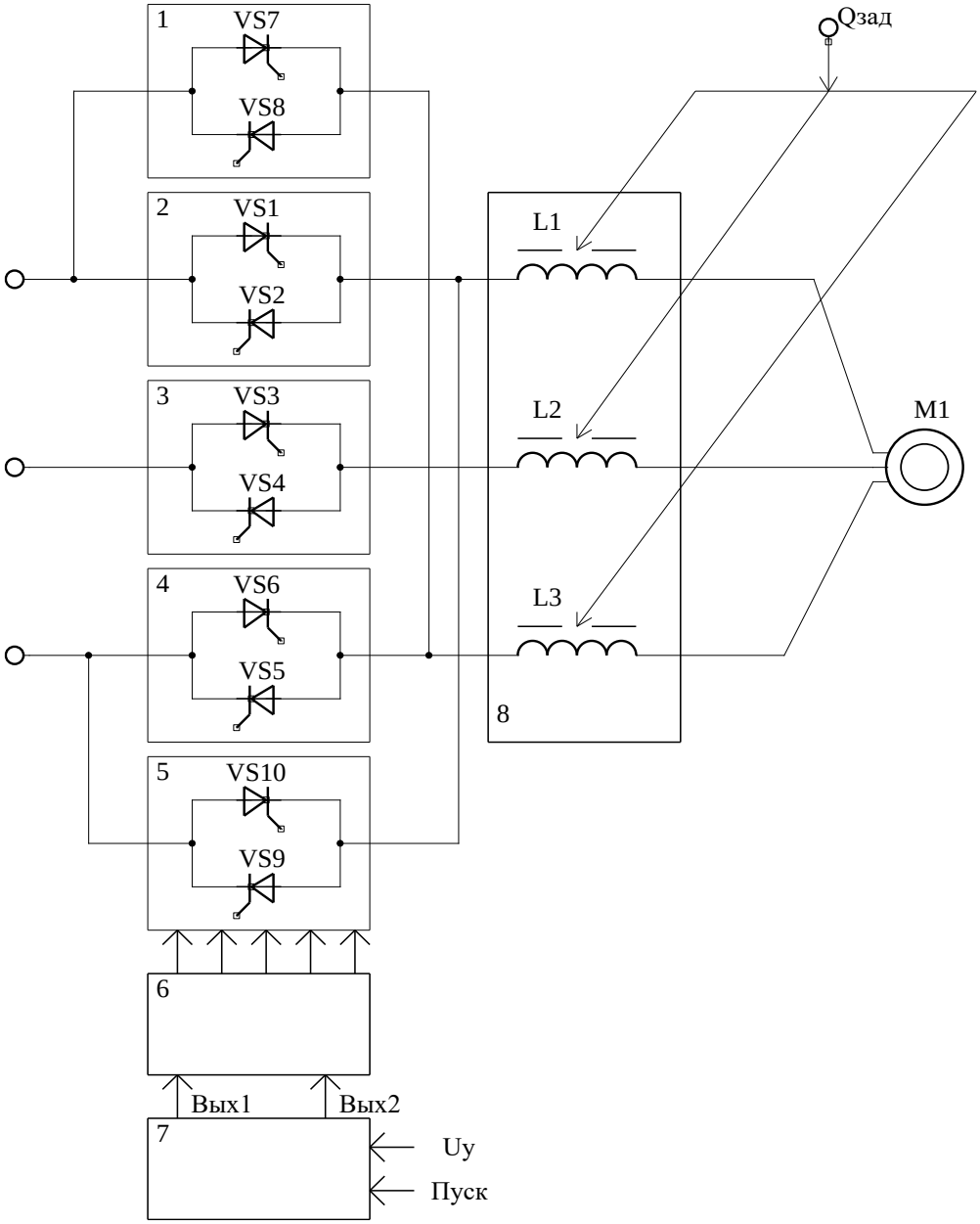


Рисунок 2 – Схема испытания асинхронной машины при повышенной частоте вращения

На рисунке 3 приведено схемное решение с применением механического индукционного регулятора [1]. Такое схемное решение позволяет реализовать испытание на пуск, реверсирование, набор и сброс тока нагрузки. Однако из-за сложности конструкции механического индукционного регулятора и системы управления данное схемное решение не нашло применения на практике.



1, 2, 3, 4, 5 – симисторные регуляторы; 6 – система управления симисторами; 7 – блок управления режимами работы; 8 – механический индукционный регулятор
Рисунок 3 – Схема испытания асинхронной машины под нагрузкой с применением механического индукционного регулятора

Реализовать нагружение асинхронной машины можно созданием нагрузки на ее валу применением нагрузочного генератора. В качестве нагрузочных генераторов можно использовать как машину постоянного, так и переменного тока (синхронный генератор).

Схема испытаний с применением генераторов постоянного тока приведена на рисунке 4, а с применением синхронного генератора на рисунке 5. Основным недостатком всех выше описанных схемных решений является то, что они очень энергозатратные.

Для снижения энергозатрат реализуют возможность возврата затраченной электроэнергии в сеть, при проведении испытаний. На рисунке 6 приведена схема испытания асинхронной машины с возможностью рекуперации электроэнергии в питающую сеть.

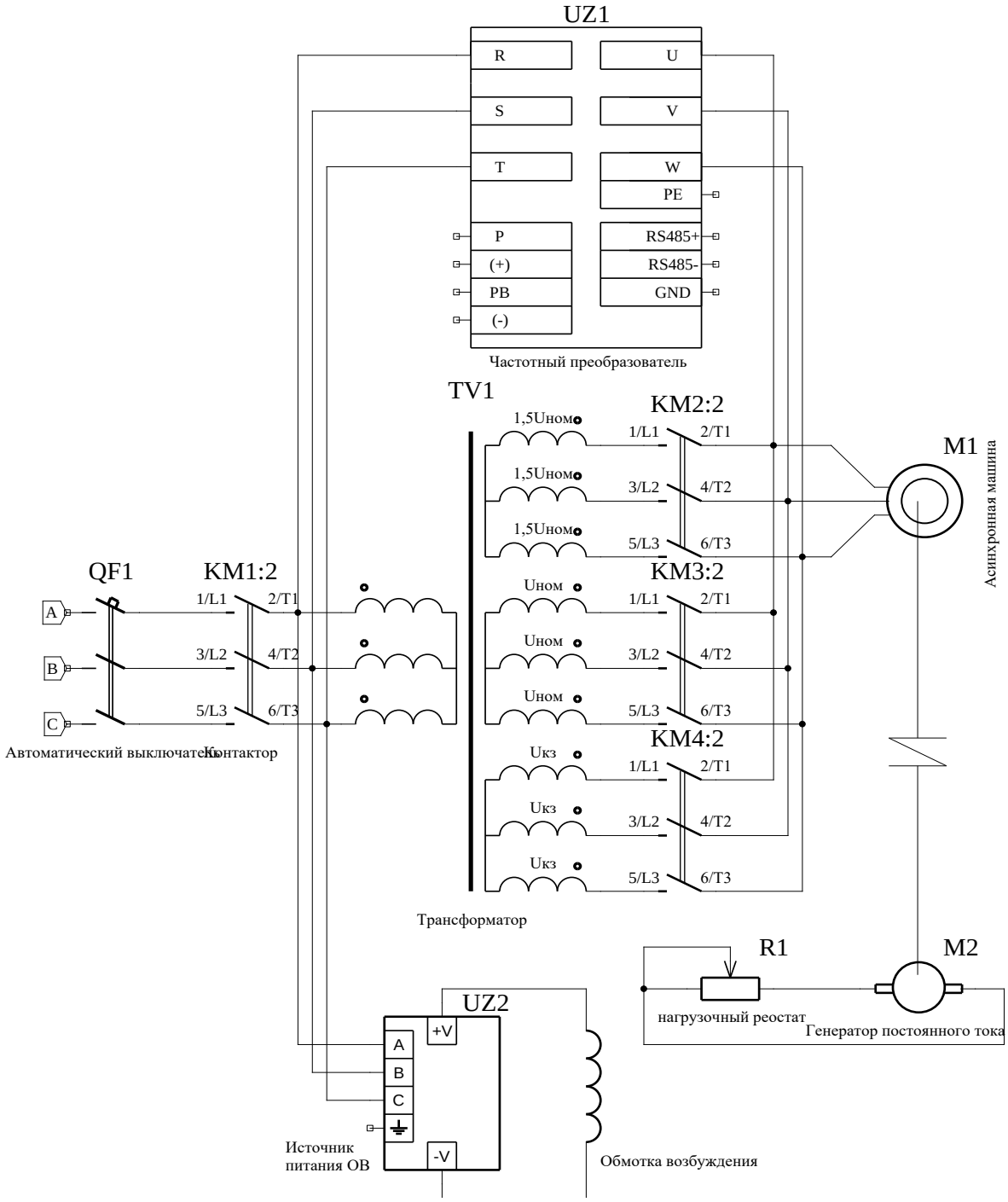


Рисунок 4 – Схема испытания с применением в качестве нагрузки генератора постоянного тока

Использования метода взаимного нагружения для снижения энергозатрат при проведении испытаний электрических машин известно давно. Однако применение этого метода для испытания асинхронных машин стало возможно только благодаря развитию полупроводниковой техники, а именно при появлении частотных преобразователей. Схема метода взаимной нагрузки асинхронных машин приведена на рисунке 7.

На рисунке 8 представлено схемное решение испытательной системы для проведения приемо-сдаточных испытаний АМ так же методом взаимной нагрузки. Такое схемное решения позволяет расширить функциональные возможности испытательных систем и комплексов, предназначенных для проведения приемо-сдаточных испытаний асинхронных машин методом взаимной нагрузки.

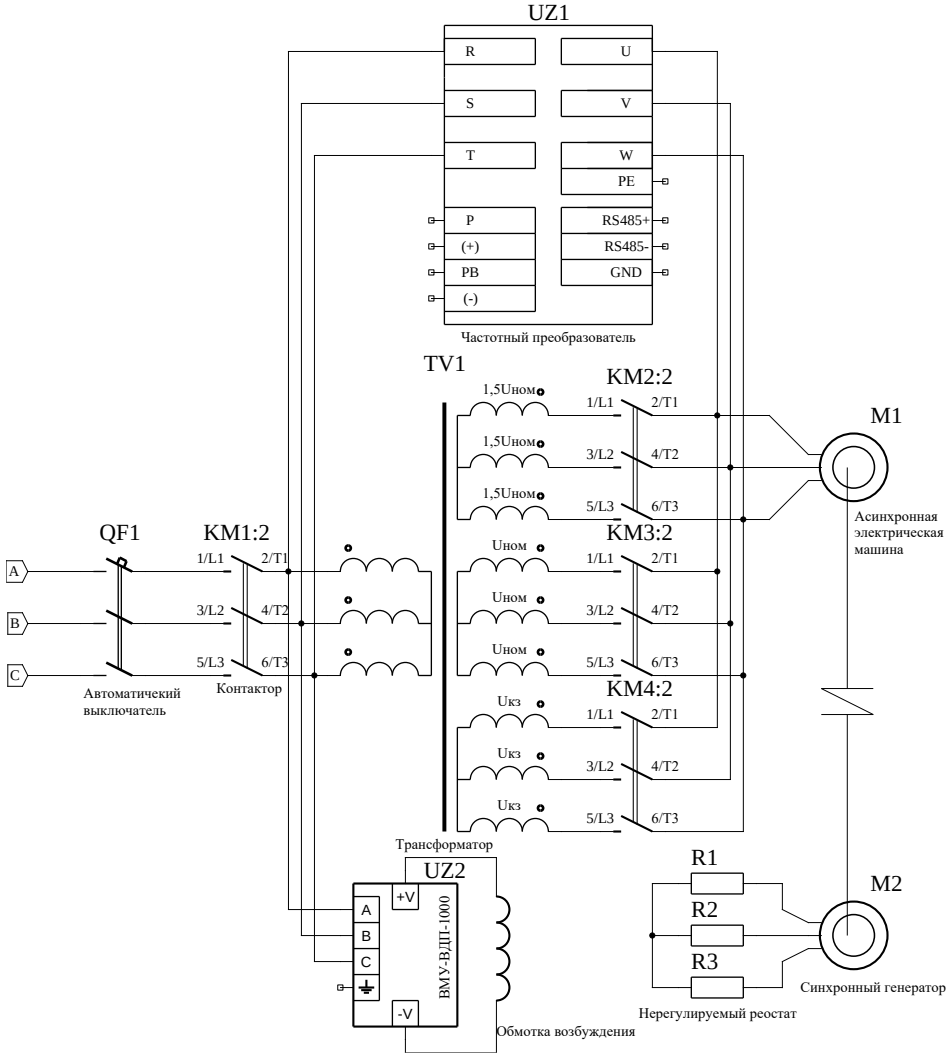


Рисунок 5 – Схема испытания с применением в качестве нагрузки трехфазного синхронного генератора

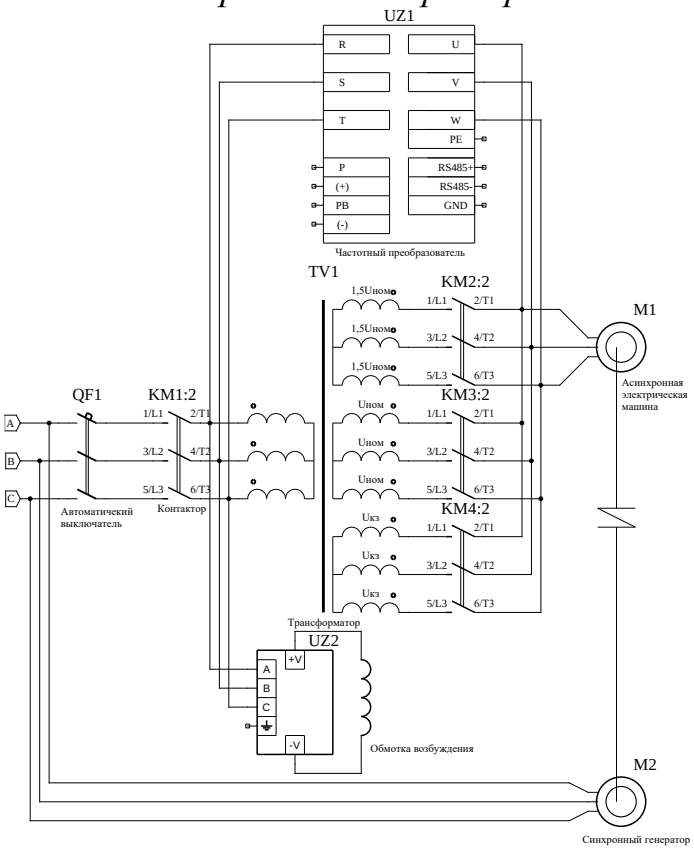
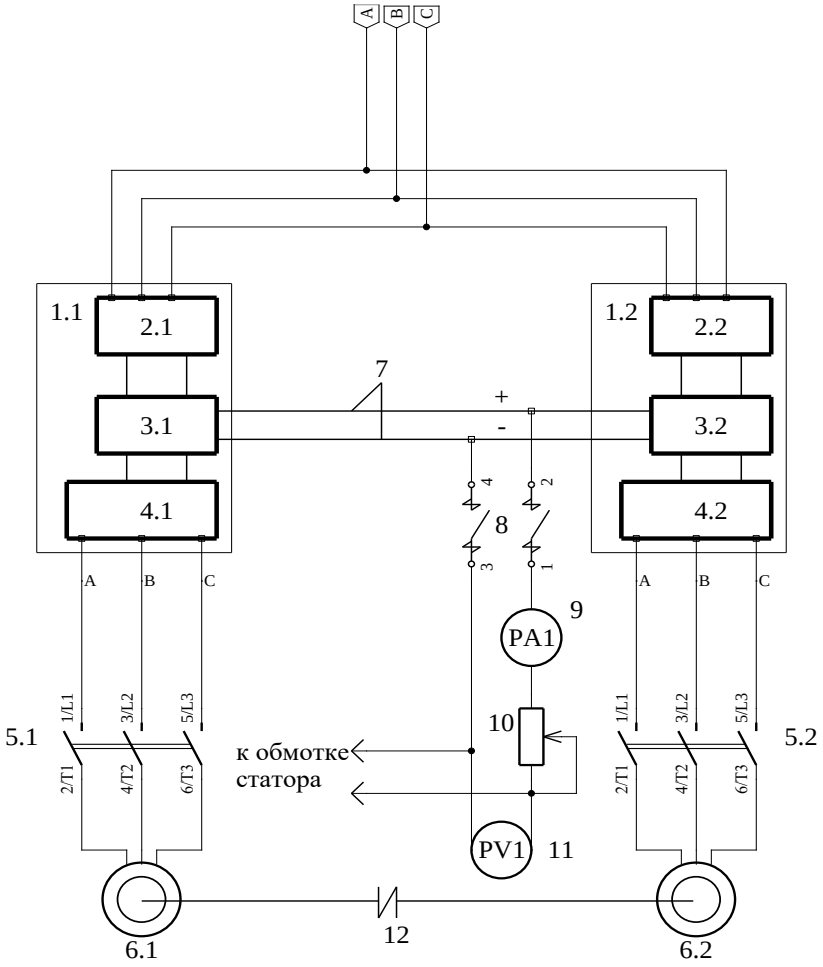


Рисунок 6 – Схема испытания с возможностью возврата электроэнергии в сеть



1 – преобразователь частоты, 2 – неуправляемый выпрямитель, 3 – звено постоянного тока, 4 – инвертор; 5 – контактор; 6 – испытуемая асинхронная машина; 7 – шина постоянного тока; 8 – контактор; 9 – амперметр; 10 – регулятор тока; 11 – вольтметр.

Рисунок 7 – Схема испытания методом взаимного нагружения с возможностью измерения сопротивления обмоток постоянному току

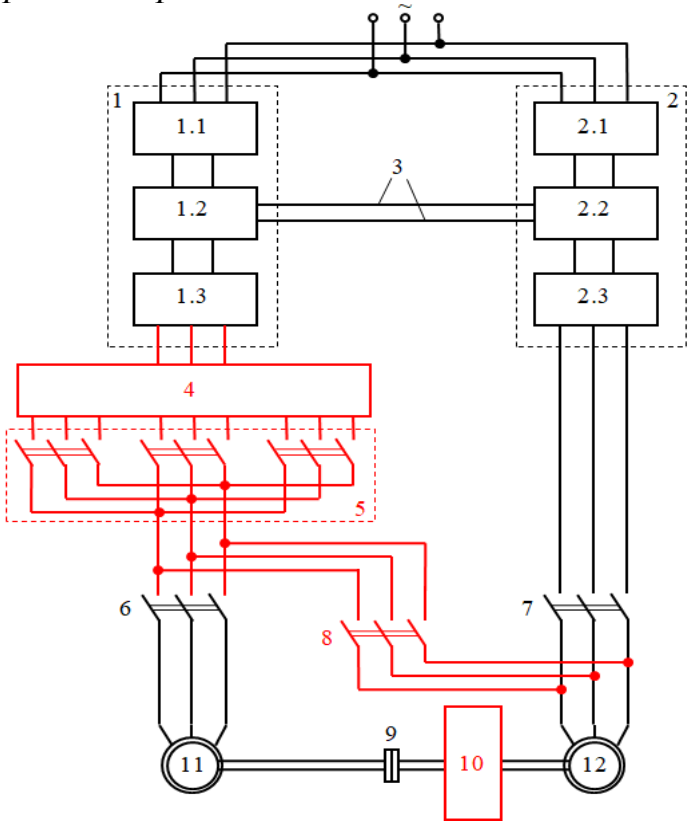


Рисунок 8 – Схемное решение стенда для проведения приемо-сдаточных испытаний

В данном случае схемное решение испытательной системы включает в себя два частотных преобразователя 1 и 2, соединенных между собой по общей шине 3 звена постоянного тока, силового трансформатора с расщепленной вторичной обмоткой 4, коммутатора 5, контакторов 6 – 8, электромеханического тормоза 10, механического сопряжения 9 между валами первой и второй испытуемых асинхронных машин 11 и 12 [3, 4, 5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент № 2334993 Российская Федерация, МПК G01R 31/34 (2006.01). Устройство для испытания асинхронных двигателей под нагрузкой : №2007119699/28 : заявлен. 28.05.2007 : опубл. 27.09. 2008 / Леоненко С. С., Леоненко А. С., Прокопьев А. Ю. ; заявитель ГОУ ИрГТУ. – 9 с. : ил. – Текст непосредственный.

2. Патент № 178657 Российская федерация, МПК G01R 31/34. Схема испытания асинхронных двигателей : № 2017143234: заявлен. 2017.12.11 : опубл. 2018.04.16 / Харламов В. В., Попов Д. И., Литвинов А. В. ; заявитель ОмГУПС. – 6 с. : ил. – Текст непосредственный.

3. Бублик, А. В. Комплексное соединительное устройство для сочленения валов электрических машин при проведении испытаний / А. В. Бублик, Н. В. Есин, Д. А. Титанаков // Материалы международной научно-практической конференции "НЕДЕЛЯ НАУКИ 2023", посвященной году педагога и наставника. – 2023. – С. 58 – 66. – Текст : непосредственный.

4. Бублик, А. В. Вопросы проектирования испытательных стендов электрических машин подвижного состава / А. В. Бублик, В. В. Бублик, О. В. Гателюк, Н. В. Есин // Материалы VII всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – 2022. – С. 58 – 66. – Текст : непосредственный.

5. Бублик, А. В. Анализ схем испытательных стендов асинхронных электрических машин / А. В. Бублик, В. В. Бублик, Н. В. Есин // Повышение эффективности эксплуатации электромеханических преобразователей энергии в промышленности и на транспорте: Материалы X всероссийской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 120-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, д.т.н., профессора М.Ф. Карасева и 80-летию со дня образования кафедры "Электрические машины и общая электротехника", Омск, 5 – 6 декабря 2023, Омск : ОмГУПС – 2023. – С. 233 – 240. – Текст : непосредственный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Попов Денис Игоревич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электрические машины и общая электротехника» Тел.: +7 (913) 683-95-59.
E-mail: popovomsk@yandex.ru

Бублик Антон Владимирович
ОАО «Научно-исследовательский институт технологии, контроля и диагностики железнодорожного транспорта» (ОАО «НИИТКД»).
Избышева ул., 3, корп. 2, г. Омск, 644005 РФ.
Ведущий инженер-электроник, заместитель начальника отдела разработки и внедрения испытательного оборудования технической дирекции
Тел.: +7 (913) 618-18-79.
E-mail: anvbublik@mail.ru

Бублик Владимир Васильевич
ОмГУПС, к.т.н., доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС
Тел.: +7 (3812) 31-34-19
E-mail: bublikvv52@mail.ru

Гателюк Олег Владимирович
ОмГУПС, к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры «Высшей математики», доцент кафедры «Информационная безопасность»
Тел.: +7(950) 955-82-19.
E-mail: oleg.gatelyuk.61@yandex.ru

Есин Николай Васильевич
ОмГУПС, к.т.н., доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог».
Тел.: +7 (3812) 31-34-19
E-mail: nikve@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Stepanov Sergey Yurievich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of “Electrical Machines and General Electrical Engineering”, OSTU.
Phone: +7 (913) 683-95-59.
E-mail: popovomsk@yandex.ru

Bublik Anton Vladimirovich
Open Joint Stock Company "Scientific Research Institute of Technology, Control and Diagnostics of Railway Transport"
(JSC "NIITKD").
Izbysheva str., 3, building 2, Omsk, 644005 Russian Federation.
Leading electronics engineer, Deputy Head of the Testing Equipment Development and Implementation Department of the Technical Directorate
Phone: +7 (913) 618-18-79.
E-mail: anvbublik@mail.ru

Bublik Vladimir Vasilevich
OSTU). Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Rolling stock electric railways»
Phone: +7 (3812) 31-34-19
E-mail: bublikvv52@mail.ru

Gatelyuk Oleg Vladimirovich
OSTU. Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the departments «Higher Mathematics», «Information Security».
Phone: +7(950) 955-82-19.
E-mail: oleg.gatelyuk.61@yandex.ru

Yesin Nikolay Vasilyevich
OSTU. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Rolling stock electric railways».
Phone: +7 (3812) 31-34-19
E-mail: nikve@mail.ru

УДК 629.423 ГРНТИ 55.41.29

А. А. Будаев, Е. А. Третьяков, А. В. Раздобаров

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ И РАЗЛИЧНЫХ СОСТОЯНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОВОЗОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ОТКАЗОВ В ПУТИ СЛЕДОВАНИЯ

Аннотация. *Целью данной работы является моделирование неисправностей и различных состояний электрического оборудования электровозов путем создания наборов данных с различными параметрами движения для машинного обучения моделей прогнозирования параметров и различных состояний электроподвижного состава в рамках разрабатываемой системы автоматизированного предотвращения отказов в пути следования. Для достижения цели использовались методы имитационного компьютерного моделирования, математической статистики и теории электрической тяги. Полученные результаты могут найти практическое применение в области диагностики и мониторинга технического состояния электроподвижного состава в пути следования для автоматизированного предотвращения отказов, в том числе в условиях малолюдных и беспилотных технологий.*

Ключевые слова: *цифровой двойник, электроподвижной состав, имитационная модель, неисправности, моделирование, автоматизированное предотвращение.*

В настоящее время в компании ОАО «РЖД» активно разрабатываются и внедряются инновационные технические средства на основе таких технологий как: большие данные, машинное обучение, искусственный интеллект, цифровой двойник и т.д. Современным этапом развития электроподвижного состава железных дорог является разработка технологии выбора способов предотвращения неисправностей и различных состояний электрического оборудования электровозов в пути следования. Актуальность разработки и внедрения цифровых двойников на электроподвижном составе полностью соответствует стратегическим целям ОАО «РЖД», что подтверждается Паспортом комплексной программы инновационного развития холдинга «РЖД» на период до 2025 г., где данная технология является элементом группы инновационных проектов «Подвижной состав 2025» [1].

Целью работы является моделирование неисправностей и различных состояний электрического оборудования электровозов для машинного обучения моделей прогнозирования параметров в рамках разрабатываемой системы автоматизированного предотвращения отказов в пути следования.

Для предотвращения отказов электровозов с помощью цифрового двойника можно предсказывать последствия неисправностей или различных состояний электрического оборудования, а также оказывать поддержку и предлагать возможные действия. В рассматриваемом контексте возможности реализации цифрового двойника гораздо шире текущей предиктивной диагностики электроподвижного состава. Предлагаемое решение для автоматизированного предотвращения отказов электровозов в пути следования на основе технологии «Цифровой двойник» представлено на рисунке 1.

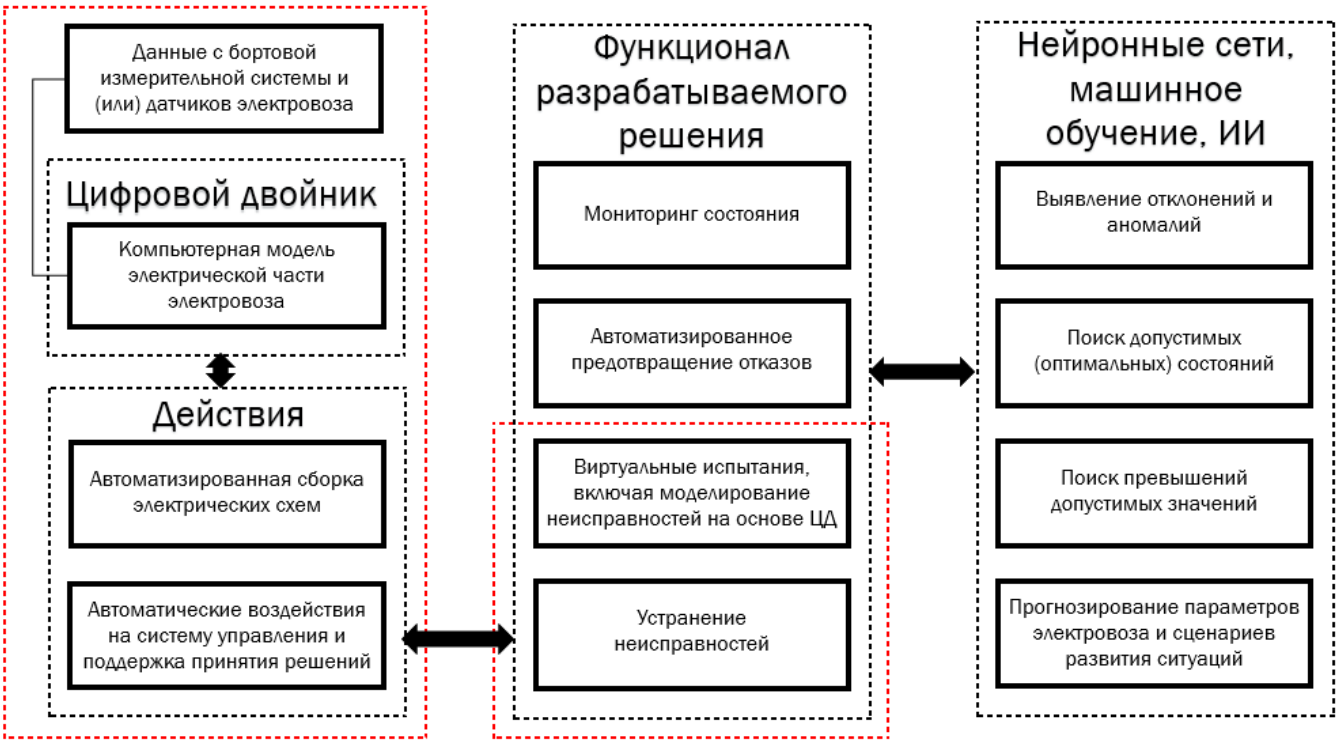


Рисунок 1 – Предлагаемое решение на основе технологии «Цифровой двойник»

В работах отечественных и зарубежных исследователей наблюдается большой интерес к разработке и использованию цифровых двойников в контексте производства и ремонта электроподвижного состава. В исследованиях И. К. Лакина, А. П. Семёнова представлены результаты исследований, в которых технология «Цифровой двойник» развивается в рамках предиктивной технической диагностики состояния электроподвижного состава для технического обслуживания и текущего ремонта по фактическому состоянию с учётом информации из бортовых измерительных устройств и статистики ремонта на протяжении всего жизненного цикла [2]. В исследованиях А. С. Ададурова, В. И. Фёдорова и др. представлены результаты разработки программно-аппаратного комплекса предиктивной диагностики ряда узлов электропоездов ЭС2Г «Ласточка». Авторами не представлена комплексная цифровая компьютерная модель электрической части электроподвижного состава [3, 4].

В работах зарубежных исследователей Н. Боссо, Е. Бернал, К. Ву и др. рассматривается комплексная методика построения цифровых двойников и их взаимосвязей с методами искусственного интеллекта, машинного обучения, больших данных и компьютерного зрения [5, 6]. В исследованиях [7] авторами представлены различные подходы к применению цифровых двойников, которые позволят использовать методы прескриптивной диагностики для оптимизации процессов обслуживания и ремонта на основе прогнозов. Зарубежными авторами не рассматриваются процессы разработки и внедрения цифрового двойника для прогнозирования (моделирования) неисправностей и различных состояний электрического оборудования электровозов.

Как известно, в основе понятия «цифровой двойник» находится компьютерная имитационная модель, верифицированная на основе реальных данных, накапливаемая информация о параметрах объекта и их изменений, а также связей с внешней средой. Рассмотрим подробнее пример построения компьютерной модели электрической части

электровоза серии 2ЭС6 для получения набора данных, необходимых для машинного обучения поиска неисправностей в пути следования и их последующего предотвращения в автоматическом режиме. Нейронная сеть не может быть обучена за требуемое время только на экспериментальных данных из-за их ограниченного объема.

В данной работе выполнено моделирование неисправностей и различных состояний электрооборудования электровозов для автоматизированного предотвращения отказов в пути следования на основе цифрового двойника электровоза 2ЭС6, разработанного в программном обеспечении Matlab с использованием графической среды Simulink [8, 9]. Модель состоит из набора готовых и разработанных блоков и элементов, где реализованы системы управления и аппараты защиты. Компьютерная модель электрической части электровоза представлена на рисунке 2.

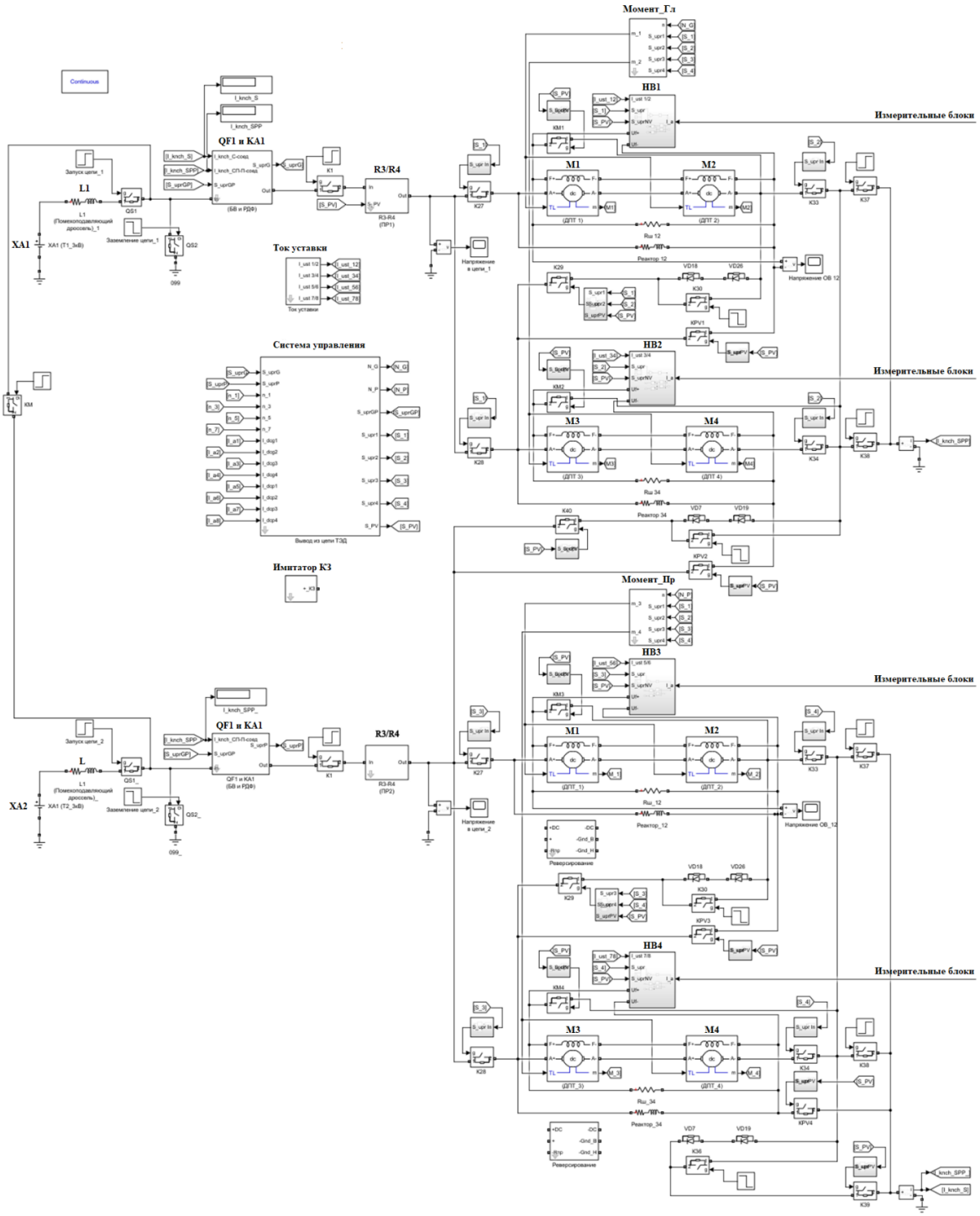


Рисунок 2 – Компьютерная модель электрической части электровоза 2ЭС6

В качестве исходных данных использованы паспортные данные тягового электродвигателя постоянного тока ЭДП810, которые вносились в блок «DC Machine». Недостающие параметры рассчитаны по методике И. В. Черных [10].

Быстродействующий выключатель и дифференциальное реле реализованы в подсистеме «QF1/KA1» и выполняют роль аппаратов защиты оборудования электровоза. Пусковой реостат «R3-R4» состоит из блоков сопротивлений, реализованных с помощью последовательно соединенных резисторов и контакторов, которые закрываются в определенное время, ступенчато уменьшая сопротивление в цепи. В подсистемах «Момент_Гл/Пр» рассчитывается вращающий момент на валах тяговых электродвигателей на основе расчетной силы тяги, взятой с бортовой измерительной системы, и тягового расчета. Независимое возбуждение реализовано в подсистеме «НВ_1/4», с помощью обратной связи по току якоря, регулировка тока возбуждения осуществляется по следующему закону (1):

$$I_{в} = I_{в.уст} + k \cdot I_{я}, \quad (1)$$

где $I_{в.уст}$ – ток возбуждения уставки;
k – коэффициент компаундирования;
$I_{я}$ – ток в обмотках якорей ТЭД.

Кроме этого, имеется возможность для задания тока возбуждения на основе данных с регистратора параметров движения и автоведения (РПДА) электровоза.

Для примера был выбран режим короткого замыкания в электрической части электровоза 2ЭС6: 1) в цепях тяговых электродвигателей; 2) в статическом преобразователе СТПР-1000 (Подсистемы «НВ_1/4»).

Моделирование возможных неисправностей в электрической цепи электровоза

Для реализации данных неисправностей была разработана подсистема «Имитатор КЗ» (рис. 3), которую можно подключить в любую точку компьютерной модели. Время начала и окончания режима короткого замыкания задается с помощью диалогового окна.

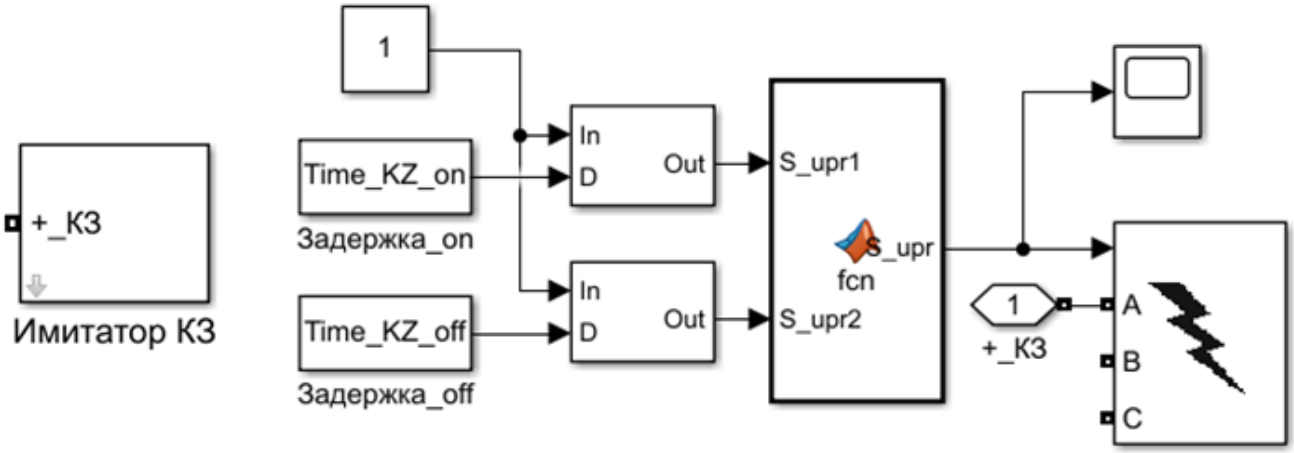


Рисунок 3 – Подсистема «Имитатор КЗ»

Перед началом моделирования неисправностей выполнен запуск цепи для получения зависимостей основных параметров от общего времени. Моделирование длилось 65 секунд, за данный период было реализовано 23 позиции пускового реостата для С-соединения ТЭД. Полученные графики представлены на рисунке 4.

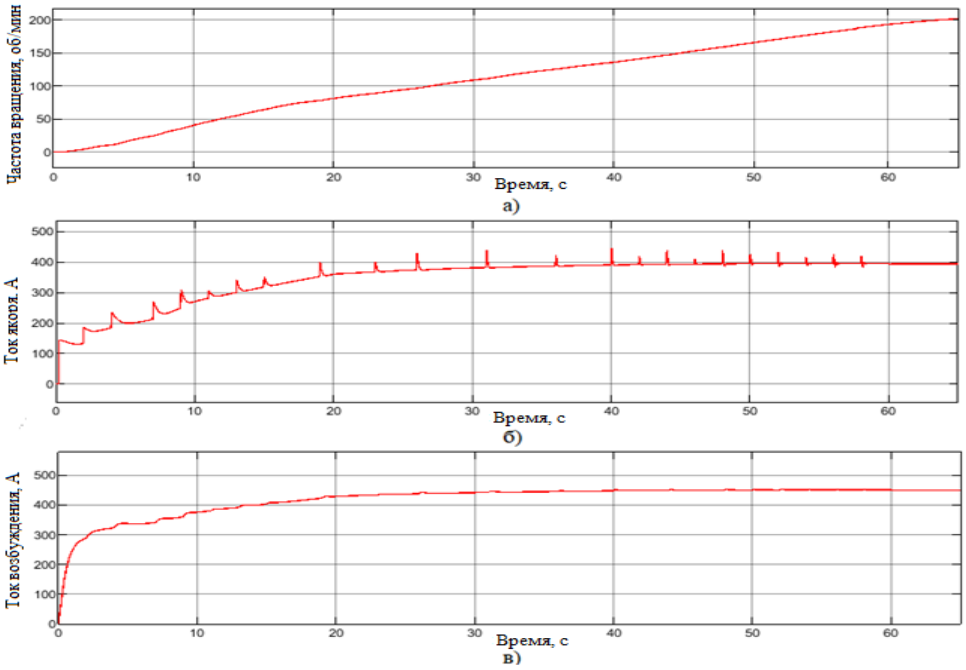


Рисунок 4 – Параметры первой пары ТЭД (М1/2) в головной секции: а) частота вращения; б) ток якоря; в) ток возбуждения

Частота вращения ТЭД в конце моделирования составила 200,8 об/мин, ток якоря 393,2 А, а ток возбуждения 448,6 А. Параметры на всех двигателях идентичны с разницей не более одного процента, так как соединены последовательно.

1) Моделирование режима КЗ в цепях ТЭД.

Блок «Имитатор КЗ» подключен к первой паре ТЭД в прицепной секции, короткое замыкание происходит на 15-й секунде. После возникновения режима КЗ, аппаратами защиты фиксируются отклонения параметров и формируются сигналы, которые передаются в систему управления для проверки всех пар ТЭД. Определив неисправную пару ТЭД от системы поступают управляющие сигналы на соответствующие контакторы, выводя неисправную пару ТЭД из цепи. Результаты представлены на рисунке 5.

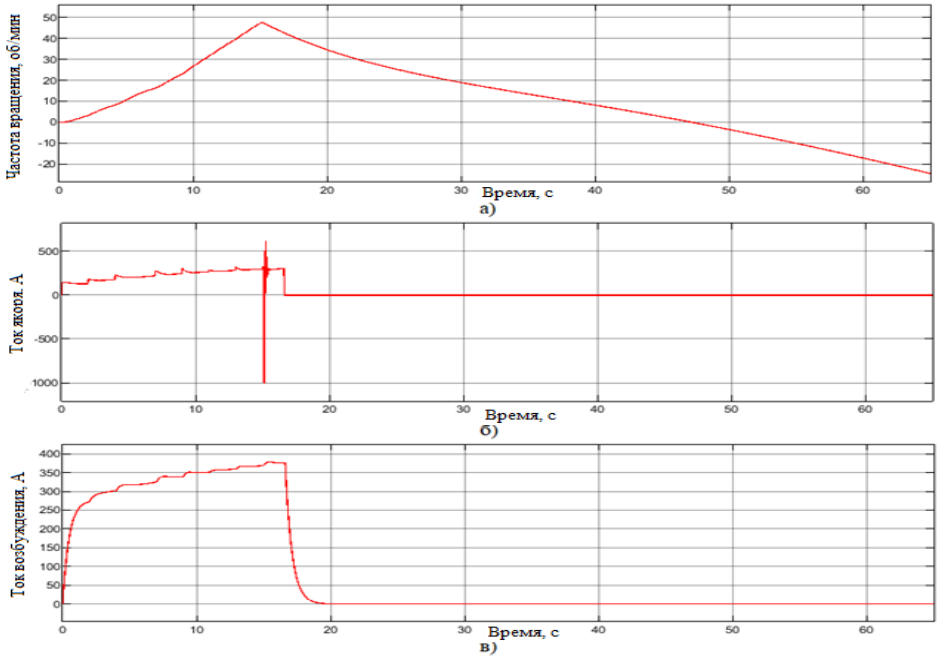


Рисунок 5 – Параметры первой пары ТЭД (М1/2) в прицепной секции: а) частота вращения; б) ток якоря; в) ток возбуждения

При возникновении режима КЗ наблюдается бросок тока, который превышает значения уставок аппаратов защиты. Ток снизился до нуля после вывода из цепи неисправной пары ТЭД. До 15-й секунды частота вращения находилась в тех же пределах, что и при нормальном режиме работы, после появления короткого замыкания значение стало снижаться. Совместно с неисправной парой ТЭД была выведена и подсистема, питающая обмотки возбуждения. Графики зависимостей второй пары ТЭД (М3/4) в прицепной секции представлены на рисунке 6.

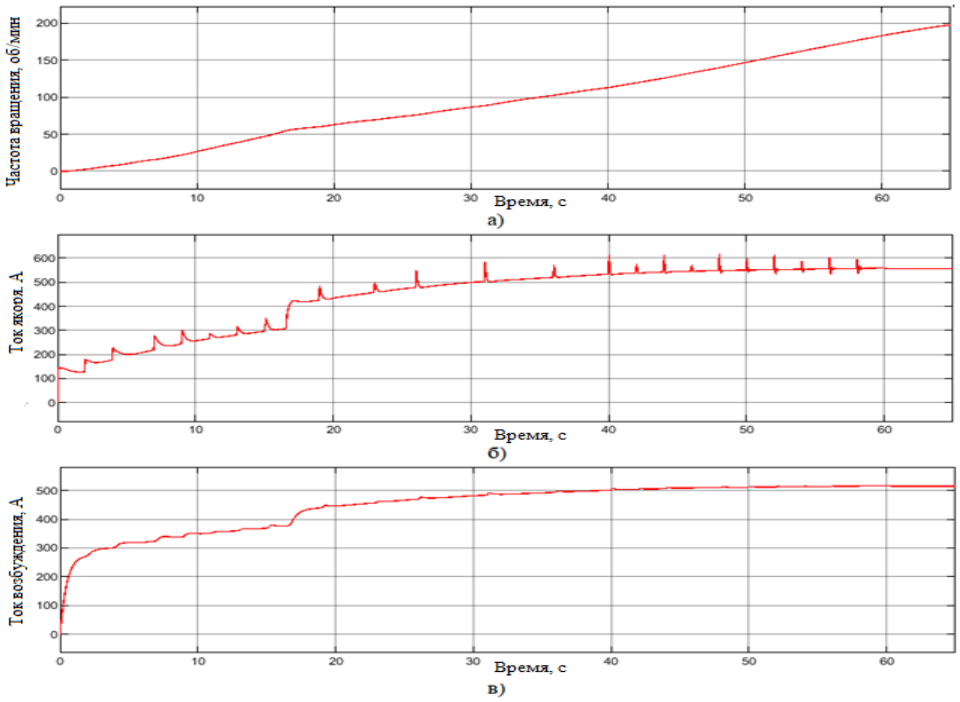


Рисунок 6 – Параметры второй пары ТЭД (М3/4) в прицепной секции: а) частота вращения; б) ток якоря; в) ток возбуждения

На рис.6 видно возникновение короткого замыкания, ток якоря увеличился на 120 А, а в конце моделирования составил 553,2 А, разница с нормальным режимом работы составила ~40%. Ток возбуждения в конце моделирования равнялся 513,8 А, разница составила ~14%. Частота вращения во время моделирования КЗ практически не изменилась, так как нагрузка с неисправных ТЭД была распределена на оставшиеся ТЭД.

2) Моделирование режима КЗ в СТПР-1000 (НВ_1/4)

Блок «Имитатор КЗ» подключен к подсистеме «НВ-2» в головной секции, который выполняет функцию СТПР-1000. Режим КЗ реализован на 10-й с, срабатывают аппараты защиты, сигналы поступают в систему управления, где происходит проверка токов всех ТЭД, после обнаружения места возникновения короткого замыкания из цепи выводится подсистема «НВ_2» вместе с соответствующей парой ТЭД (М3/4). На контакторы поступают сигналы для переключения всех двигателей на последовательное возбуждение. Полученные графики зависимостей представлены на рисунке 7 (исправные ТЭД) и 8 (неисправные ТЭД). Частота вращения ТЭД на последовательном возбуждении составила 211 об/мин. Ток якоря до 10-й секунды изменялся ступенчато, после режима КЗ произошел переход на последовательное возбуждение и сброс позиций пускового реостата, значение в конце моделирование составило 126,4 А. Ток возбуждения изменялся согласно уравнению (1) в подсистеме «НВ_1», после перехода на последовательное возбуждение параметр принимал те же значения, что и ток якоря.

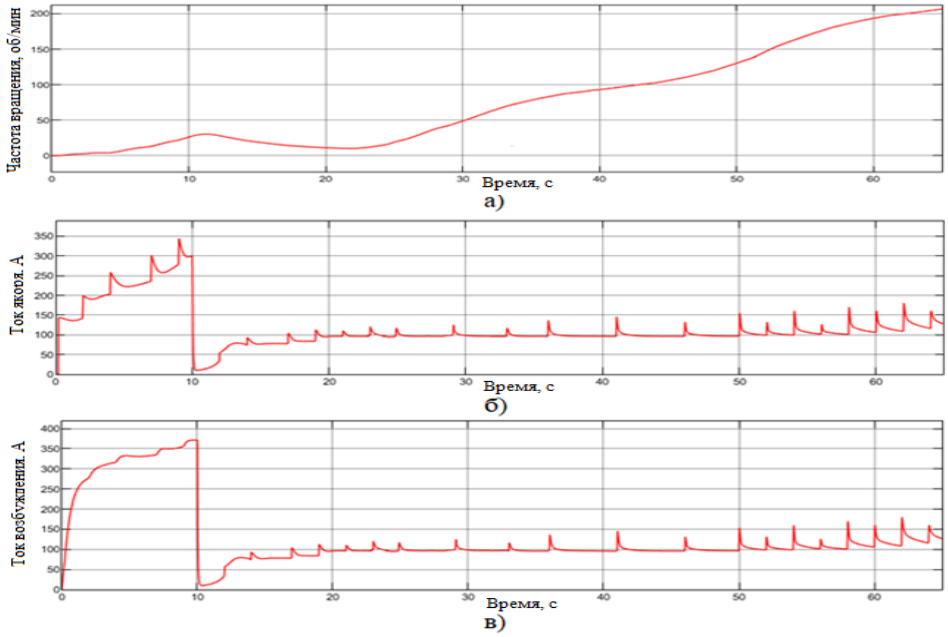


Рисунок 7 – Параметры первой пары ТЭД (М1/2) в головной секции: а) частота вращения; б) ток якоря; в) ток возбуждения

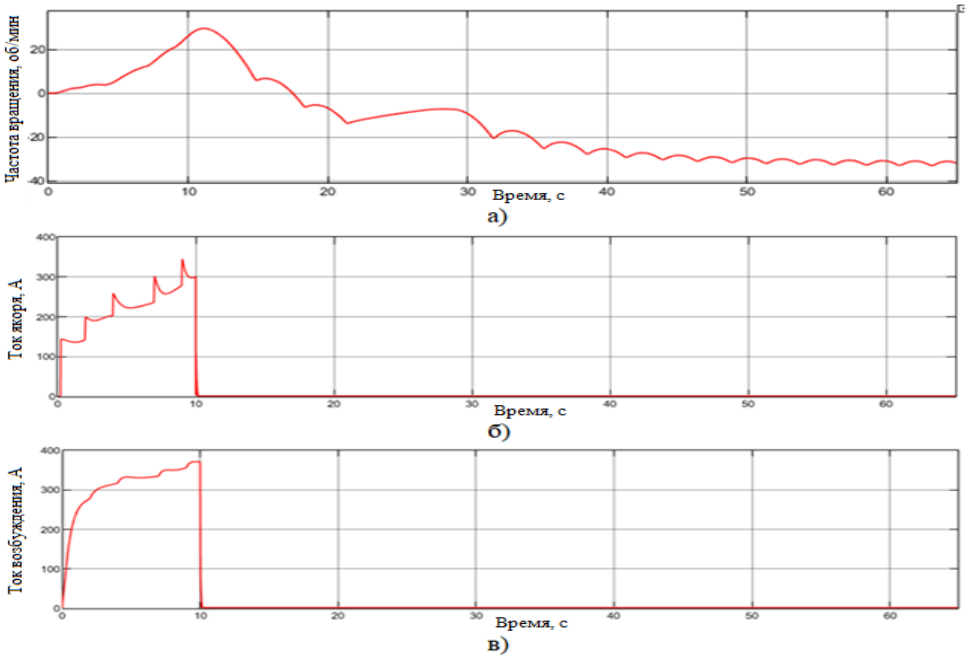


Рисунок 8 – Параметры второй пары ТЭД (3/4) в головной секции: а) частота вращения; б) ток якоря; в) ток возбуждения

На второй паре ТЭД (3/4) с неисправной подсистемой «НВ_2» частота вращения до начала моделирования режима КЗ в СТПР-1000 изменялась в том же диапазоне, что и при нормальном режиме работы цепи. На 10-й секунде при переходе на последовательное возбуждение и выводе неисправной подсистемы с соответствующими двигателями частота вращения снизилась. Ток якоря и ток возбуждения после режима КЗ снизились до нулевого значения.

Для проверки достоверности разработанной компьютерной модели электрической части электровоза 2ЭС6 использовались данные с бортовой измерительной системы. Результаты моделирования представлены на рисунке 9. В модель вносились следующие данные с помощью блоков построителей сигналов: напряжение в контактной сети;

позиции переключения пускового реостата для С-соединения ТЭД; сила тяги; ток возбуждения. Моделирование длилось 180 секунд, за это время было реализовано 23 позиции пускового реостата. Для определения сходимости полученных значений выполнен расчет коэффициента корреляции Пирсона, который составил: частота вращения – 99%; ток якоря – 98,5%; ток возбуждения 99,6%.

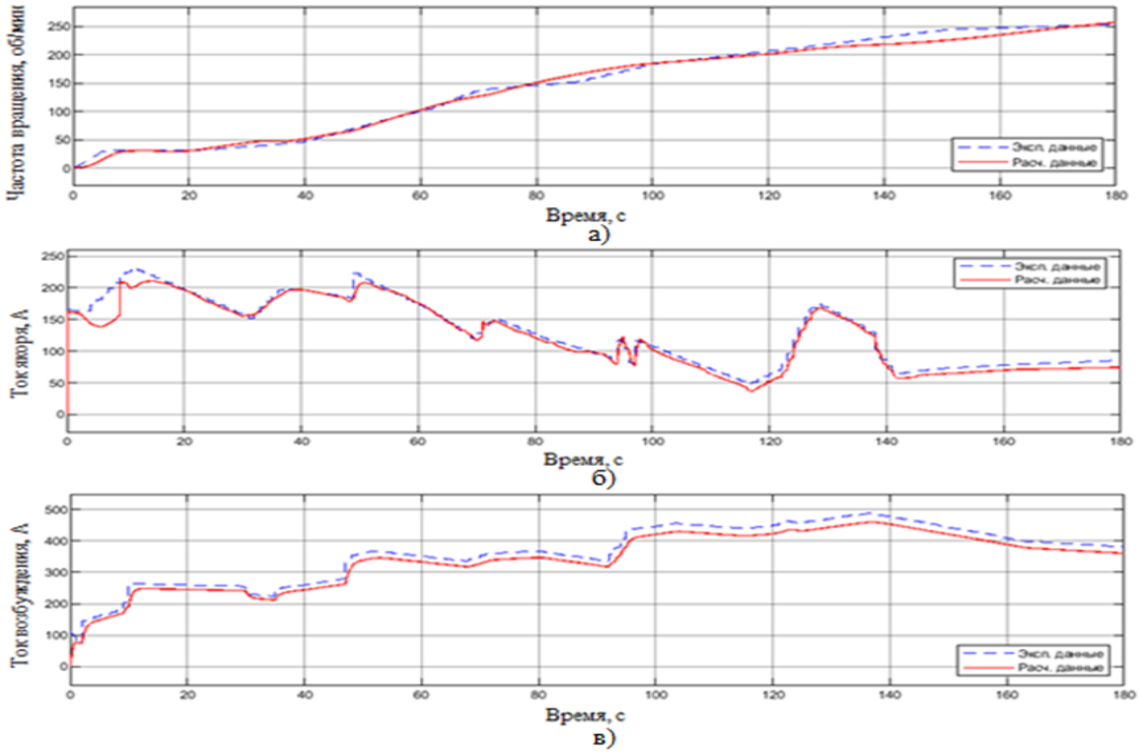


Рисунок 9 – Результаты компьютерного моделирования и экспериментальных данных

Валидация разработанной модели электрической части электровоза 2ЭС6

Разработанная компьютерная модель электрической части электровоза 2ЭС6 позволяет моделировать возможные неисправности и различные состояния электрического оборудования, может использоваться для создания моделей прогнозирования параметров и сценариев развития ситуаций на основе методов машинного обучения и нейронных сетей, а также для проведения виртуальных испытаний по технологии цифровой двойник. Полученные данные могут использоваться для определения оптимальных режимов работы электровоза при различных эксплуатационных воздействиях.

Применение цифрового двойника позволит повысить надежность и энергоэффективность магистрального грузового электровоза в условиях малолюдных или беспилотных технологий.

Список использованных источников

1. Распоряжение ОАО «РЖД» от 19.08.2024 N 2009/р «Об утверждении паспорта Комплексной программы инновационного развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года». – URL: https://company.rzd.ru/ru/9990/page/103290? (Дата обращения 17.03.2025).

2. Лакин И. К., Семенов А. П. Использование технологии «цифровой двойник» при управлении ремонтом локомотивов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование, 2019. № 3(63). С. 89–98.

3. Ададуров А. С., Федорова В. И., Бойко А. М. Общее принципы построения предиктивной системы диагностики нового электропоезда ЭС2Г «Ласточка» и первые экспериментальные данные // Национальная Ассоциация Ученых, 2022. № 75-2. С. 14–22

4. Ададуров А. С., Федорова В. И., Перевязкин А. А. Аппаратно-программный комплекс прескриптивной системы диагностики для электропоезда «Ласточка» // Автоматика, связь, информатика, 2023. № 2. С. 16–19.

5. E. Bernal, Q. Wu, M. Spiryagin and C. Cole, Augmented digital twin for railway sys-tems, in Vehicle System Dynamics, (2023).

6. N. Bosso, Application of machine learning techniques to build digital twins for long train dynamics simulations. / Magelli, M., Trinchero, R., Zampieri, N. // Vehicle System Dynamics. 2023. Vol. 62(1). PP. 21-40.

7. De Donato, L. Towards AI-assisted digital twins for smart railways: preliminary guideline and reference architecture / Dirnfeld, R., Somma, A. [et al] // Journal of Reliable Intelligent Environments. 2023. Vol. 9. PP. 303-317.

8. Будаев А. А., Третьяков Е. А. Моделирование электрической части грузового электровоза на основе технологии «Цифровой двойник» // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2025. №. 1. С. 92-101.

9. Разработка системы автоматизированного предотвращения и устранения неисправностей магистрального электровоза в пути следования / Е. А. Третьяков, А. П. Шиляков, И. Н. Денисов [и др.] // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов : Материалы VIII всероссийской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 300-летию Российской академии наук и 100-летию со дня рождения профессора Александра Сергеевича Лисовского, Омск, 14–15 ноября 2024 года. – Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2024. С. 20-27.

10. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink : практическое руководство / И. В. Черных ; под ред. Д. А. Мовчак. – Москва : ДМК Пресс ; СПб.: Питер, 2008. 288 с.: ил.

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

Кафедра «Электроподвижной состав» (ЭПС)

Будаев Артём Анатольевич: аспирант кафедры

Третьяков Евгений Александрович: д.т.н., доцент, профессор кафедры

Раздобаров Алексей Васильевич: старший преподаватель.

УДК 621.43:629.3 ГРНТИ 73.29.41

С. М. Васильев, А. В. Нагибина

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АКТИВНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ НА РЕФРИЖЕРАТОРНОМ ПОДВИЖНОМ СОСТАВЕ

Аннотация: *существующий рефрижераторный подвижной состав не претерпел существенных изменений в части теплоизоляционной защиты от внешних теплопритоков. Применение теплоизоляции на новых физических принципах позволит существенно снизить потребную холодопроизводительность, а также потребляемые энергетические ресурсы, что в свою очередь позволит значительно уменьшить затраты на перевозку скоропортящихся грузов при сохранении заданных условий перевозки и улучшить сохранность груза.*

Ключевые слова: *теплоизоляция, рефрижераторный подвижной состав, теплопритоки, холодопроизводительность, хладотранспорт.*

Перевозка скоропортящихся грузов по железной дороге имеет давнюю историю и не теряет своей актуальности. Однако подвижной состав времен СССР уже исчерпал технический ресурс, а выпускаемый в странах СНГ железнодорожные изотермические вагоны не имеют значительных технических совершенствований. Применение новых подходов к разработке рефрижераторного подвижного состава позволят улучшить сохранность груза и снизит эксплуатационные затраты.

Современный автономный рефрижераторный вагон представляет собой кузов, в котором в центральной части расположено грузовое отделение, с установленной теплоизоляцией и с двумя машинными отделениями в торцах вагона. Грузовое помещение вагона охлаждается и отапливается двумя холодильно-отопительными установками. В каждом из машинных отделений находятся компрессорно-конденсаторный агрегат и дизель-генератор. Отдельно остановимся на теплоизоляции и работе системы вентиляции.

Теплоизоляционным материалом в конструкциях кузова служит полистирол, которым начиная с 1965 г., изолировались все вагоны-рефрижераторы. Толщина теплоизоляции в стенах и дверях 200 мм, в крыше – от 200 до 250 мм и в полу 140 мм.

При работе вентиляторов (особенно при включении вентиляторов обеих установок) между крышей вагона и ложным потолком создается несколько повышенное давление, благодаря которому воздух проходит в грузовое помещение через щели в ложном потолке, расположенные поперек него и между ложным потолком и стенами грузового помещения вагона. Поступивший в грузовое помещение воздух омывает груз, отдавая или воспринимая тепло, и проходит под напольные решетки, откуда по каналам, образуемым торцовыми стенами грузового помещения и установленными перед ними двухстворчатыми щитами 1, вновь засасывается вентиляторами и поступает на испарители холодильных установок или электропечи для охлаждения или обогрева [1]. Схема распределения холодного и теплого воздуха в грузовом помещении автономного рефрижераторного вагона показана на рисунке 1.

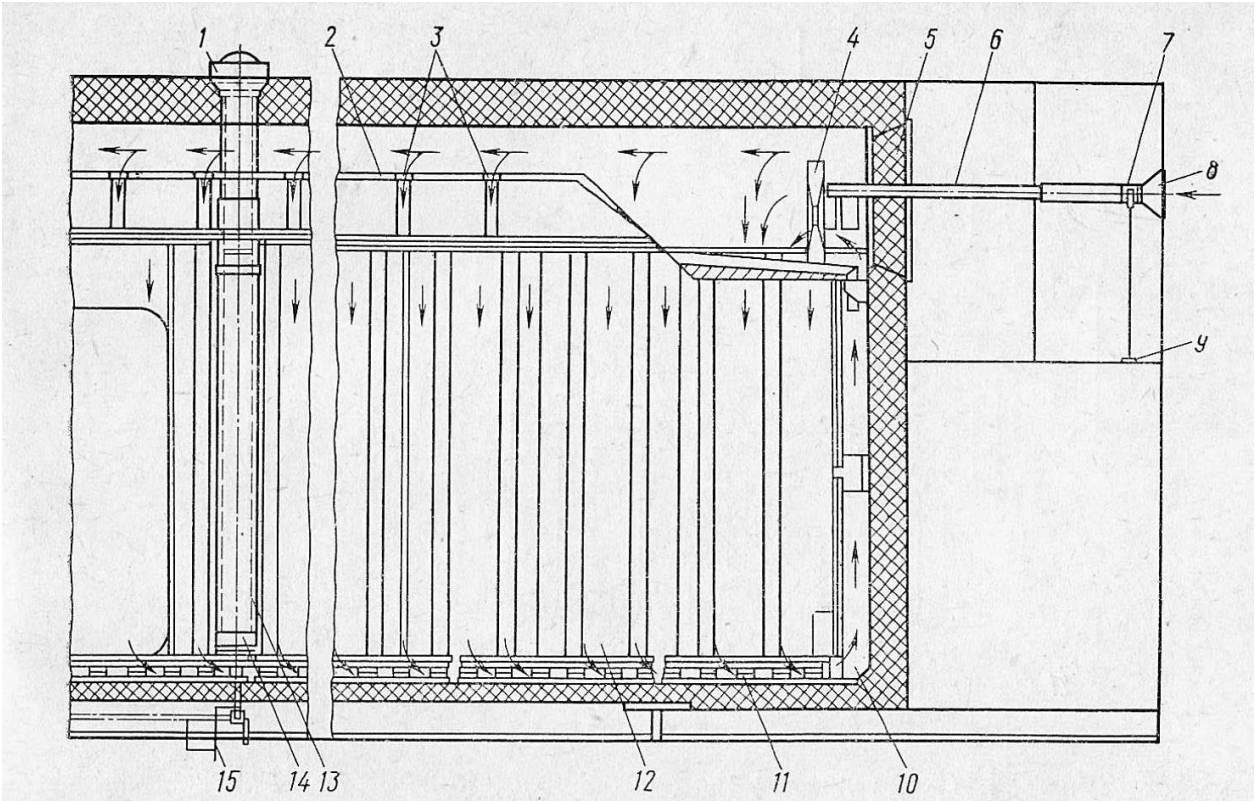


Рисунок 1 – Схема распределения холодного и теплого воздуха и вентиляции автономного рефрижераторного вагона:

1 – дефлектор; 2 – ложный потолок; 3 – щели в ложном потолке; 4 – вентилятор воздухоохладителя; 5 – отверстие, закрытое перегородкой; 6 – канал для прохода свежего воздуха; 7 – заслонка; 8 – отверстие в торцовой стене вагона; 9 – рукоятка заслонки; 10 – канал для прохода воздуха; 11 – напольная решетка; 12 – гофрированная обшивка стен; 13 – канал дефлектора; 14 – заслонка; 15 – рукоятка заслонки

Такая система имеет ряд недостатки:

- в случае выхода из строя вентиляторов испарителя, либо нарушения воздухообмена внутри холодильной камеры по другой причине нарушится температурный режим перевозки продуктов и как следствие возможна порча груза;
- циркулируемый внутри вагона воздух имеет низкую влажность и приводит к значительной усушке (потере веса) перевозимых продуктов, а иногда и к потере товарного вида.

Устранение вышеперечисленных недостатков возможно с применением охлаждения рассольного типа, циркулирующего внутри боковых, торцевых стен и пространства над потолком грузового помещения. Использование такой схемы охлаждения предотвращает воздействие теплопритоков через стены на перевозимый скоропортящийся груз, предотвращаются температурные перепады в грузовом помещении. Отпадает необходимость интенсивной вентиляции груза воздухом, имеющим низкую влажность, что в свою очередь снижает потери груза на усушку.

В летний период в дневное время крыша и боковые станы подвергаются интенсивному облучению солнечной радиацией и как следствие возникает чрезмерный нагрев поверхности этих элементов. Торцевые стены грузового помещения

непосредственно примыкают к машинным отделениям, в которых от работы компрессорно-конденсаторного агрегата и дизель генератора также значительно повышается температура воздуха и создает дополнительный теплоприток внутрь грузового помещения вагона. Для снижения вышеуказанных теплопритоков предлагается установить систему активного поглощения тепла, наружной поверхности грузового помещения. На внутреннюю сторону внешней металлической обшивки вагона предлагается установить трубки с циркулирующей жидкостью, которая будет отводить тепло от поверхности, а затем охлаждаться в радиаторе, расположенном под вагоном, где отсутствует тепловое воздействие солнечной радиации.

Сравнительные теплотехнические расчеты стандартного автономного рефрижераторного вагона в сравнении с вагоном с активной теплоизоляцией производились по формуле 1.

Теплопритоки, возникающие из-за разницы температур воздуха снаружи и внутри вагона, определяются по формуле:

$$Q_0 = k \cdot F_H \cdot \Delta t, \qquad (1)$$

где k_i – коэффициент теплопередачи соответствующего ограждения вагона, Вт/м^2·К;

$F_н$ – площадь наружной поверхности ограждения вагона, м^2;

Δt – разность температур, °С [2].

Коэффициент теплопередачи определяется по формуле 2 для каждого элемента ограждения вагона, с учетом толщины и теплопроводности каждого слоя как показано на рисунке 2.

$$k_i = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_н} + \sum_{j=1}^{m} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_в}}, \qquad (2)$$

где δ_i – толщина отдельного однородного слоя составляющих ограждающую конструкцию, м;

λ_i – коэффициенты теплопередачи j-го слоя конструкции ограждения вагона, Вт/(м·К);

$\alpha_н, \alpha_в$ – коэффициенты теплоотдачи, из внешней среды к наружной поверхности вагона и от внутренней поверхности ограждения кузова к воздуху внутри вагона, для стен принимают $\alpha_в = 10{,}0$, крыши кузова вагона $\alpha_в = 9{,}0$, для пола $\alpha_в = 6{,}0$ Вт/(м^2·К).

Площадь наружной поверхности ограждения вагона также определяется для каждого элемента ограждения отдельно.

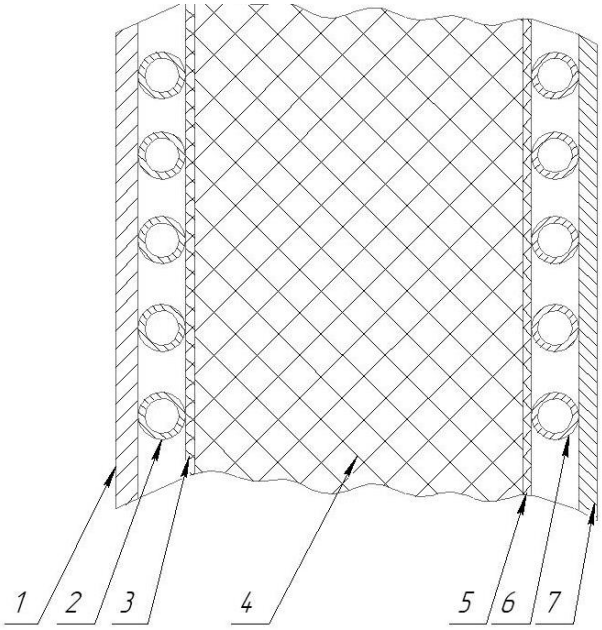


Рисунок 2 – Схема предлагаемого теплоизоляционного ограждения вагона

1 - сталь, $\lambda_1 = 35\ \frac{\text{Вт}}{(\text{м}\cdot\text{К})};\ \delta_1 = 3\cdot 10^{-3}$м; 2 - контур наружного охлаждения; 3,5 - битум, $\lambda_2 = 0{,}18\ \frac{\text{Вт}}{(\text{м}\cdot\text{К})};\ \delta_2 = 3\cdot 10^{-3}$м; 4 - теплоизоляция (PIR-плита), $\lambda_3 = = 0{,}021\ \frac{\text{Вт}}{(\text{м}\cdot\text{К})};\ \delta_3 = 0{,}15$ м; 6 - контур внутреннего охлаждения; 7 - алюминий, $\lambda_4 = = 203{,}5\ \frac{\text{Вт}}{(\text{м}\cdot\text{К})};\ \delta_4 = 2\cdot 10^{-3}$м

Разность температур определяется по формуле 3.

$$\Delta t = t_{\text{н}} - t_{\text{в}}, \qquad (3)$$

где $t_{\text{н}}$ – температура окружающей среды, °С;

$t_{\text{в}}$ – температура внутри грузового помещения вагона, °С.

Из опыта эксплуатации рефрижераторного подвижного состава в летний период известно, что при интенсивном солнечном облучении у вагона значительнее всего нагревается крыша и одна из боковых стен, температура поверхности поднимается до 60ºС. Одновременная работа двух холодильных установок в таких условиях не позволяет справится с возникающими теплопритоками.

Применение активной теплоизоляция с отводом тепла от нагревающихся поверхностей вагона позволяет значительно снизить теплопритоки, поступающие в вагон, что подтверждается результатами расчетов, приведенными в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчетов теплопритоков, проходящих в вагон через ограждение с применением современного теплоизоляционного материала

Элемент ограждения:	Теплопритоки стандартного вагона, Вт	Теплопритоки вагона с активной теплоизоляцией, Вт
- крыши	781,9	531,3
- торцевой стены	97,9	66,6
- боковой стены	527,4	358,4
- пола	385,6	385,6
Суммарные теплопритоки	2418,1	1766,9

Сравнительные расчеты показывают, что при использовании активной теплоизоляции суммарные теплопритоки снижаются на 30%.

Потребная холодопроизводительность холодильной машины согласно формуле 4 и прямо пропорциональна суммарным теплопритокам.

$$Q_{\text{о}}^{\text{брутто}} = \beta Q_0, \tag{4}$$

где β – коэффициент перевода, следует принимать 1,1 – 1,2 [3].

Перевод полученной рабочей холодопроизводительности в стандартную производится по формуле 5.

$$Q_{0\ \text{станд}} = \frac{Q_{\text{о}} q_{vc} \lambda_{\text{с}}}{q_v \lambda_{\text{р}}}, \tag{5}$$

где q_{vc} – теоретическая объёмная холодопроизводительность хладагента в стандартных условиях;

$\lambda_{\text{с}}, \lambda_{\text{р}}$ – коэффициенты подачи компрессора в стандартных и рабочих условиях [2].

По рассчитанной холодопроизводительности в стандартных условиях (по справочникам) подбирается необходимое холодильное оборудование.

Очевидно, что снижение суммарных теплопритоков с применением активной теплоизоляции существенно влияет на холодопроизводительность и на мощность потребного холодильного оборудования.

Список использованных источников

1. **Яковлев, И. Н**. Изотермический подвижной состав [Текст] : [учебник для техникумов ж.-д. транспорта] / И. Н. Яковлев, М. М. Шаповаленко. - 3-е изд., перераб. и доп. - Москва : Транспорт, 1977. - 230 с.
2. **Чернин И.Л.** Расчёт, подбор и эксплуатация холодильного оборудования рефрижераторного подвижного состава: Учебное пособие .Ч.1.-Гомель: БелИИЖТ,1984.-44 с.
3. **Вальт Э.Б., Красниченко А.А.** Конструкция, расчет и эксплуатация холодильного оборудования вагонов : метод. указания к выполнению курсового проекта.– Екатеринбург: УрГУПС, 2009. – 48 с.

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

Кафедра «Вагоны».

Васильев Степан Михайлович: к.т.н., доцент, проректор по идеологической и воспитательной работе.

Нагибина А. В.: инженер.

УДК 629.423.1

Т. В. Волчек, В. С. Томилов

ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ И ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ БДИТЕЛЬНОСТИ МАШИНИСТОВ ЛОКОМОТИВОВ

Аннотация. *В статье рассмотрены существующие отечественные и зарубежные системы контроля за бдительностью машинистов локомотива, выявлены их достоинства и недостатки. Представлена новая система диагностики здоровья и контроля бдительности машинистов локомотива на основе электронных датчиков, позволяющих контролировать физиологические показатели человека, на основании которых определены условия потери работоспособности. Разработан лабораторный образец предлагаемого технического решения.*

Ключевые слова: *безопасность, локомотив, машинист, контроль за бдительностью*

Одним из основных видов транспорта в России является железнодорожный транспорт, который обеспечивает более 60 % грузов и 40 % пассажиропотока страны. От качества работы машиниста локомотива напрямую зависит эффективность перевозок. В связи с тем, что в пути следования на локомотивную бригаду воздействует огромное количество негативных факторов, на железнодорожном транспорте применяются устройства безопасности, которые обеспечивают контроль за бдительностью машиниста.

После случившейся катастрофы на станции Користовка Одесской дороги в 1986 году, когда столкнулись два электровоза ЧС4 с пассажирскими поездами по причине засыпания помощника машиниста, которому машинист передал управление локомотивом, принято решение применять устройство контроля бдительности машиниста (УКБМ). Данный прибор разработан на основе устройства бдительности, разработанного машинистом-радиолюбителем Рема Лобовкиным. Контроль бодрствования машиниста проверялся за счет реагирования на световой сигнал, срабатывающий через определённые промежутки времени. Интервалы между проверками были следующими: при желтом, желто-красном, красном и одновременно горящим белом и желто-красным огнями локомотивного светофора 20 – 30 секунд; при белом огне –70-90 секунд; при зеленом – 90 – 120 секунд [1].

Подтверждает машинист своё бодрствование с помощью нажатия на рукоятку бдительности (РБ). В случае не подтверждения, происходит экстренное торможение. Недостатком данного устройство является то, что через мерные проверки бдительности машиниста отвлекали его от прямых обязанностей, что оказывало психологическое давление.

На маневровых тепловозах при управлении в одно лицо более 25 лет применялась система Р1117Ин, по-другому ее называют «педаль мёртвого машиниста» [2]. Принцип действия данной системы заключался в следующем: машинисту во время эксплуатации локомотива необходимо постоянно нажимать на педаль, установленную в кабине

управления и удерживать ее в зажатом положении. При проверке работоспособности в кабине издавался звуковой сигнал, машинисту необходимо на несколько секунд отпустить педаль и зажать ее снова. Данное устройство имеет такие недостатки, как:

– необходимость в течение долгого времени оставаться в одном положении, что вызывает дополнительную нагрузку на машиниста;

– вероятность необоснованного срабатывания автостопного торможения из-за несовершенства конструкции.

За рубежом устройства контроля работоспособности машиниста появились чуть раньше, еще в 30-е годы 20 века на американских локомотивах в кабине размещался специальный рычаг, который при эксплуатации машинист должен был сжимать рукой. При отпускании рычага срабатывала сирена. В связи с неудобствами в процессе эксплуатации данным устройством были крайне недовольны, поэтому его заменили на более совершенные аналоги, имеющие абсолютно другой принцип работы [3].

Например, в настоящее время в Британии используется AWS (автоматическая система оповещения). Принцип работы данного устройства следующий, перед каждым светофором или предупреждающем знаке на расстоянии примерно 180 метров установлен магнит, при проезде которого в кабине машиниста образуется звуковой сигнал, в следствии чего машинисту необходимо в течении 2-3 секунд ответить нажатием кнопки подтверждения, если этого не сделать произойдет экстренное торможение.

Также в Британии применяется система DSD, которая через определенные интервалы времени (60 секунд) проверяет бдительность машиниста. Для подтверждения работоспособности ему необходимо нажать на педаль и ее отпустить, если этого не сделать, произойдет экстренное торможение.

Во Франции и Бельгии используется система контроля работоспособности машиниста «Крокодил», принцип работы которой аналогичен AWS.

В связи с имеющимися недостатками применяемых систем контроля бдительности машинистов в 1994 году компанией ЗАО «НЕЙРОКОМ» разработана телемеханическая система контроля бодрствования машиниста (ТСКБМ), которая эксплуатируется по настоящее время. Работа данной системы основана на измерении кожно-гальванической реакции (КГР) человека за счет браслета, который одет на запястье руки [2-5, 7, 8].

Алгоритм работы ТСКБМ следующий: при условии, когда интервалы КГР станут больше 60 секунд, загорается предварительная сигнализация, тогда машинисту необходимо подтвердить свою работоспособность за 8 секунд нажатием на РБ. В противном случае загорается индикатор красного цвета и раздается свисток ЭПК, дается 5 секунд на подтверждение своей работоспособности, если этого не произошло, происходит экстренное торможение локомотива [5].

Данная система имеет множество недостатков, таких как:

– физиологические показатели людей индивидуальны, поэтому зачастую у части машинистов, которые находятся в работоспособном (не дремотном) состоянии происходят внезапные необоснованные проверки бодрствования, которые отвлекают работника;

– при высоких температурах в кабине машиниста локомотива, особенно в летний период, меняется проводимость между контактами браслета ТСКБМ, в следствии образования потоотделения;
– возможность обходить машинистом электровоза ношение браслета [5, 6].

Также существует система контроля бодрствования машиниста «Штурман», которая предназначена для контроля физического состояния машинистов, еще с 2012 года она проходила опытные испытания в Санкт-Петербуржском метрополитене. Работа данной системы основана на измерении пульса, давления и других показателей человека с помощью специальной гарнитуры, которая одевается на ушную раковину, далее вся информация передается на терминал оперативного мониторинга депо через бортовой компьютер и антенный блок. При возникновении сонливости у машиниста, в кабине раздается звуковой сигнал, а также по радиосвязи оператор дает ему предупреждение. Данная система с 2015 года принята в эксплуатацию и применяется в метрополитене [4].

Недостатком данной системы является то, что для каждого машиниста необходимо индивидуально разрабатывать гарнитуру для ушной раковины. При обнаружении потери бдительности машиниста, данная система не воздействует на тормозную систему локомотива, а только выносится предупреждение оператором, если же человек не подтвердил свою работоспособность, машинист заменяется, что не всегда возможно в грузовом и пассажирском движении дальнего следования.

В настоящее время с помощью развития электронных и цифровых компонентов существует множество параметров, по которым возможно определить уровень бодрствования человека. И уже сегодня некоторые технологии успешно применяются в автомобильном транспорте [7, 8].

Уровень бодрствования человека, кроме как за счет измерения кожно-гальванической реакции кожи, возможно определить: измерением пульса [8]; наблюдением за открытыми глазами, веками и морганием [6]; наблюдением за динамикой движения человека.

Проанализировав все существующие способы определения бодрствования человека, выявив их достоинства и недостатки разработана система диагностики здоровья и контроля бдительности машинистов на основе определения двух параметров: частоты сердечного ритма (ЧСР) и движения рукой. На рисунке 1 представлена функциональная схема предлагаемой системы.

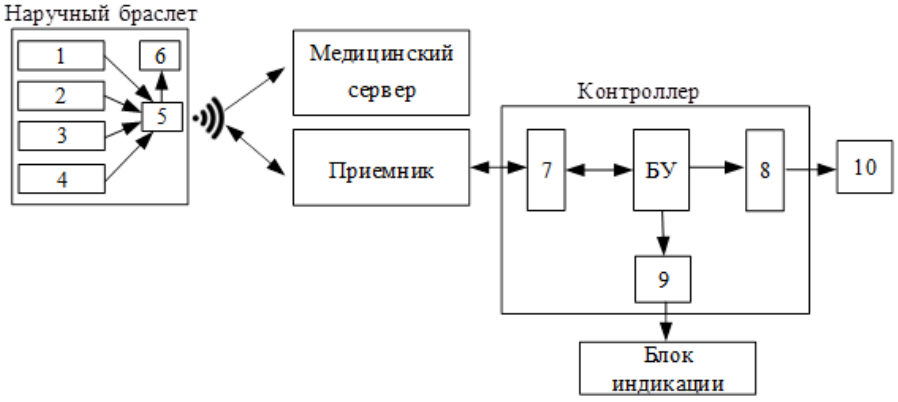


Рисунок 1 – Функциональная схема работы предлагаемой системы

Предлагаемая система включает в себя наручный браслет, оснащенный гироскопом 1, акселерометром 2, пульсометром 3, датчиком температуры 4 и передатчиком 5, который передает данные о пульсе и температуре тела на медицинский сервер предрейсового осмотра локомотивных бригад и приемник, установленный в кабине машиниста, а также вибродатчиком 6, воздействующим на машиниста при потере бдительности. Приемник системы принимает радиосигналы с наручного браслета и передает их на блок управления контроллера через интерфейс 7 для обработки сигналов и определения уровня бодрствования. При обнаружении БУ условия потери бдительности машиниста подается сигнал на блок 8, который преобразует цифровой сигнал в напряжение, необходимое для управления тормозами локомотива за счет его подключения к необходимым цепям управления локомотива с помощью выходных клемм 10. Кроме того, БУ через интерфейс 9 передаёт сигналы на индикаторную панель, которая при потере бдительности машиниста активирует световые индикаторы на панели управления локомотивом и издаёт звуковой сигнал в кабине.

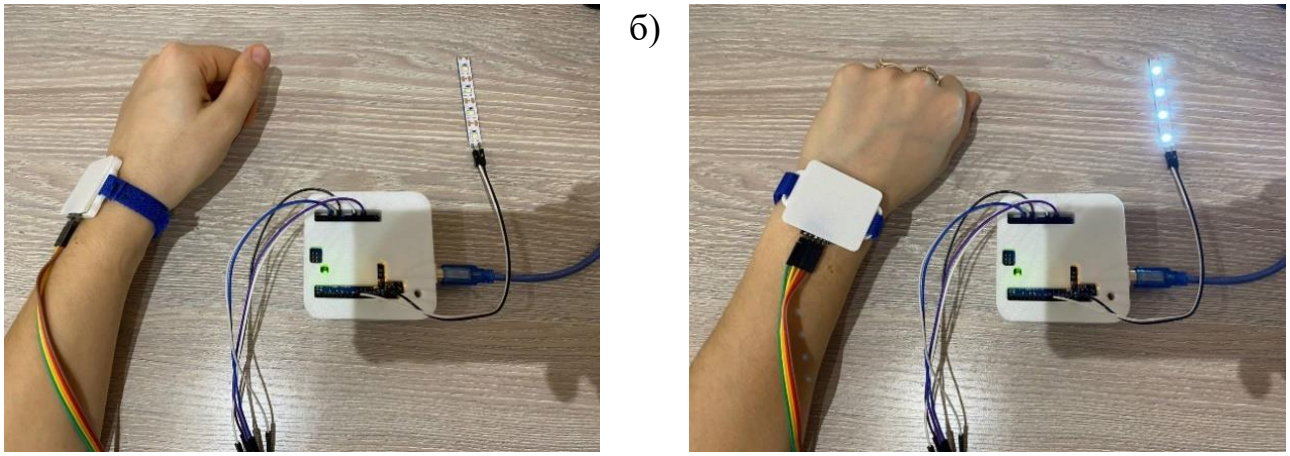
Таким образом, условие бодрствования следующее:

– уровень бодрствования = 100 %, если ЧСР1 - ЧСР2 < 15 уд/мин и Dt × N > 0, где ЧСР1 – частота сердечного ритма в настоящее время; ЧСР2 – частота сердечного ритма 5 минут назад; Dt – временной интервал равный 30 секундам; N – количество движений рукой;

– уровень бодрствования = 0 %, если ЧСР1 - ЧСР2 ≥ 15 уд/мин и Dt × N = 0.

Для подтверждения предлагаемого технического решения разработан лабораторный образец предлагаемой системы контроля бдительности водителя и испытан в лабораторных условиях (имитированы условия потери бдительности за счет физической активности и резкого ее прекращения). На рисунке 2а представлена разработанная лабораторная система контроля бдительности при условии, когда человек бодр световой сигнал отсутствует. Когда в течение 30 секунд отсутствует движение рукой и наблюдается резкое снижение частоты сердечного ритма с блока управления подается управляющий сигнал на световую индикацию, рисунок 2. Тот же самый управляющий сигнал планируется подавать для управления тормозами транспортного средства.

а) б)



а) условие бодрствования выполняется; б) потеря бдительности

Рисунок 2 – Лабораторная система контроля бдительности машиниста

За счет того, что уровень бодрствования определяется сразу по двум параметрам, то предлагаемая система позволит снизить психологическое давление на машинистов, так как ложные срабатывания существующей системы контроля бдительности ТСКБМ исключатся.

Так как с носимой части измеренные физиологические параметры (пульс и температура тела) будут передаваться на медецинский сервер пункта предрейсового осмотра машинистов, то возможно сократится время на осмотр локомотивных бригад перед поездкой, а также появится возможность выявить сердечно-сосудистые заболевания машинистов на ранних стадиях за счет регулярного мониторинга пульса.

Список использованной литературы

1. Андрончев, И.К. Анализ адаптированности широко распространенных и новых локомотивных приборов безопасности (АЛСН, УКБМ, л-116, л-116у, ТСКБМ, МАЛС, СПОМ) к маневровой работе на железнодорожных путях общего и необщего // Вестник транспорта Поволжья. – 2015. – № 4(52). – С. 18-21. ISSN: 1997-0722
2. Жму педаль, следовательно, - существую! // Гудок URL: https://gudok.ru/zdr/174/?ID=1377211 (дата обращения: 13.02.25).
3. Понамарев, Н. В. Автоматизированная система контроля функционального состояния водителя транспортного средства // Транспорт Российской Федерации. – 2010. – № 2(27). – С. 22-23.
4. Интеллектуальная система контроля бдительности и действий машиниста / А. А. Володин, А. Н. Сычугов, Д. И. Урасинов [и др.] // Бюллетень результатов научных исследований. – 2024. – № 2. – С. 86-99. – DOI 10.20295/2223-9987-2024-02-86-99.
5. Волчек, Т. В. Разработка системы диагностики здоровья и контроля бдительности машиниста локомотива // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 4(88). – С. 209-216. DOI 10.46973/0201–727X_2022_4_209
6. Чуйко, А.Д. Совершенствование системы ТСКБМ для электровозов переменного тока // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2019. – Т. 2. – С. 240-242.
7. Рейн, А.Р., Басков, В. Н. Анализ показателей, характеризующих состояние водителя // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2015. – Т. 35. – С. 176–180. – URL: http://e-koncept.ru/2015/95591.htm.
8. Алпатов, А.В. Система поддержки водителя на основе анализа пульса и параметров движения транспортного средства // Медицинская техника. – 2015. – № 2(290). – С. 29-34.

КрИЖТ ИрГУПС, г. Красноярск

Томилов Вячеслав Станиславович:
к.т.н., доцент кафедры «Эксплуатация ж.д.».

Волчек Татьяна Витальевна:
к.т.н., доцент кафедры «Эксплуатация ж.д.».

УДК 629.423.1

Т. В. Волчек, В. С. Томилов

АНАЛИЗ СПОСОБОВ КОНТРОЛЯ КОММУТАЦИИ КОЛЛЕКТОРНЫХ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВОЗОВ

Аннотация. *В статье рассмотрена статистика отказов тяговых электродвигателей электровозов серии «Ермак», установлены основные причины выхода из строя проблемных элементов. Рассмотрены способы контроля коммутации в процессе эксплуатации, предлагаемые учеными и специалистами, выявлены их недостатки. Одним из современных методов контроля искрения тягового электродвигателя (ТЭД) является превентивный мониторинг на базе искусственного интеллекта, который также позволит выявить остаточный ресурс ТЭД.*

Ключевые слова: *тяговый электродвигатель, коммутация, степень искрения, машинное обучение, отказ*

Развитие Восточного полигона является приоритетной задачей для ОАО «РЖД», поскольку эта транспортная артерия играет определяющую роль в организации грузовых перевозок по России, обеспечивая связь между европейской частью страны и Дальним Востоком [1].

В 2023 году полигон обеспечил перевозку 173 млн тонн грузов. К 2030 году планируется увеличить этот показатель до 210 млн тонн, а к 2035 году – до 270 млн тонн, что означает рост более чем на 30 %. Для достижения таких результатов требуется масштабная модернизация: обновление локомотивного парка, совершенствование инфраструктуры и оптимизация технологических процессов с внедрением современных методов ремонта и управления подвижным составом.

В настоящее время по полигону эксплуатируются тяжеловесные составы массой 7100 тонн, во главе электровозов серии 3ЭС5К «Ермак». Также используются сдвоенные поезда весом 14200 тонн. К 2030 году планируется увеличение массы до 8000-8800 тонн.

Однако рост массы поездов создает дополнительную нагрузку на оборудование электровозов, что может привести к их преждевременному износу и необходимости неплановых ремонтов, которые неблагоприятно воздействуют на перевозочный процесс.

Статистика отказов электровозов переменного тока серии «Ермак» за 2023 год, приписки Красноярской дирекции тяги, показывает, что одним из наиболее проблемных узлов является тяговый электродвигатель, из всего силового оборудования около 50 % отказов приходится именно на него. За 2023 год произошло 270 отказов ТЭД в 1152 секциях электровозов серии «Ермак». На рисунке 1 представлены отказы элементов ТЭД за 2023 год. Наибольшее число отказов приходится на коллекторно-щеточный аппарат [2]. Основными причинами отказов узлов являются: круговой огонь и пробой изоляции. Согласно статистическим данным по отказам технических средств за период с сентября по декабрь 2024 года около 10 % отказов с дальнейшим заходом локомотива на неплановый ремонт произошло по причине выхода из строя тягового электрического двигателя, при этом отношение простоя локомотива на неплановых ремонтах по причине

отказа ТЭД (относительно общего простоя на неплановых ремонтах) занимает «лидирующие» позиции и достигает 23 %. Например, на Красноярской железной дороге в феврале месяце 2025 года из-за неисправности тягового электродвигателя при эксплуатации произошла задержка 8 поездов, был заказан вспомогательный локомотив, что привело к потерям 9,83 поездо-часов.

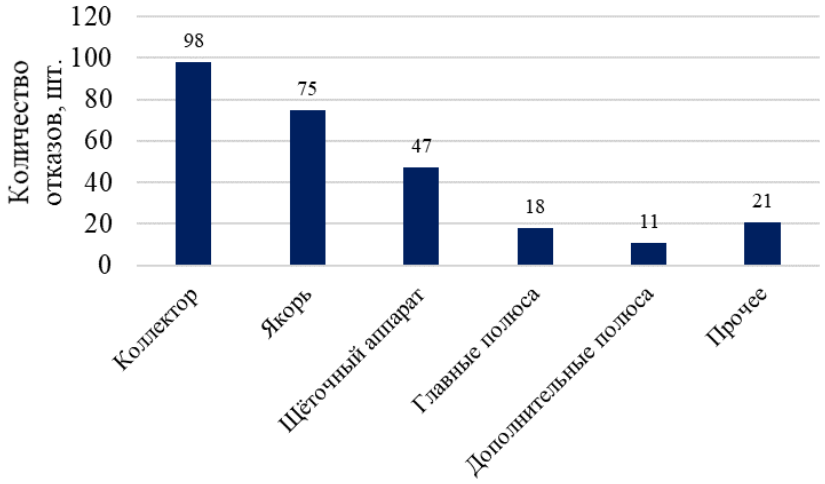
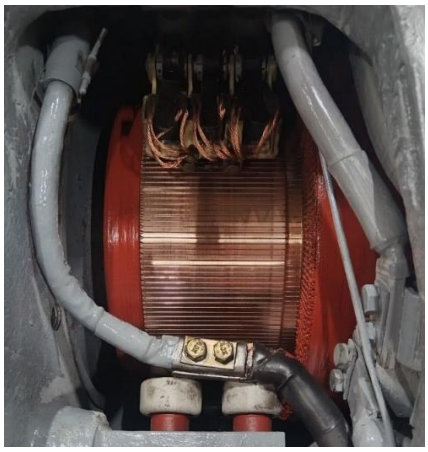


Рисунок 1 – Отказы элементов ТЭД за 2023 год

На рисунке 2 представлены последствия возникающего искрения коллектора.

а)

б) 

а) последствия искрения; б) новый коллектор после капитального ремонта

Рисунок 2 – Коллекторно-щеточный аппарат ТЭД

Согласно ГОСТ 183-74 качество коммутации оценивается по пятибалльной системе. Как правило при степенях искрения:

- 1, 1 ¼ отсутствуют почернения на коллекторе;

- 1 ½ появляются следы почернения на коллекторе, но легко устраняются протиранием бензином;

- 2 появляются следы почернения коллектора, нагара на щетках, которые не устраняются протиранием;

- 3, частично разрушение щеток, значительное почернение коллектора, что в последствии приводит к их замене.

Как правило, искрение щеток обусловлено неудовлетворительным протеканием процесса коммутации, на который огромное влияние оказывает величина небалансной

ЭДС ($\Delta e_р$), зависящая от величины реактивной ($e_р$), коммутирующей ($e_к$) и трансформаторной ЭДС ($e_к$) [2-4].

Несмотря на то, что при конструкционных испытаниях ТЭД добавочные полюса хорошо рассчитаны и отлажены, небалансная ЭДС в коммутируемых секциях все же возникает. Вызвано это тем, что индуктивность в коммутационной зоне, а следовательно, и коммутирующая ЭДС распределены по плавной кривой, а реактивная ЭДС – по ступенчатой. Этот дисбаланс тем больше, чем с большим током работает ТЭД.

В связи с этим ученые и специалисты разрабатывали различные способы контроля коммутации ТЭД во время эксплуатации, для повышения их надежности [5, 6].

Одним из таких способов является разработанное устройство, позволяющее во время эксплуатации локомотива определять степень искрения и характер коммутации ТЭД (замедленная или ускоренная) [5]. При возникновении искрения при ускоренной коммутации, блок управления обеспечивает включение отпитки дополнительных полюсов, если же обнаружена замедленная коммутация, то с помощью фазочувствительного устройства управления включается подпитка обмотки дополнительных полюсов.

Недостатками данного устройства является то, что:

- возникновении при механических причинах нарушения коммутации (биение коллектора, неправильная притирка щеток, загрязнение коллектора), при возникновении вихревых токов, при наличии пульсации тока главных полюсов причину искрения невозможно решить подпиткой дополнительных полюсов. Также в условиях переходных процессов предлагаемая система может не успеть оперативно подстроиться под меняющиеся условия;

- при возникновении искрения, информация не передается машинисту локомотива для оперативного изменения режима работы ТЭД;

- не ведется запись случаев возникновении искрения ТЭД в пути следования, что не позволяет определить фактическое состояние ТЭД.

Еще одним способом контроля коммутации являются датчики поперечного тока разрезной щетки, которые предлагается установить на щеткодержатель всех ТЭД для осуществления мониторинга искрения на каждом электродвигателе электровоза в процессе его эксплуатации в реальных условиях работы [6]. Далее информация с установленных датчиков передается на аналого-цифровой преобразователь, затем на ПЭВМ, на котором определяется балльность искрения.

Недостатками данного устройства является:

- отсутствие прямой связи с машинистом для своевременной корректировки режима работы ТЭД;

- устройство не прогнозирует техническое состояние оборудования.

В настоящее время отсутствует система оперативного контроля коммутации тяговых электродвигателей, что приводит к необходимости устранения последствий ее нарушений только на этапах соответствующего ремонта (в основном – неплановых) [6].

В связи с этим актуальной задачей является разработка методов, позволяющих осуществлять превентивный мониторинг и диагностику состояния ТЭД.

Современные достижения в области машинного обучения позволяют решать подобные задачи. Машинное обучение активно внедряется в различные промышленные сферы, позволяя проводить качественный анализ данных, прогнозировать возможные сценарии развития событий и повышать точность диагностики.

Использование и интеграция современных методов искусственного интеллекта в системы управления электроподвижным составом (применение глубокого обучения (Deep Learning) и нейронных сетей для анализа данных в реальном времени, использование методов машинного обучения (Machine Learning) для прогнозирования неисправностей и оптимизации режимов работы тяговых электрических двигателей) может способствовать созданию системы раннего обнаружения искрения в ТЭД, что позволит минимизировать риски и сократить затраты на ремонтные работы.

Список использованной литературы

1. Поморцев, В. А. Оценка сдерживающих эксплуатационных факторов при развитии тяжеловесного движения на Восточном полигоне / В. А. Поморцев, А. И. Орленко, Е. М. Лыткина // Вестник транспорта Поволжья. – 2022. – № 1(91). – С. 60-65.
7. Волчек, Т. В. Анализ работы коллекторных тяговых электродвигателей электровозов переменного тока / Т. В. Волчек, Л. С. Курманова // Трансформация транспорта и образования : Труды Всероссийской научно-практической конференции КрИЖТ ИрГУПС, посвященной 130-летию транспортного образованию в Сибири, Красноярск, 17–19 октября 2024 года. – Красноярск: Иркутский государственный университет путей сообщения, 2024. – С. 394-397.
8. Возникновение трансформаторной ЭДС в секциях якоря тягового электродвигателя электровоза переменного тока в режимах полного и ослабленного поля и пути ее снижения / Т. В. Волчек, О. В. Мельниченко, А. О. Линьков, С. Г. Шрамко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 1(77). – С. 41-48.
9. Волчек, Т. В. Совершенствование методов контроля состояния коллекторного тягового электродвигателя при его эксплуатации / Т. В. Волчек, В. С. Томилов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4(96). – С. 202-208. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_202.
10. Патент на полезную модель № 121108 U1 Российская Федерация, МПК H02K 13/14. Устройство управления коммутацией тягового коллекторного электродвигателя с дополнительными полюсами : № 2012109952/07 : заявл. 14.03.2012 : опубл. 10.10.2012 / О. Л. Раппопорт, А. Б. Цукублин ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет".
11. Патент на полезную модель № 75102 U1 Российская Федерация, МПК H01R 43/14, H01R 43/00, H02K 15/00. система мониторинга искрения щеточно-коллекторных узлов тяговых электродвигателей подвижного железнодорожного состава : № 2008108229/22 : заявл. 03.03.2008 : опубл. 20.07.2008 / О. Л. Рапопорт, А. Б. Цукублин, А. А. Осадченко, Д. Е. Шибаев ; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский политехнический университет.

КрИЖТ ИрГУПС, г. Красноярск

Томилов Вячеслав Станиславович: к.т.н., доцент кафедры «Эксплуатация ж.д.».

Волчек Татьяна Витальевна: к.т.н., доцент кафедры «Эксплуатация ж.д.».

УДК 621.43:629.424.3 ГРНТИ 73.49.21

В. В. Грачев, А. В. Грищенко, Ф. Ю. Базилевский, Ю. Ю. Шумилов, Ю. С. Федоров

КОНТРОЛЬ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТОПЛИВОПОДАЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ТОПЛИВОПОДАЧЕЙ ТЕПЛОВОЗНОГО ДИЗЕЛЯ ПО ДАВЛЕНИЮ В КОЛЛЕКТОРЕ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Аннотация. *Дизели ряда выпускаемых в настоящее время тепловозов оборудуются системой электронного управления впрыском топлива ЭСУВТ разных модификаций, разработанной и изготавливаемой ООО «ППП Дизельавтоматика» (г. Саратов). Несмотря на высокий уровень надежности как электронного оборудования, так и электроуправляемых насосов высокого давления системы ЭСУВТ, в эксплуатации имеют место случаи нарушения работоспособности отдельных цилиндров. В подавляющем большинстве случаев причиной отказа является ухудшение технического состояния форсунки, тем не менее для проверки работоспособности агрегатов и локализации отказа приходится переставлять с одного цилиндра на другой (часто неоднократно) как форсунку, так и насос, что требует значительных затрат времени и может приводить к появлению отказов, связанных с нарушением технологии выполнения соответствующих операций. В статье предлагается метод контроля работоспособности топливоподающей аппаратуры по давлению в коллекторе низкого давления. Приводятся результаты экспериментальной проверки метода на стенде.*

Ключевые слова: *топливный насос высокого давления, форсунка, работоспособность, давление впрыска, преобразователь давления, коллектор низкого давления топлива.*

Постановка задачи

Широкое применение и совершенствование систем электронного управления топливоподачей является одним из основных направлений развития транспортного двигателестроения. Дизели маневрового тепловоза ТЭМ18ДМ, магистральных грузовых тепловозов 2ТЭ25КМ, 3ТЭ28 оборудуются системой электронного управления впрыском топлива ЭСУВТ разных модификаций, разработанной и изготавливаемой ООО «ППП Дизельавтоматика» (г. Саратов) [1]. Не смотря на высокий уровень надежности как электронного оборудования, так и электроуправляемых насосов высокого давления (ЭУ ТНВД) системы ЭСУВТ, в эксплуатации регулярно имеют место случаи нарушения работоспособности отдельных цилиндров. В подавляющем большинстве случаев причиной отказа является ухудшение технического состояния форсунки (ЭУ ТНВД системы ЭСУВТ работают со штатными форсунками дизеля), тем не менее для проверки работоспособности агрегатов и локализации отказа приходится переставлять с одного цилиндра на другой (часто неоднократно) как форсунку, так и насос. Замена или перестановка ЭУ ТНВД представляет собой достаточно трудоемкую и ответственную операцию, связанную с демонтажом коллекторов низкого давления и проверкой установки толкателей привода для всех заменяемых или переустанавливаемых секций насосов [1]. Следствием пренебрежения этой операцией (которое, к сожалению, допускается часто и повсеместно) может быть разрушение корпуса ЭУ ТНВД плунжером.

Таким образом, актуальной является задача разработки простого и достоверного метода контроля работоспособности топливной аппаратуры высокого давления системы ЭСУВТ без их демонтажа и разборки топливной системы.

Выбор метода решения задачи

В результате ряда экспериментов, выполненных в тепловозной лаборатории кафедры «Локомотивы и ЛХ» ФГБОУ ВО ПГУПС, авторами предлагается метод, основанный на контроле изменения давления топлива в коллекторах низкого давления.

Экспериментальная установка представляет собой дизель типа Д50, оборудованный системой электронного управления впрыском ЭСУВТ.01-02 [1] с дополнительно установленными на входе в питающий коллектор и на выходе из отсечного коллектора преобразователями давления типа МИДА-ПИ-51-0.2/6.0 МПа – М12-К [2], а также датчиком давления впрыска (ООО «Техтранс-Д»), установленным в трубку высокого давления топлива шестого цилиндра (рисунок 1). Питание датчиков осуществлялось от нестабилизированного источника питания во избежание зашумления сигнала импульсными помехами, для ввода сигналов использовался модуль ввода аналоговых сигналов USB-4716 (Advantech) [3].

Рисунок 1 – Установка преобразователей давления в топливную систему дизеля. 1 – преобразователь давления в питающем коллекторе низкого давления, 2 - преобразователь давления в отсечном коллекторе низкого давления, 3 – датчик давления впрыска шестого цилиндра

Кроме того, регистрировались выходные сигналы преобразователя частоты вращения (ПЧВ) и преобразователя фазовой отметки (ПФО) системы ЭСУВТ для привязки кривых изменения давления к положению коленчатого вала. Пример графического представления результатов измерения приведен на рисунке 2.

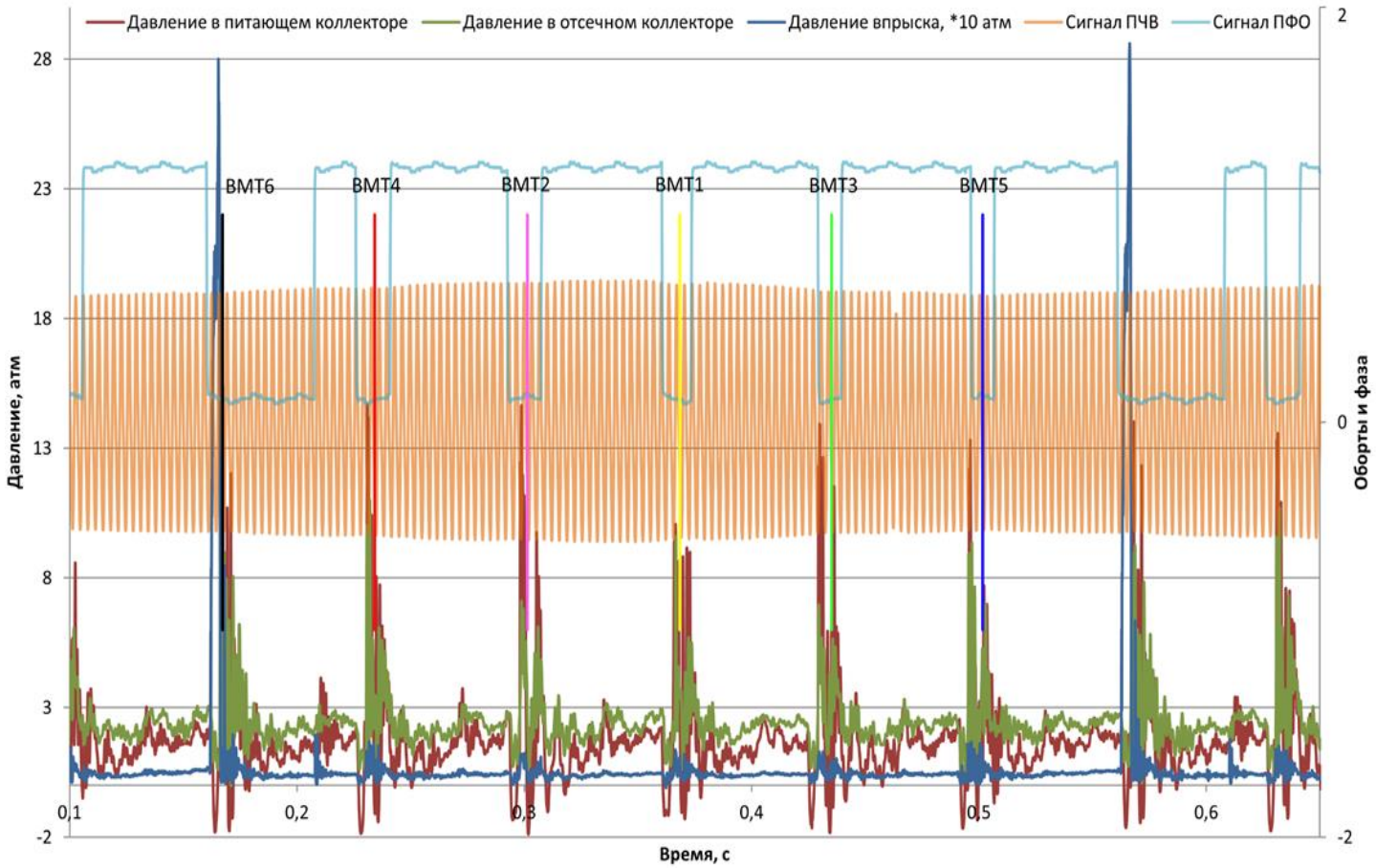


Рисунок.2 – Результаты измерений давления в трубке высокого давления, питающем и отсечном коллекторах низкого давления за рабочий цикл; ПФО – преобразователь фазовой отметки; ПЧВ – преобразователь частоты вращения

Обсуждение результатов

На рисунке 3 представлен подробный анализ процесса топливоподачи в шестой цилиндр и соответствующие ему кривые изменения давления в питающем и отсечном коллекторах низкого давления.

Перед началом топливоподачи происходит постепенное увеличение давления в питающем коллекторе с 0,16 Мпа до 0,25 Мпа (участок 1 на рисунке 3), вызванное подъемом плунжера 1 электроуправляемого топливного насоса высокого давления (ЭУ ТНВД) при открытом перепускном канале клапана 6, через который топливо вытесняется из надплунжерной полости 10 в питающий коллектор 11 (рисунок 4).

Перед началом топливоподачи происходит постепенное увеличение давления в питающем коллекторе с 0,16 Мпа до 0,25 Мпа (участок 1 на рисунке 3), вызванное движением плунжера 1 ЭУ ТНВД при открытом перепускном канале клапана 6, через который топливо вытесняется из надплунжерной полости 10 в питающий коллектор 11 (рисунок 4).

В момент, когда поршень 6 клапана ЭУ ТНВД перекрывает сообщение надплунжерной полости 10 и питающего коллектора11 (начало топливоподачи, рисунок 5), давление в питающем трубопроводе низкого давления начинает быстро снижаться (начало участка 2 на рисунке 3).

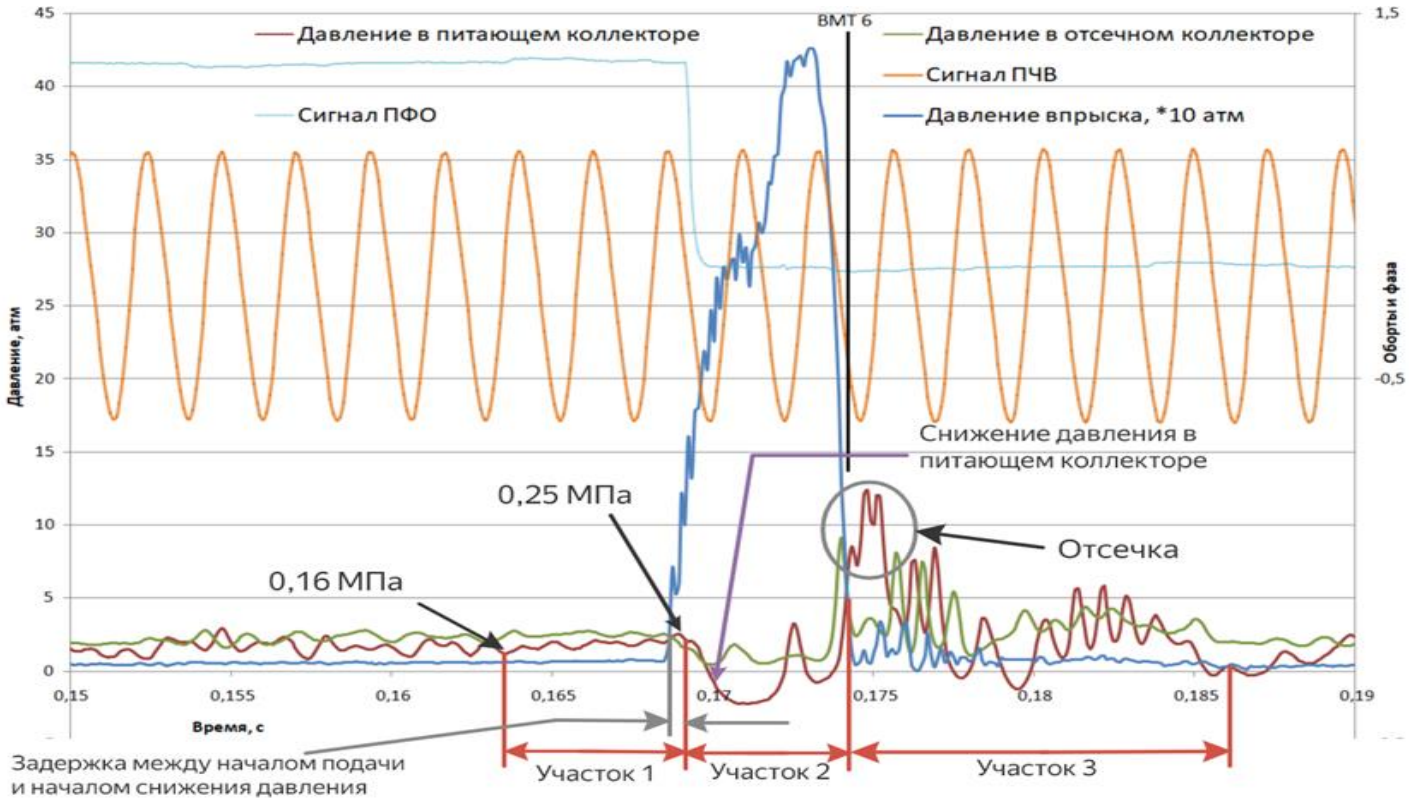


Рисунок 3 – Изменение значений контролируемых параметров во время впрыска топлива в шестой цилиндр; ПФО – преобразователь фазовой отметки; ПЧВ – преобразователь частоты вращения

Это снижение вызвано инерционностью топлива в питающем коллекторе, которое в момент разобщения каналов всё еще продолжает перемещаться от ТНВД по питающему коллектору в сторону подпорного клапана, создавая область пониженного давления в районе всасывающего отверстия ТНВД, которая перемещается в сторону датчика 1 (рисунок 1) со скоростью распространения волны давления, которая для дизельного топлива в питающем коллекторе составляет 1333,84 м/с. Именно конечным значением этой скорости объясняется задержка в 0,75 мс от начала увеличения давления топлива в ТВД до начала снижения давления в питающем коллекторе (рисунок 3).

В момент отсечки поршень 6 электромагнитного клапана под действием возвратной пружины 9 перемещается влево и соединяет область высокого давления (надплунжерную полость) 10 вначале с отсечным коллектором низкого давления 16, а затем и с питающим 11 (рисунок 6), что приводит к резкому увеличению давления и волновым процессам в обоих коллекторах (рисунок 3).

Таким образом, изменение давления в питающем коллекторе низкого давления позволяет с высокой точностью отследить все этапы процесса топливоподачи: начало движения плунжера, момент срабатывания управляющего клапана ЭУ ТНВД, момент отключения клапана (отсечки). Амплитуда отсечного импульса давления в питающем и отсечном коллекторе косвенно характеризует давление впрыска топлива.

Полная потеря работоспособности электроуправляемого насоса может быть вызвана двумя причинами: заклиниванием плунжерной пары или толкателя, либо неисправностью (отключением) управляющего клапана.

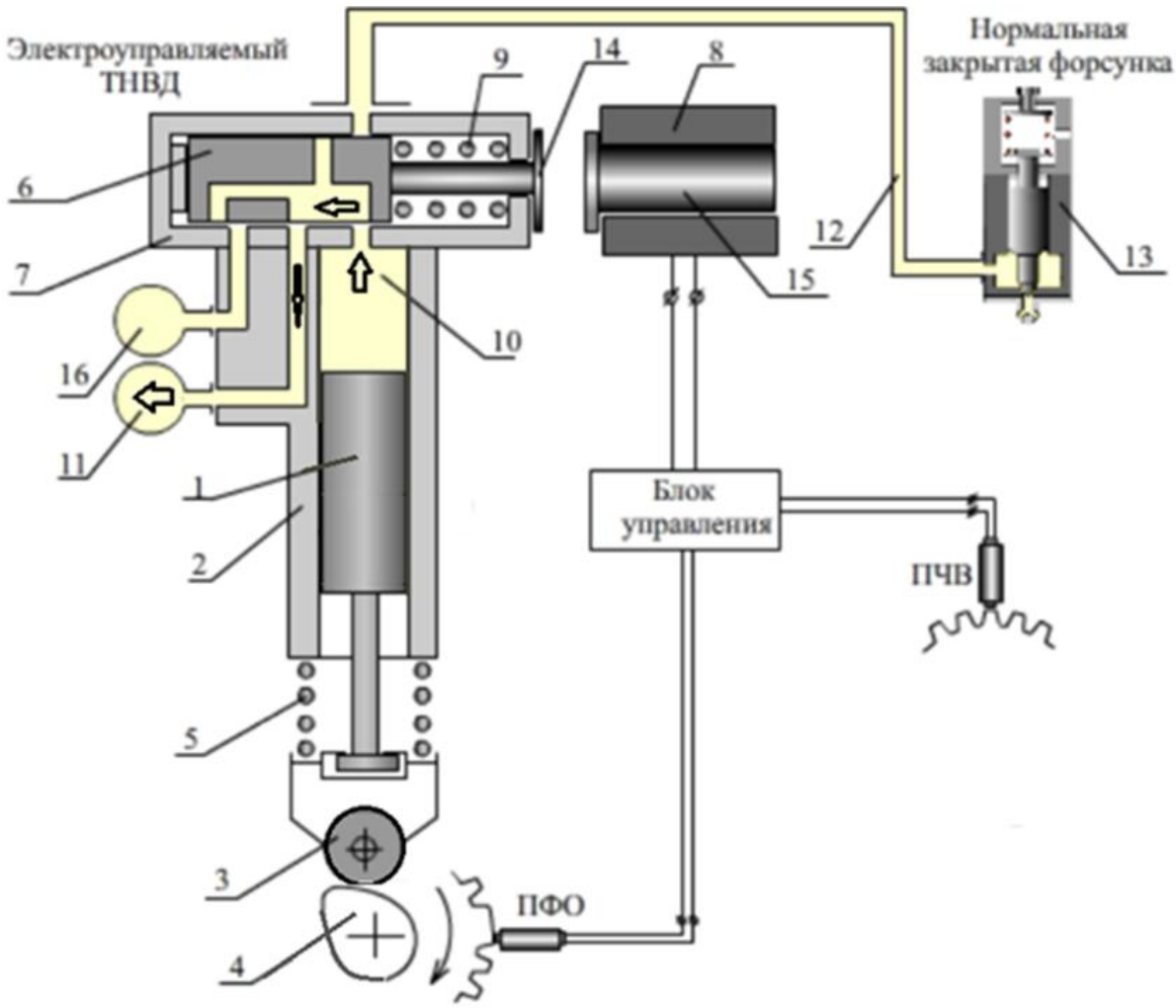


Рисунок 4 – Схема системы электронного управления топливоподачей с электроуправляемым ТНВД (положение наполнения и начала движения плунжера).
1– плунжер; 2 – гильза плунжера; 3 – толкатель; 4 – кулачок распределительного вала; 5 – возвратная пружина плунжера; 6 – поршень клапана; 7 – втулка клапана; 8 – катушка электромагнита; 9 – пружина клапана; 10 – надплунжерный объем; 11 – питающий коллектор низкого давления; 12 – трубопровод высокого давления (ТВД); 13 – форсунка; 14 – тарелка поршня клапана; 15 – сердечник электромагнита; 16 – отсечной коллектор низкого давления.

Контроль давления топлива в питающем коллекторе низкого давления позволяет не только надежно выявить прекращение топливоподачи насосом (рисунок 7), но и определить причину отказа.

При остановке плунжера (штатном отключении насоса остановкой толкателя), среднее давление в питающем коллекторе вблизи ВМТ соответствующего цилиндра остается примерно постоянным (рисунок 8), в то время, как при отключении насоса блоком управления ЭСУВТ (отключение электромагнита 8 управляющего клапана) наблюдается увеличение давления вследствие вытеснения топлива в коллектор движущимся плунжером (рисунок 9). После остановки плунжера давление плавно снижается.

Как следует из рисунков 3, 7…9, для достоверной оценки работоспособности топливоподающей аппаратуры системы ЭСУВТ достаточно контролировать давление топливо только в питающем коллекторе низкого давления.

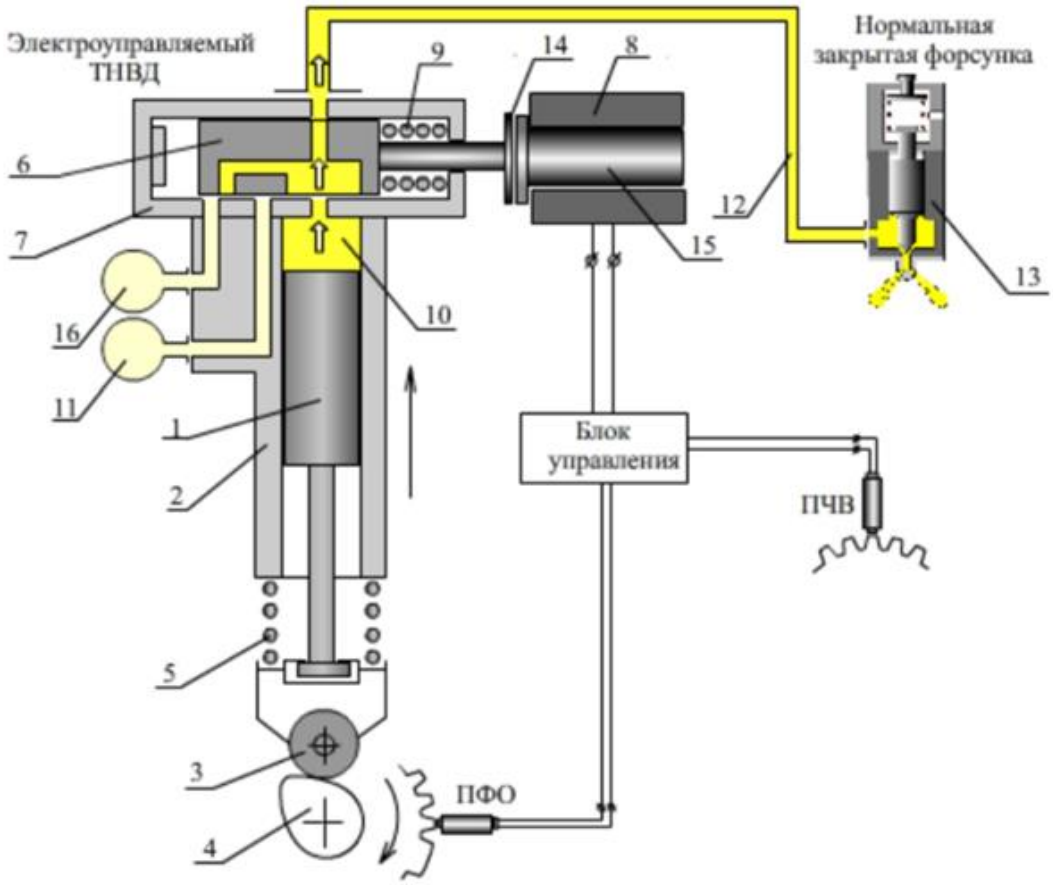


Рисунок 5 – Схема системы электронного управления топливоподачей с электроуправляемым ТНВД (положение начала подачи)

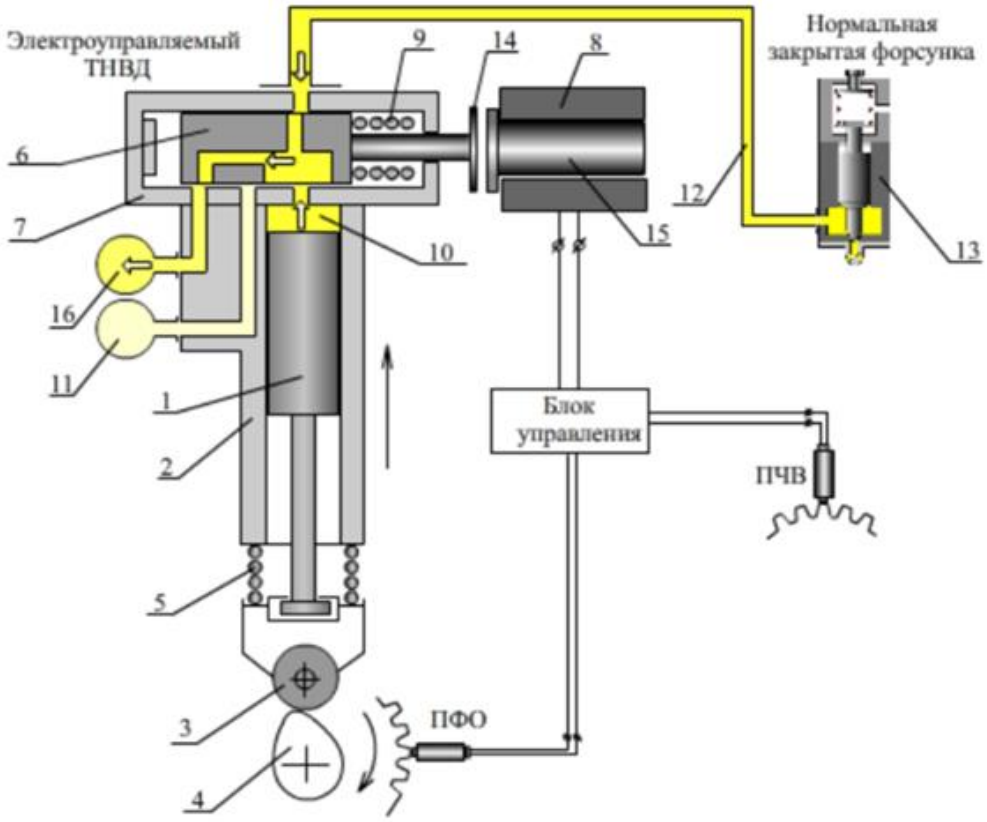


Рисунок 6 – Схема системы электронного управления топливоподачей с электроуправляемым ТНВД (положение отсечки)

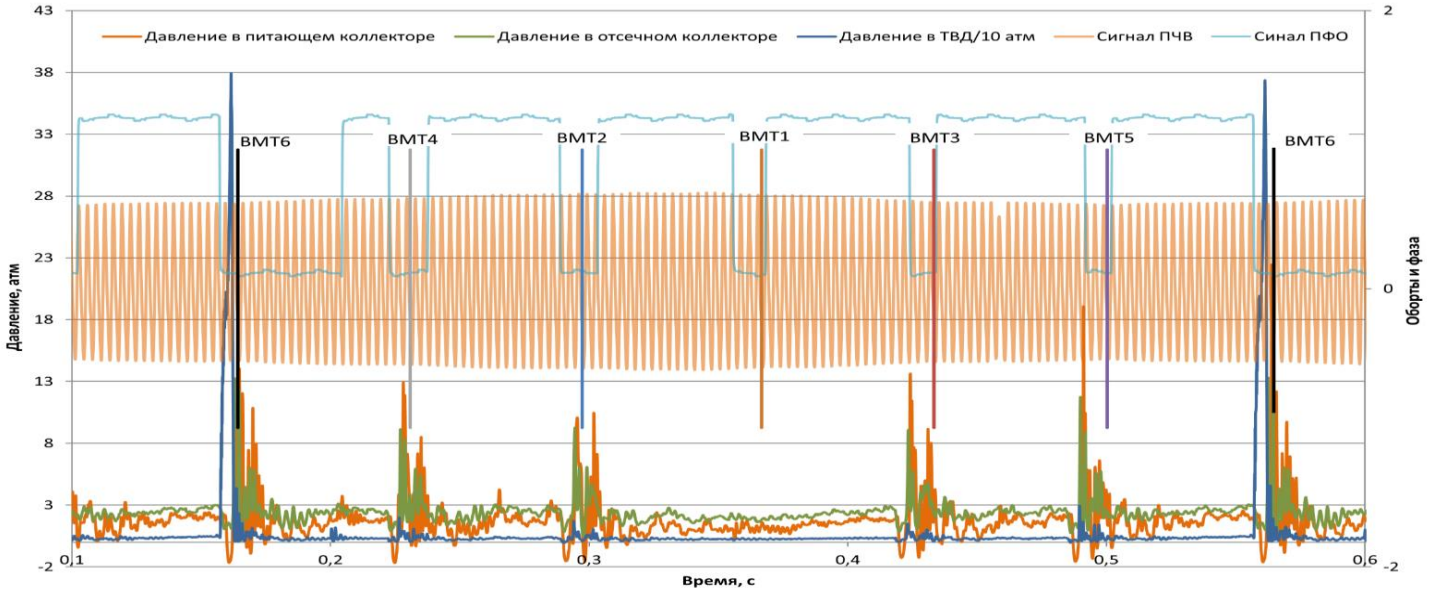


Рисунок 7 – Изменение давления в коллекторах низкого давления при отключении ЭУ ТНВД 1-го цилиндра толкателем

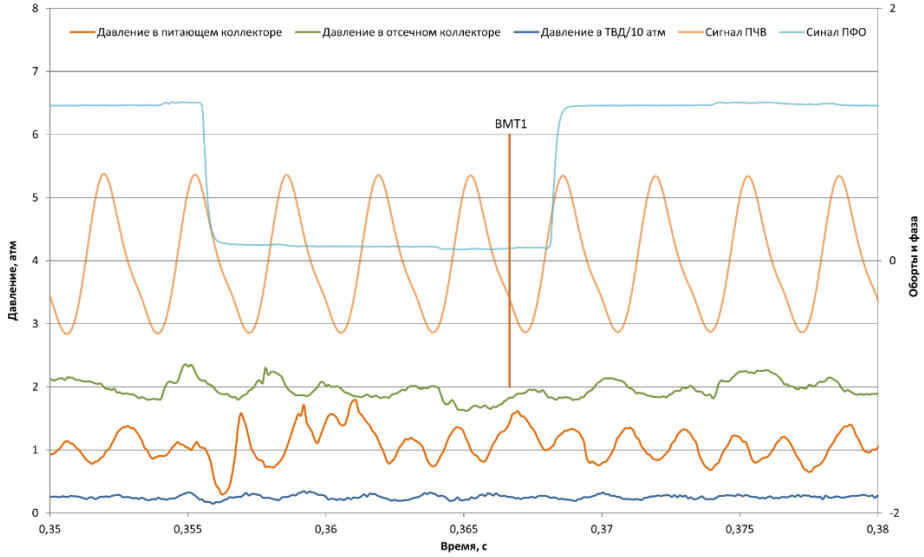


Рисунок 8 – Изменение давления в коллекторах низкого давления при отключении ЭУ ТНВД 1-го цилиндра толкателем

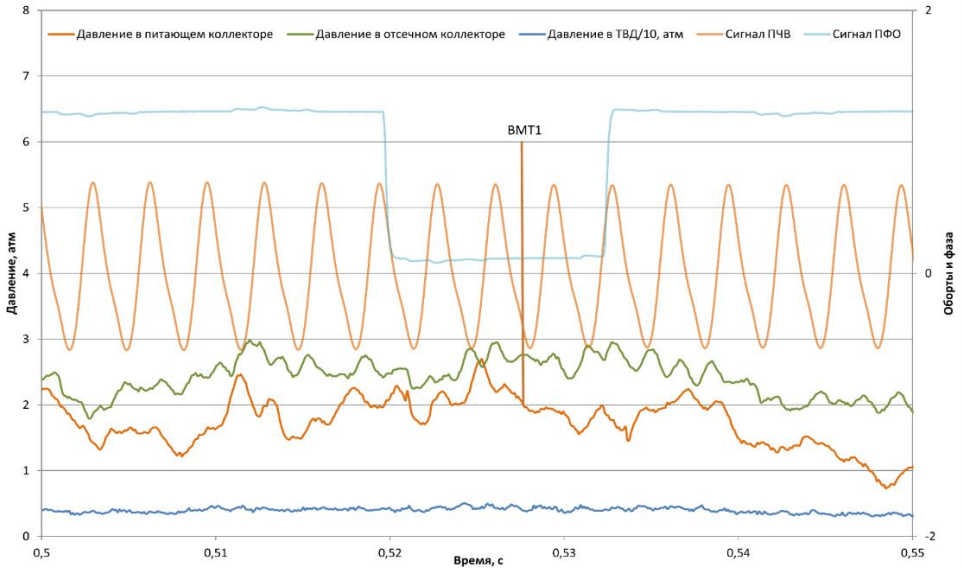


Рисунок 9 – Изменение давления в коллекторах низкого давления при отключении ЭУ ТНВД 1-го цилиндра блоком управления ЭСУВТ

ВЫВОДЫ

1. Предложен метод контроля работоспособности топливоподающей аппаратуры в системах электронного управления топливоподачей тепловозных дизелей на основе результатов контроля изменения давления топлива в питающем коллекторе низкого давления.
2. Задача контроля работоспособности топливоподающей аппаратуры может быть решена с использованием только преобразователя давления в питающем коллекторе низкого давления, поскольку привязка кривых давления к положению коленчатого вала в этом случае не требуется.
3. Для контроля изменения давления в питающем коллекторе должен использоваться только быстродействующий аналоговый датчик или преобразователь давления без цифровой обработки сигнала с частотой дискретизации измерителя не менее 10 кГц.

Список использованных источников

1. Система электронного управления подачей топлива ЭСУВТ.01: ЭСУВТ.01.00.000 РЭ Руководство по эксплуатации // Саратов. – 2012. – 82 с., илл.
2. Преобразователи давления МИДА-ПИ-51/ http://www.midaus.com/katalog/preobrazovateli-davleniya/mida-pi-51.html (дата обращения 14.03.2025).
3. USB-4716: Multifunction USB Module/ URL: https://www.advantech.ru/products/1-2mlkno/usb-4716/mod_a3ab933c-c6d3-49eb-9d25-58cacecdef7a (дата обращения 09.08.2022).

ФГБОУ ВО ПГУПС, г. Санкт-Петербург.

Кафедра «Локомотивы и Локомотивное хозяйство».

Грачев Владимир Васильевич: д.т.н., профессор.

Грищенко Александр Васильевич: д.т.н., профессор.

Базилевский Федор Юрьевич: к.т.н., доцент.

Шумилов Юрий Юрьевич: ассистент.

Федоров Юрий Сергеевич: инженер.

УДК 621.43:629.424.3 ГРНТИ 73.49.21

В. В. Грачев, А. В. Грищенко, Ф. Ю. Базилевский, Ю. Ю. Шумилов

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ХОЛОДНОЙ ПРОКРУТКИ МНОГОЦИЛИНДРОВОГО ТЕПЛОВОЗНОГО ДИЗЕЛЯ НА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Аннотация. *Высокооборотные двигатели небольшой размерности находят все более широкое применение в качестве первичных двигателей тепловозов с многодвигательными силовыми установками. В связи с этим актуальной является задача разработки методов контроля их технического состояния в эксплуатации. В статье приведены результаты исследования процесса холодной предпусковой прокрутки двигателя на математической модели, на основании анализа которых предлагается метод контроля технического состояния многоцилиндрового двигателя по изменению мгновенной угловой скорости коленчатого вала и тока стартерного электродвигателя в период холодной предпусковой прокрутки.*

Ключевые слова: холодная прокрутка, мгновенная угловая скорость, коленчатого вал, ток стартерного *электродвигателя*, эквивалентный диаметр утечек, степень сжатия.

Постановка задачи

Все более широкое применение высокооборотных дизельных двигателей малой размерности, не имеющих индикаторных кранов, в качестве первичных двигателей многодвигательных силовых установок тепловозов [1] обуславливает актуальность разработки и применения методов контроля их технического состояния без снятия и анализа индикаторной диаграммы рабочего процесса. Ряд таких методов основан на анализе изменения мгновенной угловой скорости (МУС) коленчатого вала и тока стартерного электродвигателя (СТД) в период предпусковой холодной прокрутки [2, 3].

Функция контроля МУС и тока СТД реализована в большинстве мотор-тестеров, применяемых для диагностирования малолитражных автомобильных двигателей [4], однако анализ этих сигналов сводится к визуальному сравнению пределов их изменения на угловых секторах поворота коленчатого вала (ПКВ), соответствующих разным цилиндрам двигателя. Такой подход позволяет эффективно выявлять только полную потерю газоплотности отдельных цилиндров, что во многих случаях достаточно для систем диагностики автомобильных двигателей, но совершенно недостаточно для систем бортовой диагностики силовых установок тепловозов. Последние, наряду с задачами контроля работоспособности двигателя, решают задачи прогнозирования изменения его технического состояния, контроля качества ремонта, оперативного контроля энергоэффективности в процессе эксплуатации, причем в автоматическом или полуавтоматическом режимах.

Результаты стендовых испытаний дизеля типа Д50 (6ЧН31,8/33) в режиме холодной прокрутки КВ, приведенные в [5], показывают, что способы диагностики, основанные на анализе изменения сигналов МУС и тока СТД в период холодной прокрутки, могут быть актуальны и для дизелей большей размерности, позволяя осуществлять оперативный контроль состояния цилиндропоршневой группы (ЦПГ) в

процессе эксплуатации, при условии выбора диагностических параметров, признаков и критериев, допускающих автоматизацию процесса диагностирования.

В этой же работе предлагается использовать в качестве диагностических параметров для такого контроля относительные отклонения средних значений угловой скорости КВ $\overline{\omega_j^{\text{ср}}}$ на секторах ПКВ цилиндров:

$$\overline{\omega_j^{\text{ср}}} = \frac{\omega_j^{\text{ср}} - \omega_{\text{ср}}}{\omega_{\text{ср}}}, \quad (1)$$

где $\omega_j^{\text{ср}}$ – средняя угловая скорость КВ на секторе ПКВ j-го цилиндра, с$^{-}$;

$\omega_{\text{ср}}$ – среднецикловая угловая скорость КВ, с$^{-}$;

j – номер цилиндра по порядку работы.

С использованием параметров (1) вычисляются диагностические признаки:

$$\overline{\Delta\omega_j^{\text{ср}}} = (\overline{\omega_j^{\text{ср}}} - \overline{\omega_{j+1}^{\text{ср}}}), \quad (2)$$

Диагностическим критерием, характеризующим изменение текущего ТС ЦПГ j-го цилиндра по сравнению с эталонным ТС, является изменение значения признака (2) в текущем ТС цилиндра.

Результаты холодной прокрутки КВ дизеля с открытыми индикаторными кранами, приведенные в [5], подтверждают эффективность предложенных диагностических критериев и признаков для выявления существенных отклонений (ухудшений) технического состояния отдельных цилиндров дизеля.

Вместе с тем возможность использования предложенного подхода к диагностированию ЦПГ цилиндров для решения задач прогнозирования изменения их состояния и определения остаточного ресурса требует дополнительного исследования. Кроме того, требует уточнения возможность интегральной оценки технического состояния ЦПГ дизеля в целом при ее постепенном износе.

Экспериментальный способ решения этих задач, особенно для дизеля большой размерности, сопряжен со значительными затратами материальных и временных ресурсов, необходимых для многократной переборки ЦПГ.

Более рациональным представляется использование для указанных исследований математической модели процесса холодной прокрутки КВ дизеля с последующей экспериментальной проверкой основных результатов.

Целью статьи является исследование процесса холодной прокрутки дизеля Д50 (6ЧН31,8/33) на математической модели и анализ полученных результатов. В ходе исследования решаются следующие задачи:

- определение диагностических признаков и критериев для интегральной оценки состояния ЦПГ дизеля в процессе прокрутки;

- оценка влияния нарушения регулировок (линейной величины камеры сжатия) и ухудшения ТС отдельных цилиндров на изменения диагностических признаков (1) и критериев (2) в процессе прокрутки.

Выбор метода исследования

Для исследования используется ранее разработанная математическая модель холодной предпусковой прокрутки дизеля, включающая модели рабочих процессов в каждом из цилиндров дизеля, модель коленчатого вала, вращающегося под действием вращающего момента стартерного двигателя, с определением суммарного момента тангенциальных сил, действующих на шатунные шейки КВ, и момента механических потерь в поршневой машине, а также модель электрической цепи стартерного электродвигателя [6].

Проверка адекватности модели выполнялась посредством сравнения результатов моделирования холодной прокрутки дизеля Д50 с результатами стендовых испытаний дизель-генератора 2ДГ50 в режиме холодной прокрутки [5].

Среднеквадратическая относительная погрешность (RMSE) моделирования индикаторной диаграммы в ее информативной области (±60 гр. ПКВ от ВМТ цилиндра) не превышает 6,5%, абсолютная погрешность находится в пределах 0,1 МПа.

Относительная погрешность моделирования изменения мгновенной угловой скорости КВ и тока стартерного двигателя в процессе прокрутки находится в пределах 2,5%.

Соотношение относительных отклонений средних значений угловой скорости коленчатого вала и тока стартерного двигателя на секторах цилиндров, полученное в результате моделирования, полностью соответствует результатам испытаний, совпадение численные значений вполне удовлетворительное.

Полученные результаты позволяют использовать модель процесса холодной прокрутки дизеля для решения любых задач, связанных с контролем технического состояния цилиндропоршневой группы дизеля в процессе предпусковой холодной прокрутки.

Обсуждение результатов

Интегральный контроль технического состояния цилиндропоршневой группы двигателя

Значения напряжения СтАБ $U_{\text{АБ}}$, ток СТД $I_{\text{СТД}}$ и угловая скорость КВ ω в процессе прокрутки связаны уравнением электродвигателя постоянного тока, записанного для мгновенных значений тока и напряжения [6]:

$$L \cdot \frac{di_{\text{СТД}}}{dt} = u_{\text{АБ}} - i_{\text{СТД}} \cdot R - C_E \cdot \omega \cdot \Phi(i_{\text{СТД}})), \qquad (3)$$

где C_E - электромашинная постоянная СТД;

$\Phi(i_{\text{СТД}})$ - магнитный поток главных полюсов СТД, определяемый его кривой намагничивания, в·с;

R - сопротивление цепи СТД, Ом;

L - индуктивность цепи СТД, Гн.

Момент СТД постоянного тока с последовательным возбуждением, действующий на коленчатый вал во время его прокрутки, определяется выражением:

$$M_{\text{стд}} = C_M \cdot i_{\text{СТД}} \cdot \Phi(i_{\text{СТД}}) = C'_{\text{М}} \cdot i^2_{\text{СТД,}} \quad (4)$$

где $C'_{\text{М}}$ – коэффициент, учитывающий значение электромашинной постоянной двигателя C_M и связь тока обмотки возбуждения с магнитным потоком, $\frac{\text{н·м}}{\text{А}^2}$.

Моментом нагрузки для СТД является суммарный момент тангенциальных сил, действующих на шейки КВ со стороны шатунов, и момент механических потерь в поршневой машине двигателя.

Среднее за цикл значение момента тангенциальной силы, действующего на шатунную шейку коленчатого вала при его прокрутке, определяется величиной отрицательной индикаторной работы, совершаемой в соответствующем цилиндре, которая зависит, главным образом, от эквивалентного диаметра утечек в цилиндре (т.е. от ТС его ЦПГ) и средней угловой скорости КВ. Косвенное влияние на величину отрицательной индикаторной работы в цилиндрах дизеля при его прокрутке оказывает также регулировка линейной величины камер сжатия при сборке ЦПГ, поскольку увеличение давления на такте сжатия, наряду с увеличением отрицательной работы газа, сопровождается повышенными утечками рабочего тела из цилиндра и уменьшением положительной работы на такте расширения. Момент механических потерь прогретого двигателя в период прокрутки практически полностью определяется среднецикловой угловой скоростью вращения КВ [7].

Таким образом, при текущем техническом состоянии и регулировках ЦПГ среднее за цикл значение момента на валу двигателя при прокрутке, уравновешиваемое моментом СТД, определяется средней угловой скоростью вала при прокрутке. Изменение технического состояния и регулировок ЦПГ должно сопровождаться изменением среднего момента на валу двигателя при прокрутке, момента СТД и, с учетом (4), среднего значения его тока для каждого значения средней угловой скорости КВ.

На рисунках 1 и 2 приведены результаты моделирования процесса холодной прокрутки дизеля с различным ТС ЦПГ (эквивалентным диаметром утечек (ЭДУ) во всех шести цилиндрах) при различных значениях напряжения АБ.

Как следует из рисунка 1, изменение (увеличение) значения ЭДУ во всех цилиндрах на 2,0 мм (на 0, 004% от площади поперечного сечения цилиндра) вследствие равномерного постепенного износа ЦПГ приводит к увеличению среднего за цикл тока СТД более, чем на 20%. При этом изменение степени сжатия оказывает существенно меньшее влияние на величину тока прокрутки. Как следует из рисунка, изменение степени сжатия во всех цилиндрах с 12,5 до 14,5 приводит к увеличению среднего тока прокрутки не более, чем на 1,5% за счет увеличения тепловых потерь в стенки камеры сгорания.

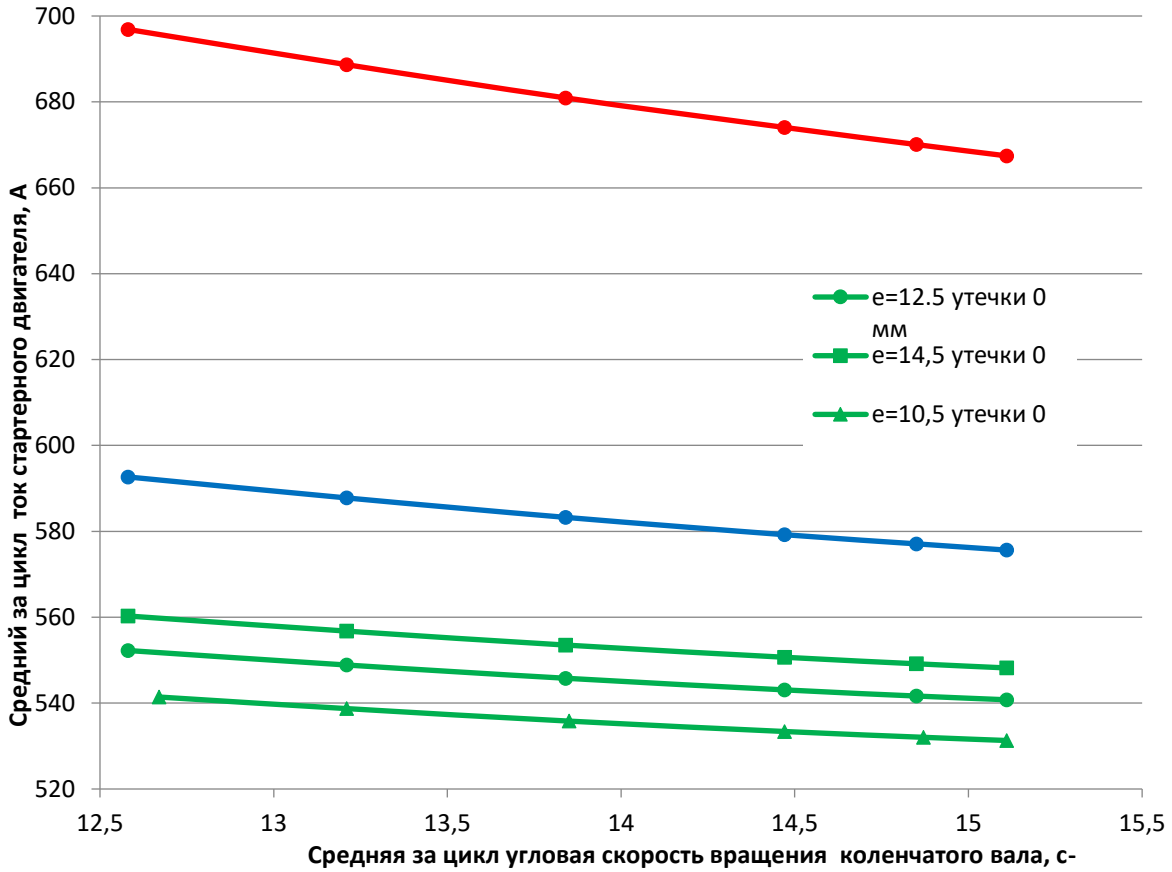


Рисунок 1 - Зависимость среднего тока СТД от средней угловой скорости КВ при разных значениях ЭДУ и степени сжатия цилиндров

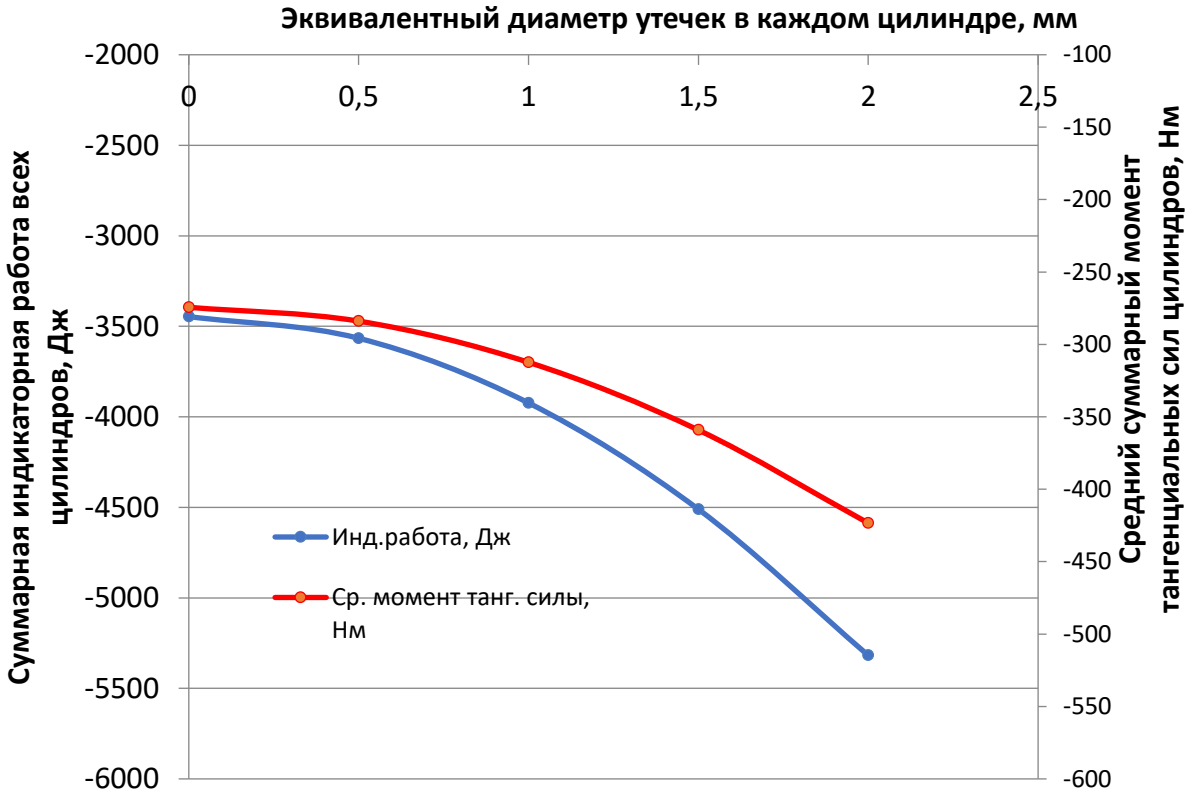


Рисунок 2 - Зависимость суммарной индикаторной работы и среднего суммарного момента тангенциальных сил цилиндров от эквивалентного диаметра утечек.

Приведенные результаты свидетельствуют о возможности использования зависимости среднего за цикл тока СТД от среднего за цикл значения угловой скорости

КВ в период прокрутки в качестве диагностического признака, характеризующего текущее техническое состояние ЦПГ. Средние значения тока СТД и угловой скорости КВ определяются из следующих выражений:

$$\omega_{\text{ср}} = \frac{\sum_{j:=1}^{N}(\omega_j \cdot \Delta t_j)}{\sum_{j:=1}^{N} \Delta t_j}, \qquad i_{\text{СТДср}} = \frac{\sum_{j:=1}^{N}(i_{\text{АБ}j} \cdot \Delta j)}{\sum_{j:=1}^{N} \Delta j}, \tag{5}$$

где ω_j, $i_{\text{СТД}j}$ - отсчет угловой скорости КВ и тока СТД на j-м зубе модулятора, с$^{-}$, А;

Δt_j - время поворота модулятора от j-го до $(j+1)$-го зуба, с;

N - количество отсчетов за цикл.

Необходимо отметить, что указанный характер изменения тока СТД при увеличении износа ЦПГ противоречит весьма распространенному представлению о снижении среднего суммарного момента тангенциальных сил на шатунных шейках коленчатого вала и, соответственно, среднего тока СТД при увеличении утечек заряда из КС цилиндров.

На самом деле следствием постепенного увеличения эквивалентного диаметра утечек является уменьшение давления на такте расширения вследствие утечек заряда из камеры сжатия (КС) цилиндра при сохранении его примерно постоянным на протяжении большей части такта сжатия. Это приводит к увеличению отрицательной индикаторной работы, которое эквивалентно увеличению среднего момента нагрузки и тока СТД при прокрутке (рисунок 2). При полном отсутствии утечек величина отрицательной индикаторной работы определяется только снижением давления в период предварительного (свободного) выпуска и потерями тепловой энергии в стенки КС.

В качестве подтверждения можно привести экспериментальные зависимости средней угловой скорости прокрутки $\omega_{\text{ср}}$ и среднего тока СТД $i_{\text{СТДср}}$ от количества открытых индикаторных кранов цилиндров (рисунок 3), полученные в ходе стендовых испытаний дизель-генератора 2ДГ50 [5]. Из них следует, что при неизменном напряжении источника питания СТД угловая скорость прокрутки КВ снижается, а средний ток СТД растет по мере увеличения количества открытых кранов цилиндров.

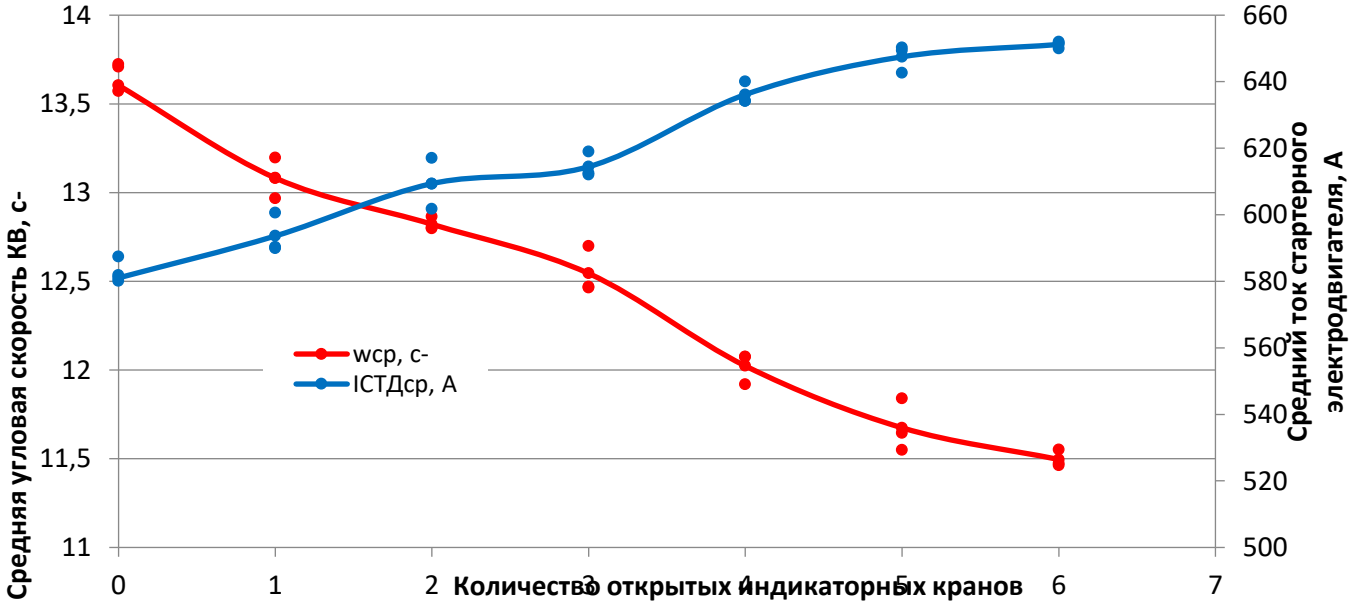


Рисунок 3 - Экспериментальные зависимости значений $\omega_{ср}$ и $i_{СТДср}$ от количества открытых индикаторных кранов цилиндров

Расчеты показывают, что характер влияния утечек заряда из КС на изменение угловой скорости и тока СТД кардинально изменяется либо при очень больших эквивалентных диаметрах утечек (для дизеля типа Д50 более 20 мм), либо при малых средних угловых скоростях прокрутки (менее 1,5 $с^{-}$), вызванных снижением напряжения стартерной аккумуляторной батареи при разрядке стартерным током вследствие ее недостаточной емкости. И в том, и в другом случае значительная часть заряда успевает покинуть цилиндр еще на такте сжатия, уменьшая величину отрицательной работы.

Именно на этом основана рекомендация открывать часть индикаторных кранов цилиндров при пуске дизеля с разряженной стартерной аккумуляторной батареей, не обеспечивающей даже минимальную угловую скорость проворота коленчатого вала. Однако постановка и решение задачи оценки ТС ЦПГ дизеля в таком состоянии и в таких режимах не имеет смысла, поэтому их исследование выходит за рамки данной работы. Для обеспечения практической применимости результатов исследования достаточно ограничить пригодную для диагностирования область режимов прокрутки минимальной установившейся средней частотой вращения КВ 5,5 $с^{-}$ (для дизелей ряда Д50).

Таким образом, приведенные результаты позволяют определить параметры $\omega_{\text{ср}}$ и $i_{\text{СТДср}}$, предложенные для интегральной оценки состояния ЦПГ дизеля в процессе холодной прокрутки, как обладающие достаточной чувствительностью, информативностью и однозначностью.

Поскольку, кроме величины отрицательной индикаторной работы цилиндров и соответствующего суммарного момента тангенциальных сил, момент нагрузки СТД при прокрутке также зависит от уровня потерь на трение в поршневой машине, достоверность диагностирования будет определяться соблюдением примерного постоянства теплового состояния двигателя при диагностировании.

Помимо зависимостей $i_{\text{СТДср}} = f((\omega_{\text{ср}})$, характеризующих ТС ЦПГ, в процессе диагностирования необходимо также контролировать зависимость $i_{\text{СТДср}} = f(u_{\text{АБср}}, \omega_{\text{ср}})$, характеризующую состояние стартерного электродвигателя и стартерной аккумуляторной батареи. Вполне очевидно, что при существенном отклонении их от нормы диагностирование теряет смысл.

Контроль технического состояния отдельных цилиндров

В [5] для сравнительной оценки относительных отклонений средних значений МУС на секторах цилиндров (1) предлагается представлять их в виде лепестковой диаграммы с количеством вершин, равным количеству цилиндров двигателя. При равномерной работе (одинаковом состоянии) всех цилиндров такая диаграмма будет представлять собой многоугольник, близкий к правильному (рисунок 4).

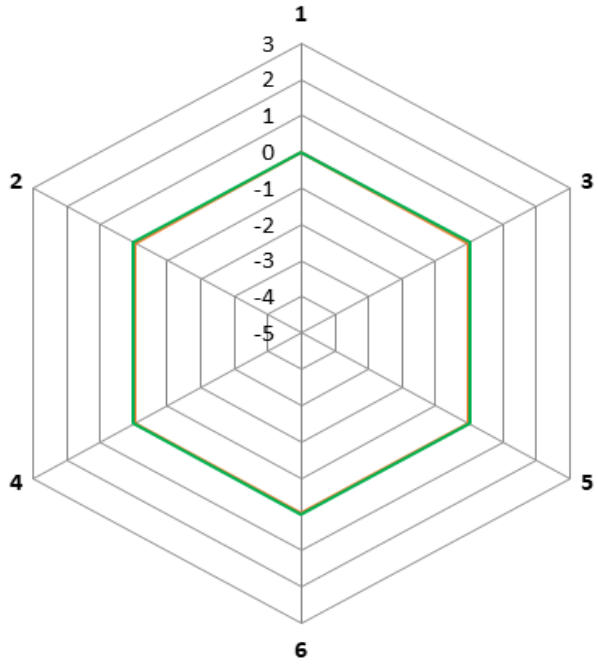


Рисунок 4 - Диаграмма относительных отклонений МУС ($1000 \cdot \overline{\Delta\omega_j^{\text{ср}}}, j = 1 \dots 6$*) при равномерной работе цилиндров шестицилиндрового дизеля*

При изменении технического состояния или регулировки ЦПГ цилиндра изменяется величина среднего момент на шейке коленчатого вала, что приводит к изменению средней угловой скорости КВ на секторе ПКВ, соответствующем этому цилиндру, и ее относительного отклонения от среднециклового значения. Следствием этого изменения является искажение формы лепестковой диаграммы относительных отклонений МУС цилиндров. На рисунках 5 и 6 приведены результаты моделирования процесса ХП при увеличении (с 12,5 до 13,5) и уменьшении (с 12,5 до 11,5) степени сжатия первого цилиндра.

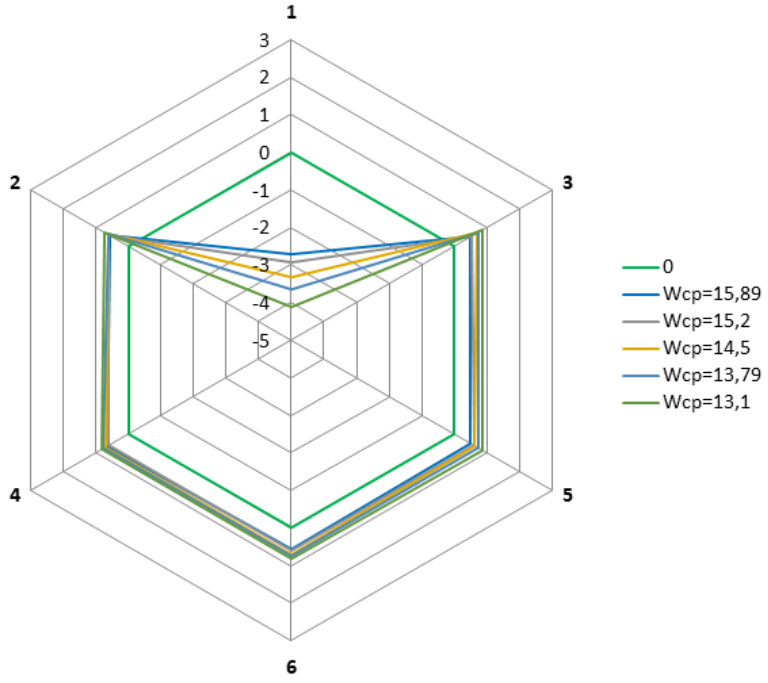


Рисунок 5 - Диаграмма относительных отклонений МУС ($1000 \cdot \overline{\Delta\omega_j^{\text{ср}}}, j = 1 \dots 6$*) при увеличении степени сжатия первого цилиндра до 13,5 при разных значениях среднецикловой угловой скорости КВ*

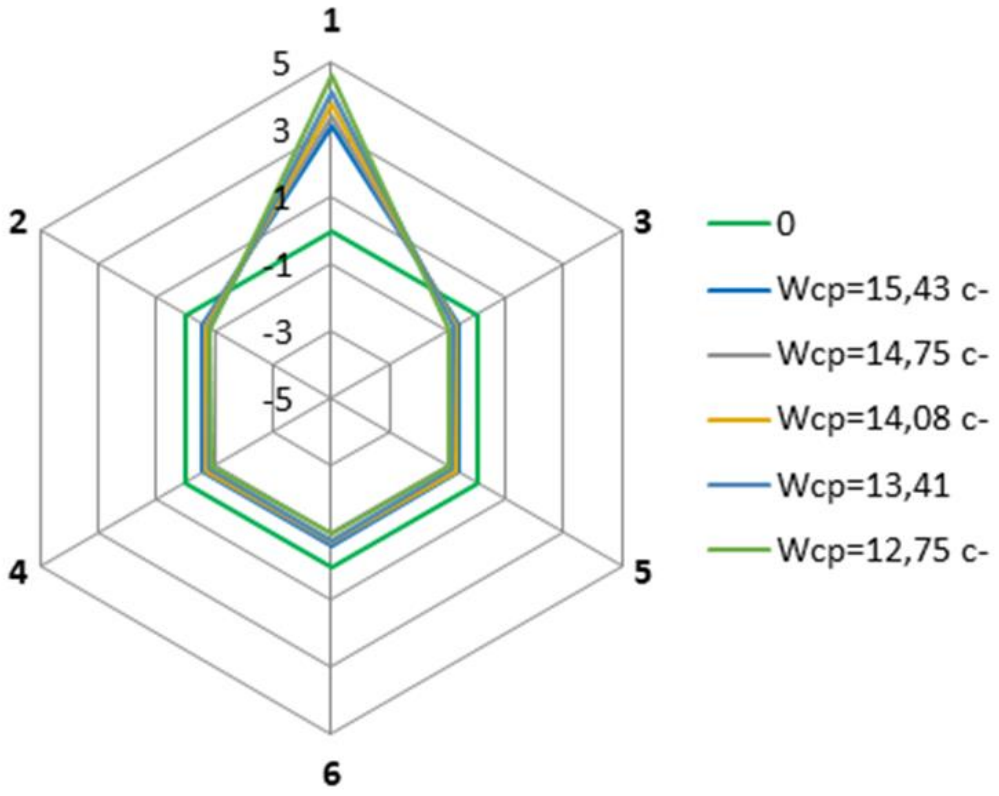


Рисунок 6 – Диаграмма относительных отклонений МУС ($1000 \cdot \overline{\Delta\omega_j^{\text{ср}}}, j = 1 \dots 6$*) при уменьшении степени сжатия первого цилиндра до 11,5 при разных значениях среднецикловой угловой скорости КВ*

Как следует из рисунков, изменение степени сжатия в цилиндре при отсутствии утечек приводит к противоположному изменению величины $\overline{\Delta\omega_j^{\text{ср}}}$ на секторе ПКВ, соответствующем этому цилиндру. Характер изменения $\overline{\Delta\omega_j^{\text{ср}}}$ не зависит от среднецикловой угловой скорости КВ, однако величина этого изменения возрастает по мере снижения $\omega_{\text{ср}}$ ввиду того, что абсолютное значение изменения угловой скорости КВ на секторе ПКВ цилиндра (числитель выражения (1)) при отсутствии утечек определяется величиной отрицательной работы на такте сжатия и не зависит от величины среднецикловой угловой скорости КВ (знаменатель выражения (1)), что при уменьшении последней приводит к увеличению значения относительного отклонения.

Ухудшение технического состояния отдельных цилиндров (увеличение ЭДУ в отдельных цилиндрах) приводит к существенно отличному изменению формы диаграммы относительных отклонений угловых скоростей КВ.

На рисунке 7 приведена диаграмма, соответствующая различным значениям ЭДУ мм в первом цилиндре. Как следует из рисунка, снижение газоплотности цилиндра приводит к увеличению МУС этого цилиндра (вследствие уменьшения отрицательной работы на такте сжатия) с одновременным снижением МУС следующего по порядку работы цилиндра (вследствие уменьшения положительной работы на такте расширения) и последующим увеличением угловых скоростей остальных цилиндров.

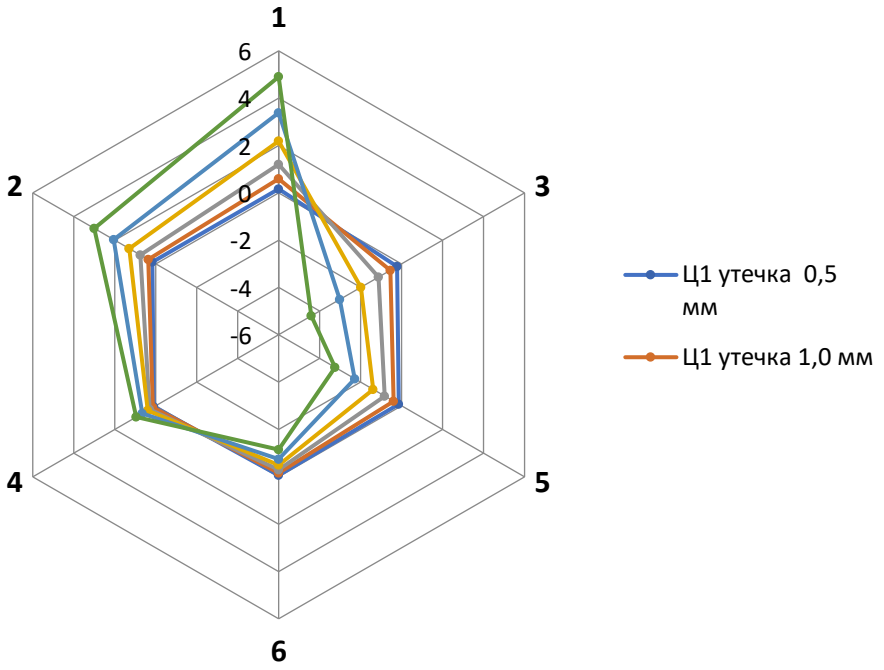


Рисунок 7 - Диаграмма относительных отклонений МУС ($1000 \cdot \overline{\Delta\omega_j^{\text{ср}}}, j = 1 \ldots 6$*) при увеличении эквивалентного диаметра утечек в первом цилиндре*

Характер влияния ЭДУ на форму диаграммы относительных отклонений МУС цилиндров не зависит от среднецикловой угловой скорости $\omega_{\text{ср}}$ вращения КВ, однако значения отклонений возрастают по мере ее снижения вследствие увеличения потерь заряда на тактах сжатия и расширения (рисунок 8).

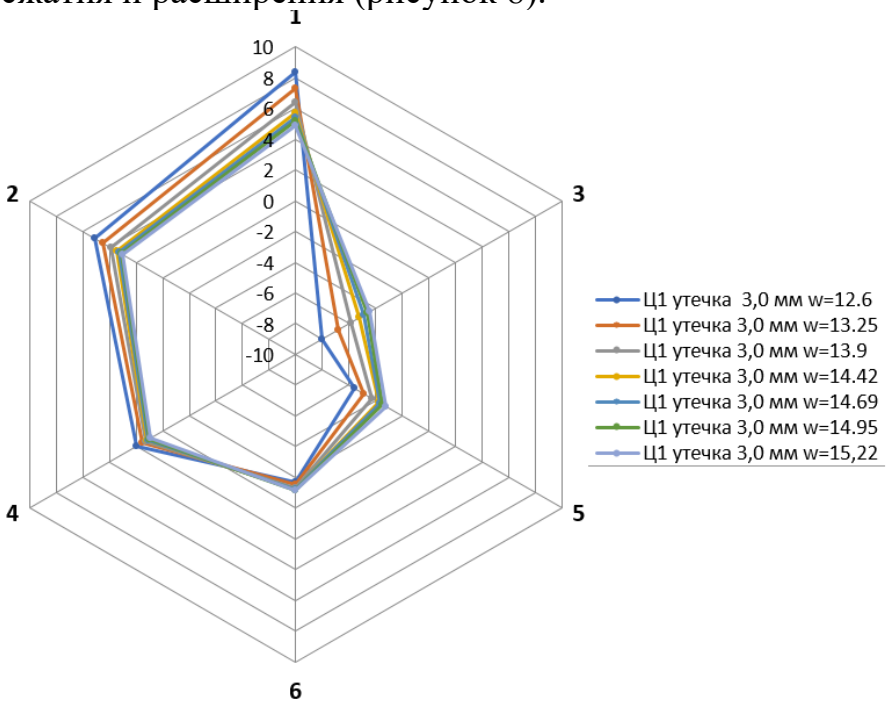


Рисунок 8 - Диаграмма относительных отклонений МУС ($1000 \cdot \overline{\Delta\omega_j^{\text{ср}}}, \ j = 1 \ldots 6$*) при изменении среднецикловой угловой скорости КВ*

Таким образом, использование в качестве диагностического критерия относительных отклонений угловых скоростей цилиндров позволяет однозначно идентифицировать отклонения линейной величины камеры сжатия и снижение газоплотности отдельных цилиндров многоцилиндрового дизеля.

В то же время оценка возможности идентификации множественных отказов с использованием данного критерия требует дополнительного исследования. На рисунке 9 приведены диаграммы относительных отклонений МУС цилиндров при увеличении степени сжатия в первом цилиндре до 14,5 с одновременном увеличением ЭДУ в нем до 2,0 мм (кривая 1) и при увеличении ЭДУ второго цилиндра до 3,0 мм без изменения степени сжатия. Как следует из рисунка, характер изменения формы обеих диаграмм практически идентичен, для идентификации требуется оценка количественных изменений отклонений. Таким образом, использование относительных отклонений МУС на секторах цилиндров не позволяет надежно идентифицировать текущее состояние ЦПГ дизеля при наличии ее множественных отказов. Однако с помощью предлагаемого критерия может осуществляться эффективный контроль изменения технического состояния дизеля в процессе эксплуатации. Для этого необходимо периодически контролировать изменение относительных отклонений МУС цилиндров.

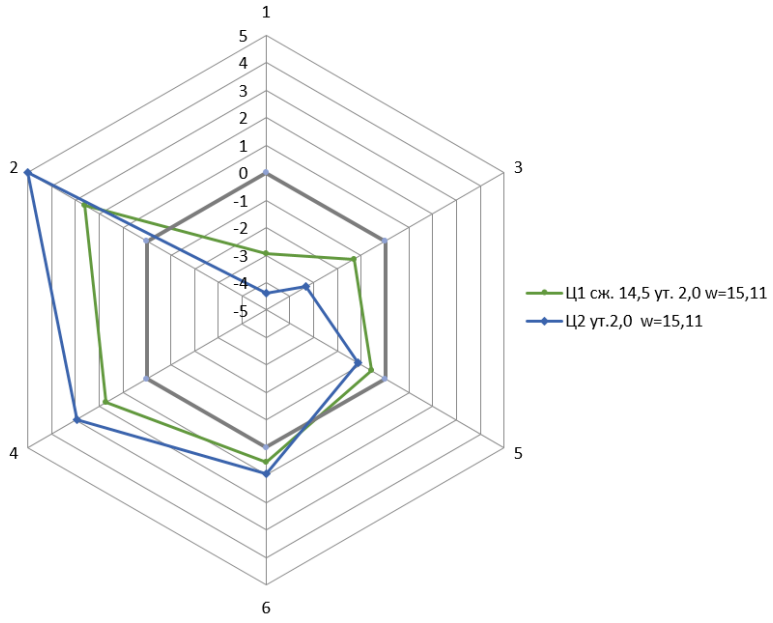


Рисунок 9 - Диаграммы относительных отклонений МУС ($1000 \cdot \overline{\Delta\omega_j^{cp}},\ j = 1 \dots 6$*) при увеличении степени сжатия первого цилиндра до 14,5 с одновременным увеличением ЭДУ в нем до 2,0 мм и увеличении ЭДУ во втором цилиндре до 3,0 мм.*

На рис. 10 приведена диаграмма изменений относительных отклонений МУС цилиндров при увеличении ЭДУ первого цилиндра, в котором при сборке ЦПГ установлена уменьшенная линейная величина КС (увеличена степень сжатия с 12,5 до 14,5).

На рисунке 11 приведена диаграмма изменений относительных отклонений МУС цилиндров при уменьшении степени сжатия первого цилиндра с сохранением ЭДУ на уровне 2,0 мм. Как следует из рисунка, предлагаемый критерий достаточно чувствителен к изменению степени сжатия в цилиндре, что создает предпосылки для использования его в целях контроля износа подшипников коленчатого вала дизелей небольшой размерности. Так, для дизельного двигателя КАМАЗ-740 (8ЧН12/12, тепловоз ТЭМ23 [1]) увеличение линейной величины камеры сжатия цилиндра на 0,6 мм (при износе шатунных и коренных вкладышей на 0,3 мм) приведет к снижению степени сжатия с 17 до 15,74, что, как следует из рисунка 11, приводит к заметному изменению формы диаграммы МУС цилиндров.

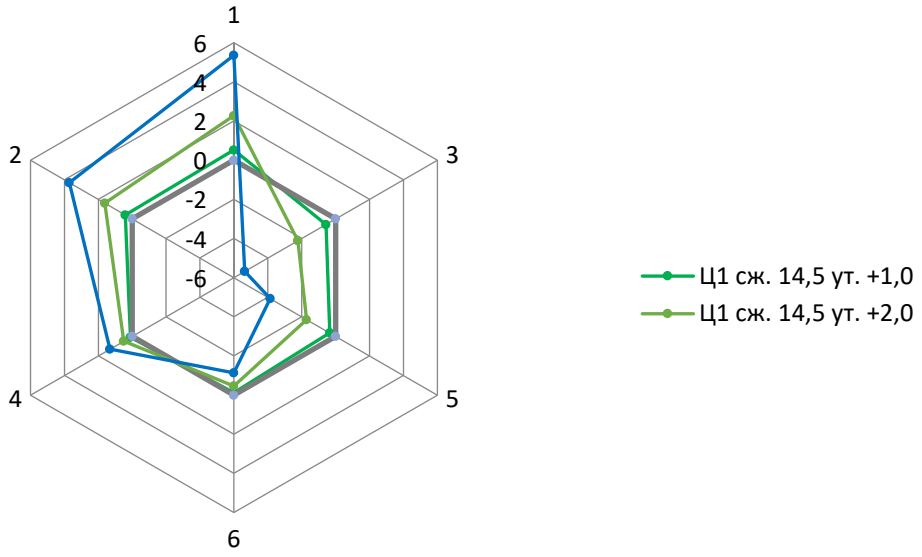


Рисунок 10 – Диаграмма изменений относительных отклонений МУС цилиндров $\left(1000 \cdot \left(\overline{\Delta\omega_j^{\text{ср ЭДУ1}_i}} - \overline{\Delta\omega_j^{\text{ср ЭДУ1}_0}}\right),\ j = 1 \dots 6\right)$ *при увеличении ЭДУ в 1-м цилиндре от 0 до 3,0 мм*

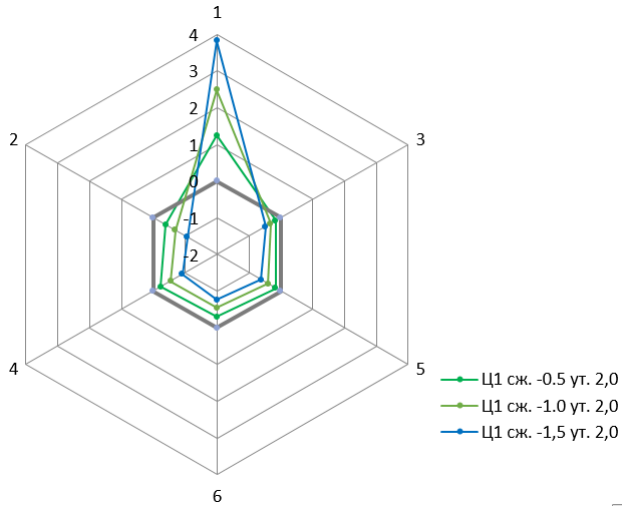


Рисунок 11 – Диаграмма изменений относительных отклонений МУС цилиндров $\left(1000 \cdot \left(\overline{\Delta\omega_j^{\text{ср сж1}_i}} - \overline{\Delta\omega_j^{\text{ср сж1}_0}}\right),\ j = 1 \dots 6\right)$ *при уменьшении степени сжатия в первом цилиндре с 14,50 до 13,0*

ВЫВОДЫ

Анализ результатов исследования процесса холодной предпусковой прокрутки коленчатого вала дизеля на математической модели позволяет сделать следующие выводы.

1. Зависимость среднего тока стартерного электродвигателя от средней угловой скорости коленчатого вала за цикл в период прокрутки может использоваться в качестве интегрального показателя состояния (газоплотности) ЦПГ дизеля.
2. Относительное отклонение средней угловой скорости КВ на секторах цилиндров $(1000 \cdot \overline{\Delta\omega_j^{\text{ср}}}, j = 1 \dots 6)$ может эффективно использоваться для контроля технического состояния и качества сборки цилиндро – поршневой группы отдельных цилиндров многоцилиндрового дизеля при отсутствии смежных отказов.
3. При наличии смежных отказов (существенных отклонений величины степени сжатия и эквивалентного диаметра утечек одновременно в нескольких цилиндрах)

совокупность относительных отклонений средних угловых скоростей на секторах цилиндров не всегда обеспечивает надежную идентификацию отказов.

4. Контроль изменения относительных отклонений средних угловых скоростей КВ на секторах цилиндров в сочетании с зависимостью среднего тока прокрутки от средней за цикл угловой скорости КВ позволяют достоверно контролировать изменение технического состояния ЦПГ дизеля в процессе эксплуатации.
5. Чувствительность средней угловой скорости КВ на секторе цилиндра к изменению степени сжатия позволяет использовать предлагаемый критерий для контроля износа подшипников коленчатого вала дизеля.

Список использованных источников

1. Тепловоз ТЭМ23 /Текст: – электронный // URL: https://tmholding.ru/upload/TEM23_06.pdf (дата обращения 22.02.2025).
2. Бабошин, А. А. Оценка технического состояния двигателей внутреннего сгорания по току, потребляемому стартером при прокрутке двигателя / А. А. Бабошин, А. С. Косарев, В. С. Малышев // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2013. – Т. 16. – № 1. – С. 33-39.
3. Нечаев, В. В. Методики технического диагностирования цилиндропоршневой группы дизелей холодной пусковой прокруткой коленчатого вала/В.В.Нечаев, Е.В.Воробьев, А.А.Тарасенко *Текст – электронный* //Инженерный вестник Дона. Электронный научный журнал – Северо-Кавказский научный центр высшей школы Южного федерального университета. – 2018. – №3; URL: www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5118 (дата публикации 2018 г.).
4. Губертус, Гюнтер. Диагностика дизельных двигателей. Серия «Автомеханик» / Пер. с нем. Ю. Г. Грудского. – М.: ЗАО «КЖИ «За рулем», 2004 г. – 176 с: ил.
5. Грачев, В. В. Контроль технического состояния цилиндропоршневой группы тепловозного дизеля в период предпусковой холодной прокрутки / В. В. Грачев, А. В. Грищенко, Ф. Ю. Базилевский [и др.] // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2023. – № 9(762). – С. 95-107. – DOI 10.18698/0536-1044-2023-9-95-107. – EDN EDBCTT.
6. Грачев, В. В. Математическая модель процесса холодной прокрутки много-цилиндрового дизеля / В. В. Грачев, А. В. Грищенко, Ф. Ю. Базилевский [и др.] // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2023. – № 11(764). – С. 61-70. – DOI 10.18698/0536-1044-2023-11-61-70. – EDN IDDEFA.
7. Путинцев, С. В. Механические потери в поршневых двигателях: специальные главы конструирования, расчета и испытаний: Учебное пособие / С.В.Путинцев // Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана. – М., 2011. – 274 с., илл.

ФГБОУ ВО ПГУПС, г. Санкт-Петербург.

Кафедра «Локомотивы и Локомотивное хозяйство»

Грачев Владимир Васильевич: д.т.н., профессор.

Грищенко Александр Васильевич: д.т.н., профессор.

Базилевский Федор Юрьевич: к.т.н., доцент.

Шумилов Юрий Юрьевич: ассистент.

УДК 629.423.1 ГРНТИ 73.29.41

П. В. Григоренко, О. В. Мельниченко, А. С. Самойлова

ПОВЫШЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОВОЗА СЕРИИ «ЕРМАК» В РЕЖИМЕ ТЯГИ

Аннотация. *В статье рассмотрен один из существенных недостатков электровозов переменного тока 2(3, 4)ЭС5К серии «Ермак» - низкая энергоэффективность, которая характеризуется коэффициентом мощности, не превышающем 0,84 в режиме тяги. Рассмотрена возможность повышения коэффициента мощности вышеуказанных электровозов за счёт замены тиристорной полупроводниковой базы выпрямительно-инверторных преобразователей на IGBT-транзисторы и реализации предлагаемого способа управления. Представлены результаты моделирования работы электровоза 2ЭС5К на 2,5 зоне регулирования в режиме тяги с тиристорными и транзисторными выпрямительно-инверторными преобразователями, полученные в среде динамического моделирования SimInTech.*

Ключевые слова: *электровоз переменного тока, выпрямительно-инверторный преобразователь, коэффициент мощности, качество электроэнергии, IGBT-транзисторы, моделирование, SimInTech.*

В настоящее время на Восточном полигоне эксплуатируется свыше 1800 электровозов переменного тока 2(3, 4)ЭС5К серии «Ермак» [1]. Данные электровозы являются опорой отечественной экономики, так как играют ключевую роль в обеспечении перевозок грузов широкой номенклатуры. В связи с этим повышение эффективности их эксплуатации всегда было необходимым для увеличения рентабельности грузоперевозок.

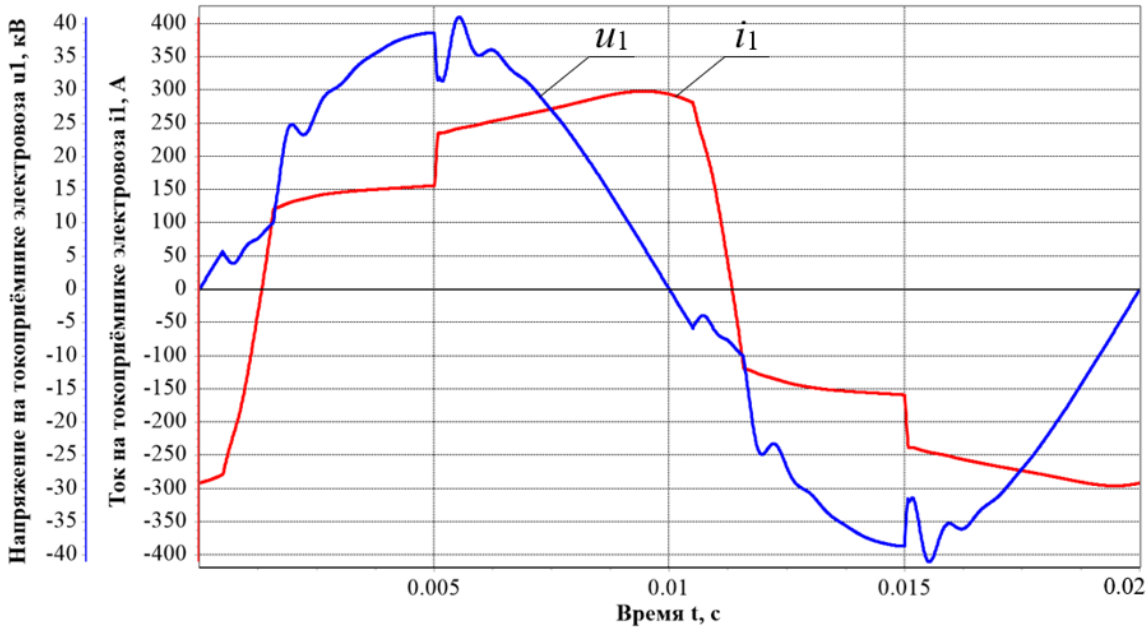
Одним из существенных недостатков электровозов переменного тока 2(3, 4)ЭС5К серии «Ермак» является их низкая энергоэффективность, обусловленная высоким потреблением реактивной мощности, не используемой на тягу поездов. Наличие реактивной мощности, в свою очередь, связано с индуктивностью оборудования электровоза (сглаживающие реакторы и тяговые двигатели), с отсутствием возможности запирать тиристоры, на базе которых выполнены выпрямительно-инверторные преобразователи (ВИП), а также с наличием искажений напряжения и тока на токоприёмнике, вызванных распределённой ёмкостью контактной сети и коммутацией тиристоров. Коэффициент мощности (K_m) электровозов с тиристорными ВИП, определяемый как отношение потребления активной мощности к полной, в среднем составляет 0,705 и не превышает 0,84 в режиме тяги [2, 3], а коэффициент гармонических составляющих напряжения (K_u) на токоприёмнике может достигать 18 % [4], при допустимом по ГОСТ 32144-2014 значении K_u = 5 %. Низкий коэффициент мощности электровозов переменного тока с тиристорными ВИП становится одной из причин их замены на электровозы с асинхронными тяговыми двигателями. Коэффициент мощности

электровоза с асинхронными тяговыми двигателями составляет 0,98-0,99, а коэффициенты гармонических составляющих напряжения (K_u) и тока (K_i) составляют 1,5-3 % и 4,5-15 %, соответственно [5-7].

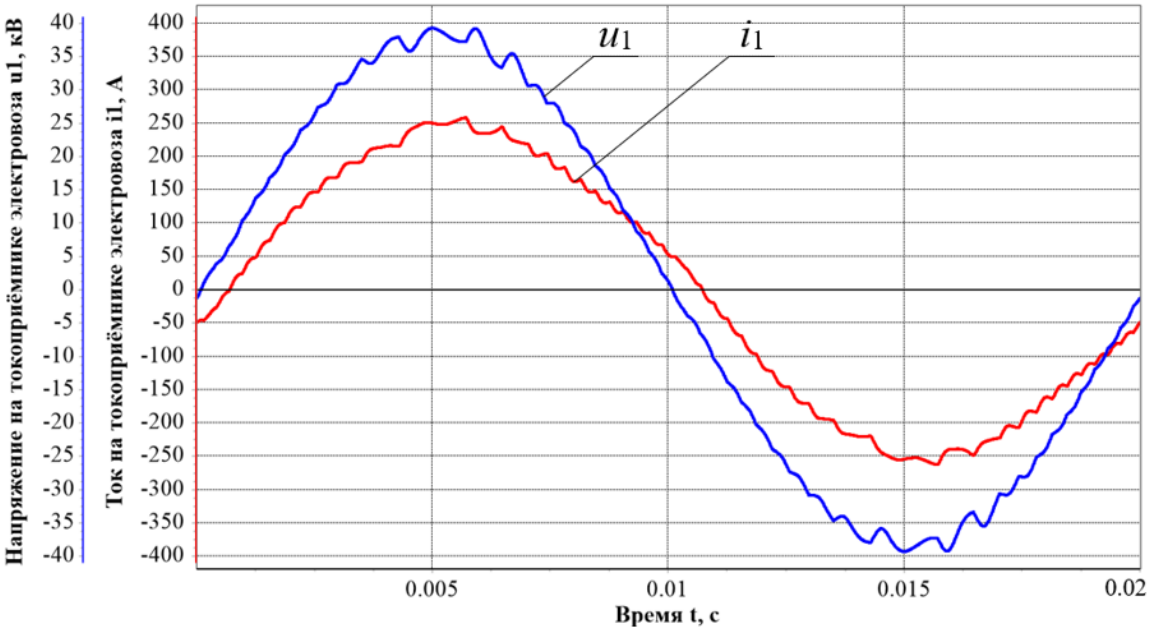
На сегодняшний день появилась возможность преодолеть указанный недостаток электровозов переменного тока с коллекторными тяговыми двигателями за счёт замены тиристорной полупроводниковой базы ВИП на IGBT-транзисторы [8, 9] и реализации предлагаемого авторами способа управления ВИП, повышающего коэффициент мощности практически до уровня электровозов с асинхронными тяговыми двигателями [10, 11]. Способ управления заключается в квантовании сигнала при изменении напряжения управления зонами с целью разнесения управления плечами ВИП электровоза в полупериоде. Таким образом происходит повышение коэффициента мощности электровоза, улучшение формы тока на токоприёмнике и снижение выбросов ЭДС самоиндукции обмоток тяговых трансформаторов. На рисунке 1 представлены результаты моделирования работы электровоза переменного тока 2ЭС5К на 2,5 зоне регулирования в режиме тяги с тиристорными и транзисторными ВИП.

При моделировании заданы следующие параметры модели тяговой сети и электровоза: напряжение тяговых подстанций при двухстороннем питании $U_{ТП}$ = 27,5 кВ; длина межподстанционной зоны $l_{ТП}$ = 40 км; расстояние электровоза от тяговой подстанции $r_{ТП}$ = 20 км; электровоз – 2ЭС5К серии «Ермак»; наименьший допустимый угол открытия тиристоров ВИП в начале каждого полупериода напряжения α_0 = 9 эл. град.; регулируемый угол открытия тиристоров ВИП α_p = 90 эл. град.; ток ВИП I_d = 1620 А; зона регулирования – 2,5. Моделирование выполнено в среде динамического моделирования SimInTech.

На рисунке 2 представлены гармонические составляющие напряжения u_1 (а) и тока i_1 (б) на токоприёмнике электровоза переменного тока 2ЭС5К при работе на 2,5 зоне регулирования с тиристорными и транзисторными ВИП.

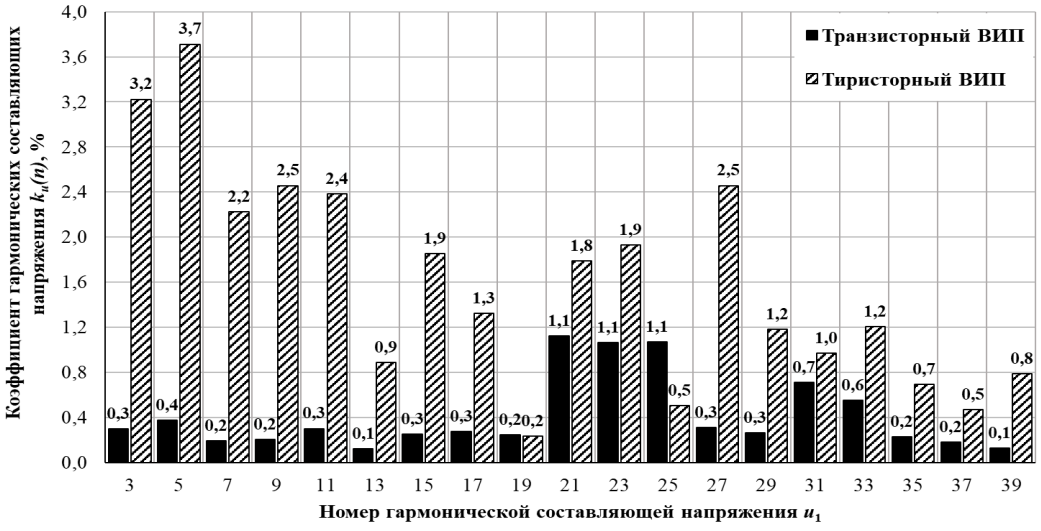


а)

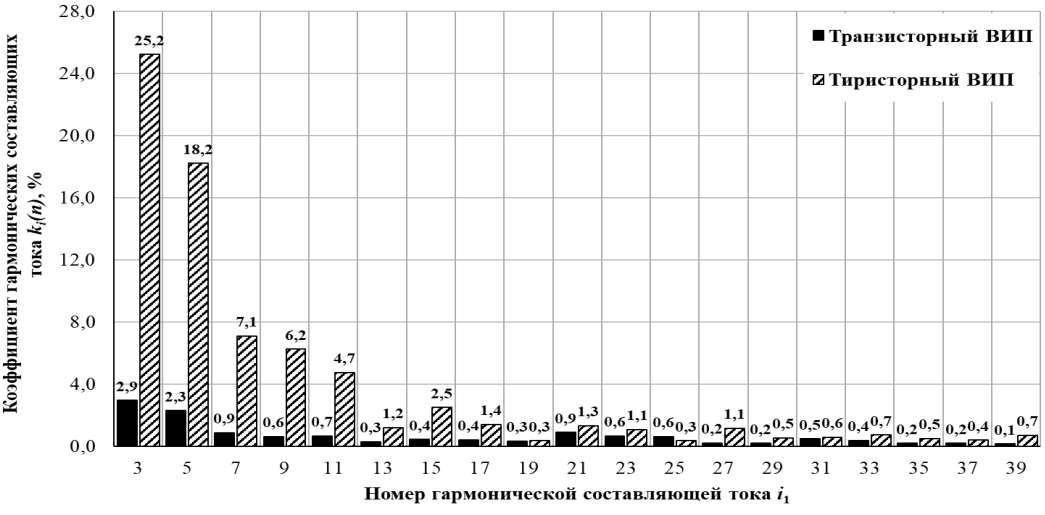


б)

Рисунок 1 – Напряжение u_1 и ток i_1 на токоприёмнике электровоза переменного тока 2ЭС5К при работе на 2,5 зоне регулирования с тиристорными (а) и транзисторными ВИП (б)



а)



б)

Рисунок 2 – Гармонические составляющие напряжения u_1 (а) и тока i_1 (б) на токоприёмнике электровоза переменного тока 2ЭС5К при работе на 2,5 зоне регулирования с тиристорными и транзисторными ВИП

В таблице 1 представлены показатели, полученные при моделировании работы электровоза переменного тока 2ЭС5К с тиристорными и транзисторными ВИП.

Таблица 1 – Показатели, полученные при моделировании работы электровоза переменного тока 2ЭС5К с тиристорными и транзисторными ВИП

Тип ВИП	Показатели								
	$U_{тп}$, кВ	U_1, кВ	I_1, А	$K_м$	K_u, %	K_i, %	S, кВА	Q, кВАр	P, кВт
Тиристорный	27,5	26,74	225	0,78	8,07	33,08	7212,5	4514	5625,3
Транзисторный	27,5	27,16	175	0,99	2,29	4,24	5843,8	646,9	5807,9

Выводы:

1. Отечественные электровозы переменного тока с тиристорными ВИП и коллекторными тяговыми двигателями 2(3, 4)ЭС5К серии «Ермак» выполняют значительную часть работы по перевозке грузов по Восточному полигону, однако при этом имеют существенный недостаток – низкий коэффициент мощности, не превышающий 0,84 в режиме тяги, обусловленный углом отставания тока от напряжения на токоприёмнике и гармоническими составляющими напряжения и тока, достигающими в режиме тяги, на примере 2,5 зоны регулирования, 8,07 % и 33,08 %, соответственно. Этот недостаток затрудняет внедрение новых технологий, например, таких как «Виртуальная сцепка»;
2. Замена тиристорной полупроводниковой базы ВИП на IGBT-транзисторы и реализация предлагаемого способа управления позволит повысить коэффициент мощности электровоза переменного тока 2(3, 4)ЭС5К серии «Ермак» в режиме тяги до 0,99 и значительно снизить гармонические составляющие напряжения и тока на токоприёмнике, на примере 2,5 зоны регулирования, до 2,29 % и 4,24 %, соответственно;
3. Отечественные электровозы переменного тока 2(3, 4)ЭС5К серии «Ермак» при применении ВИП на базе IGBT-транзисторов могут сравняться с электровозами с асинхронными тяговыми двигателями по коэффициенту мощности и показателям качества электроэнергии на токоприёмнике.

Список использованных источников

1. Электровоз 2ЭС5К «Ермак» отмечает двадцатилетие // Газета «Гудок» [сайт] URL: https://gudok.ru/content/tekhnologii/mechengineering/1687599/ (дата обращения: 03.03.2025).

2. Мамошин Р.Р. Энергетика системы переменного тока // Железнодорожный транспорт. 1987. № 9. С. 69–70.

3. Тихменев Б.Н., Кучумов В.А. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями. М.: Транспорт, 1988. 311 с

4. Клинкова О.А. Внутрисистемный учет электрической энергии и контроль ее качества на электровозах переменного тока: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Комсомольск-на-Амуре, 2008. 149 с.

5. Зарифьян А.А., Колпахчьян П.Г. Экспериментальное исследование энергетической эффективности асинхронного тягового привода электровозов при изменяющейся нагрузке // Бюллетень результатов научных исследований. – 2023. – Вып. 1. – С. 77-92. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-77-92

6. Зарифьян А.А., Евстафьев А.М. Показатели качества потребления энергии в коллекторном и асинхронном тяговых приводах электровозов переменного тока // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2023. – Т. 20. – Вып. 4. – С. 987–998. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-987-998

7. Бурков А.Т. Режимы электротяговой сети при эксплуатации электровозов ВЛ-80р и UTY-1 / А.Т. Бурков, М.М. Мирсаитов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2016. – Т. 13, № 2(47). – С. 146-160.

8. Новый выпрямительно-инверторный преобразователь для тягового подвижного состава переменного тока с повышенными энергетическими характеристиками в режиме тяги / Д.А. Яговкин, О.В. Мельниченко, А.Ю. Портной, С.Г. Шрамко // Наука и техника транспорта. – 2014. – № 3. – С. 46-51.

9. Знаенок В.Н. Повышение энергетических показателей электровозов переменного тока в тяжеловесном движении / В.Н. Знаенок, А.О. Линьков // Молодая наука Сибири. – 2021. – № 2(12). – С. 1-7.

10. Разработка способа разнесенного управления транзисторными тяговыми преобразователями электровоза на первой зоне регулирования выпрямленного напряжения / П.В. Григоренко, О.В. Мельниченко, А.Ю. Портной, А.С. Самойлова // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2024. – Т. 21, № 1. – С. 252-264. – DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-252-264.

11. Повышение качества электроэнергии на токоприемнике электровоза переменного тока с транзисторными выпрямительно-инверторными преобразователями в режиме тяги / П.В. Григоренко, О.В. Мельниченко, А.Ю. Портной, А.С. Самойлова // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4(64). – С. 42-54. – DOI: 10.20291/2079-0392-2024-4-42-54.

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

Кафедра «Электроподвижной Состав» (ЭПС)

Григоренко Павел Владимирович, аспирант.

Мельниченко Олег Валерьевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой.

Самойлова А.С., аспирант.

УДК: 629.423.1 ГРНТИ 73.29.41

В. Н. Знаенок, О. В. Мельниченко, А. Ю. Портной, А. О. Линьков

РАЗРАБОТКА СПОСОБА ПОДВОДА ТОКА К ПЛЕЧАМ ВИП ЭЛЕКТРОВОЗА НА БАЗЕ IGBT-ТРАНЗИСТОРОВ С КОЛЛЕКТОРНЫМИ ТЭД

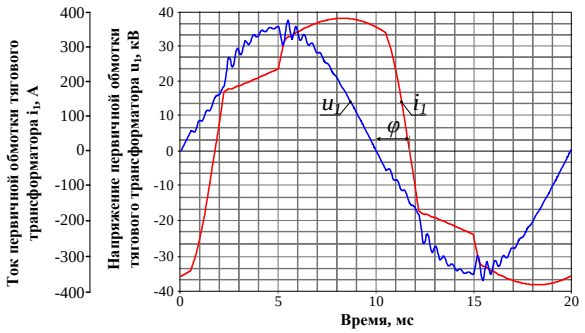
Аннотация. *При разработке энергоэффективного выпрямительно-инверторного преобразователя на базе IGBT-транзисторов для электровозов переменного тока с коллекторным тяговым приводом необходимо обеспечить равномерное распределение токов по параллельно соединенным ветвям в его плечах. В статье рассмотрены способы достижения симметрии токов при параллельном соединении, применяемые в плечах ВИП4000М, а также используемые в преобразователях за рубежом. Предложен и испытан на электровозе Э5К-015 способ подвода тока к плечам ВИП на базе IGBT-транзисторов, обеспечивающий равномерное распределение токов по ветвям без применения специальных выравнивающих устройств.*

Ключевые слова: *электровоз переменного тока; выпрямительно-инверторный преобразователь; параллельное соединение; IGBT; работоспособность.*

В условиях интенсификации грузового движения по железнодорожным магистралям Восточного полигона вопрос необходимости обеспечения мощным и энергоэффективным тяговым подвижным составом является актуальным. Энергоэффективность электровозов переменного тока связана с работой их преобразователей. Сегодня самые современные серии грузовых электровозов «Ермак» оборудованы выпрямительно-инверторными преобразователями (ВИП) на базе тиристоров. Длительная коммутация тиристоров и существующие алгоритмы работы ВИП, приводят к значительному углу сдвига фаз между током и напряжением в контактной сети (КС), генерации в неё реактивной мощности и просадкам напряжения в КС [1]. В результате коэффициент мощности современных электровозов переменного тока составляет не более 0,8 в режиме тяги и 0,65 в режиме рекуперативного торможения [2], что не отвечает требованиям ГОСТ Р 55364-2012, по обеспечению коэффициента мощности электровоза переменного тока в продолжительном режиме тяги не менее 0,9 [3].

Современной альтернативой ВИП на базе тиристоров и алгоритмам его управления является ВИП на базе IGBT-транзисторов, разработанный учеными ИрГУПС. Согласно исследований [4-7] при работе ВИП на базе IGBT-транзисторов, коэффициент мощности электровозов переменного тока в режимах тяги и рекуперативного торможения составляет не менее 0,95, а просадки напряжения в КС при пропуске поездов снижаются втрое. На рисунке 1 представлены диаграммы токов и напряжений в первичной обмотке тягового трансформатора (ТТ) электровоза при работе тиристорного (рис.1 а) и транзисторного (рис.1 б) ВИП [6].

а)



б)

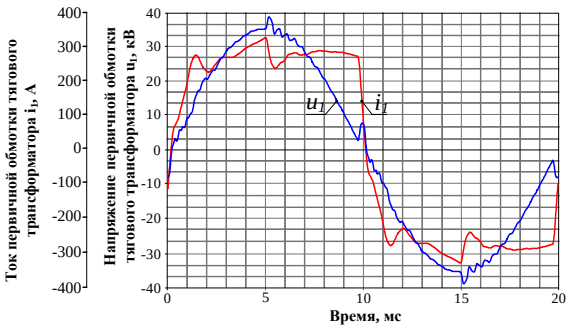


Рисунок 1 – Осциллограммы напряжения и тока в первичной обмотке ТТ при работе электровоза с тиристорным (а) и транзисторным (б) ВИП

Использование современной силовой базы в преобразователях ТПС позволит более рационально расходовать электроэнергию из сети, что обеспечит увеличение количества пар поездов на участках железных дорог и снижение межпоездного интервала до 5 минут, также способствуя более интенсивному развитию пропуска поездов по технологии «Виртуальной сцепки» [8]. Опираясь на вышеприведенное, следует, что рассмотрение вопросов построения ВИП на базе IGBT-транзисторов для электровозов с коллекторными ТЭД актуально.

Значимым этапом конструирования ВИП является разработка его плеч. Для обеспечения заданного запаса по току в плечах ВИП применяется параллельное соединение силовых полупроводников. Их количество определяется по формуле (1):

$$m = \frac{I}{I_{\text{п}} \cdot k_I}, \tag{1}$$

где I – ток плеча преобразователя, А;

$I_{\text{п}}$ – предельный ток полупроводника, А;

k_I – коэффициент использования полупроводников по току.

Для большинства эксплуатируемых на Восточном полигоне электровозов переменного тока характерна схема потележечного регулирования силы тяги, когда два тяговых электродвигателя (ТЭД) параллельно подключены к одному ВИП. При такой схеме в плечах ВИП протекает двойной ток ТЭД, и в них соединены параллельно 4 ветви, которые содержат в себе силовые полупроводники, их снабберные цепи и цепи выравнивания напряжения и токов.

При параллельном соединении полупроводников необходимо решать задачу обеспечения равномерного распределения тока. В плечах ВИП4000М для этого применены три решения: подбор тиристоров по ВАХ, включение последовательно в цепи выравнивающих устройств – индуктивных делителей и диагональный подвод тока [9].

Подбор полупроводников по ВАХ характеризуется значительными трудозатратами и при этом не исключает человеческий фактор. Для транзисторного ВИП подбор IGBT-транзисторов по ВАХ осуществляется заводом их изготовителем.

Индуктивные делители бывают с магнитной связью, как, например, в выпрямительной установке возбуждения ВУВ-24, либо без магнитной связи, как в плечах

ВИП-4000М. Установка индуктивных делителей увеличивает индуктивность в цепи и ведёт к повышению перенапряжений, величина которых может оказаться критичной для IGBT-транзисторов, характеризующихся высокой скоростью коммутации.

Диагональный подвод тока заключается в подключении шины переменного тока к одной крайней параллельной ветви плеча, а шины постоянного тока - к противоположной. Диагональный подвод обеспечивает равный токовый путь между собой для двух крайних ветвей и для двух внутренних, о чём отмечается в работе [10], однако между крайними и внутренними ветвями разброс тока остается значительным, что делает данное решение неэффективным.

Внимание к способу подводу тока также уделяется в зарубежной практике построения преобразовательной техники на базе IGBT-транзисторов. С целью получения равномерного распределения токов используют специальные конструкции токоведущих шин [11-14]. Так, например, группой инженеров Hitachi Ltd предложено конструктивное решение соединения фазных модулей электрического силового преобразователя с параллельными плоскими пластинчатыми шинами, в которой шины с противоположным направлением течения тока расположены рядом друг с другом [11]. Такое расположение позволяет существенно снизить индуктивность схемы соединения соответствующих полупроводниковых модулей и улучшить распределение токов по параллельно включённым силовым полупроводникам. На рисунке 2 показана упрощенная принципиальная схема и конструктивное исполнение фазного модуля.

Преимущество такой схемы соединений с параллельными плоскими шинами состоит в том, что изменения магнитного потока в шинах с противоположным направлением течения тока взаимно компенсируют друг друга и не проявляются на выходе схемы, уменьшая таким образом взаимоиндукцию проводников.

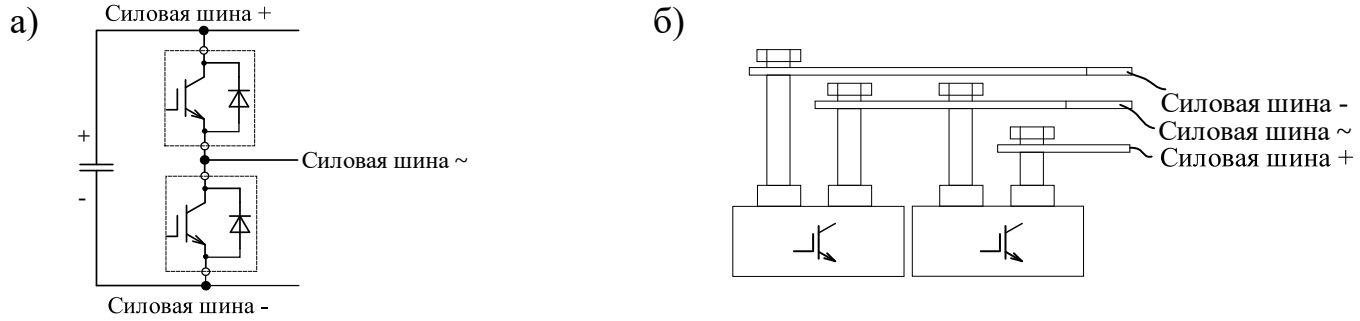


Рисунок 2 – Упрощенная принципиальная схема (а) и конструктивное исполнение (б) одной фазы электрического преобразователя с параллельными плоскими пластинчатыми шинами

Недостатком конструкции является ограниченность ее применения только для фазовых сборок с модульным исполнением IGBT-транзисторов. В преобразователе с IGBT-транзисторами вида Press-pack, применять такую схему соединения нецелесообразно, так как удаленность силовых выводов между собой, вызванная значительными габаритами радиаторов охлаждения, приведёт к изменению строгой

геометрии, предложенной в фазовом модуле, и ликвидации эффекта, обеспечивающего снижение индуктивности силовой цепи.

В итоге существующие выравнивающие устройства неприменимы для ВИП электровоза переменного тока на базе IGBT-транзисторов. При проектировании силового плеча ВИП на базе IGBT-транзисторов поставлена цель разработать способ подвода тока, обеспечивающий равномерное распределение тока по параллельным ветвям плеча ВИП на базе IGBT-транзисторов без применения выравнивающих устройств. Данная цель достигнута в ходе исследований, описанных в [15] - разработан способ подвода тока к плечу ВИП на базе IGBT-транзисторов, обеспечивающий равномерное распределение токов [16]. Разработанный способ подвода тока представлен на примере плеча *VT7* на рисунке 3.

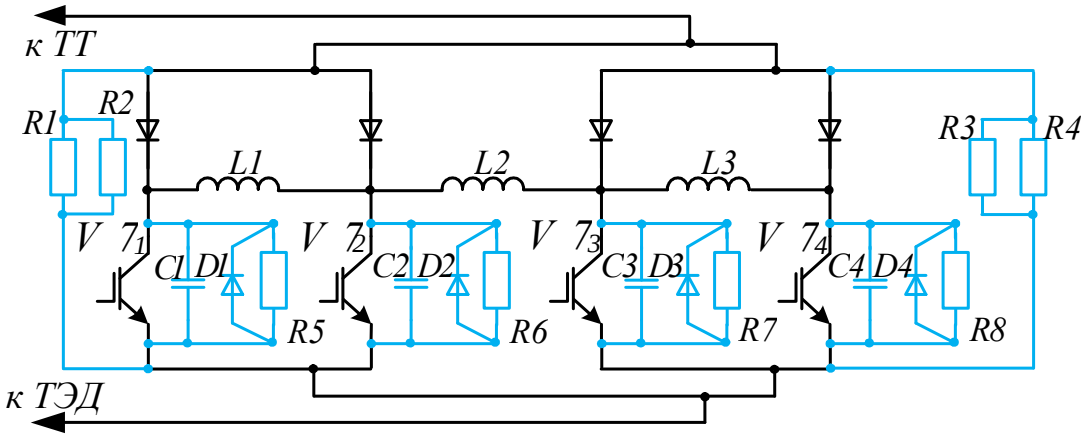


Рисунок 3 – Предложенный способ подвода тока к плечу ВИП на базе IGBT-транзисторов с равномерным распределением токов по параллельным ветвям

В данной работе поставлена цель выполнить испытание предложенного технического решения на электровозе Э5К-015, приписанного к эксплуатационному локомотивному депо Иркутск-Сортировочный Восточно-Сибирской железной дороги и оборудованного ВИП на базе IGBT-транзисторов. Для этого шинный монтаж плеч ВИП электровоза Э5К-015 на базе IGBT-транзисторов выполнен в соответствии с предложенным способом. Исследования распределения токов по параллельным ветвям осуществлено на примере плеча *VT7*, на каждую параллельную ветвь которого установлены пояса Роговского (*T1-T4*) LEM ART-D22 D125. На рисунке 4 представлена упрощенная силовая схема тележки электровоза Э5К-015, оборудованного ВИП на базе IGBT-транзисторов с предложенным способом подвода тока к плечам. Сигнал с поясов Роговского после интегрирования фиксировался с помощью ЭВМ, а также цифровым осциллографом Tektronix TDS 2024C. Пояс Роговского, их размещение на ветвях плеча ВИП и вывод осциллограмм представлены на рисунке 5.

Анализ распределения токов по параллельным ветвям плеча VT7 ВИП на базе IGBT-транзисторов с предложенным способом подвода выполнен в ходе опытной поездки электровоза Э5К-015 на 3.5 зоны регулирования напряжения. Полученные осциллограммы представлены на рисунке 6.

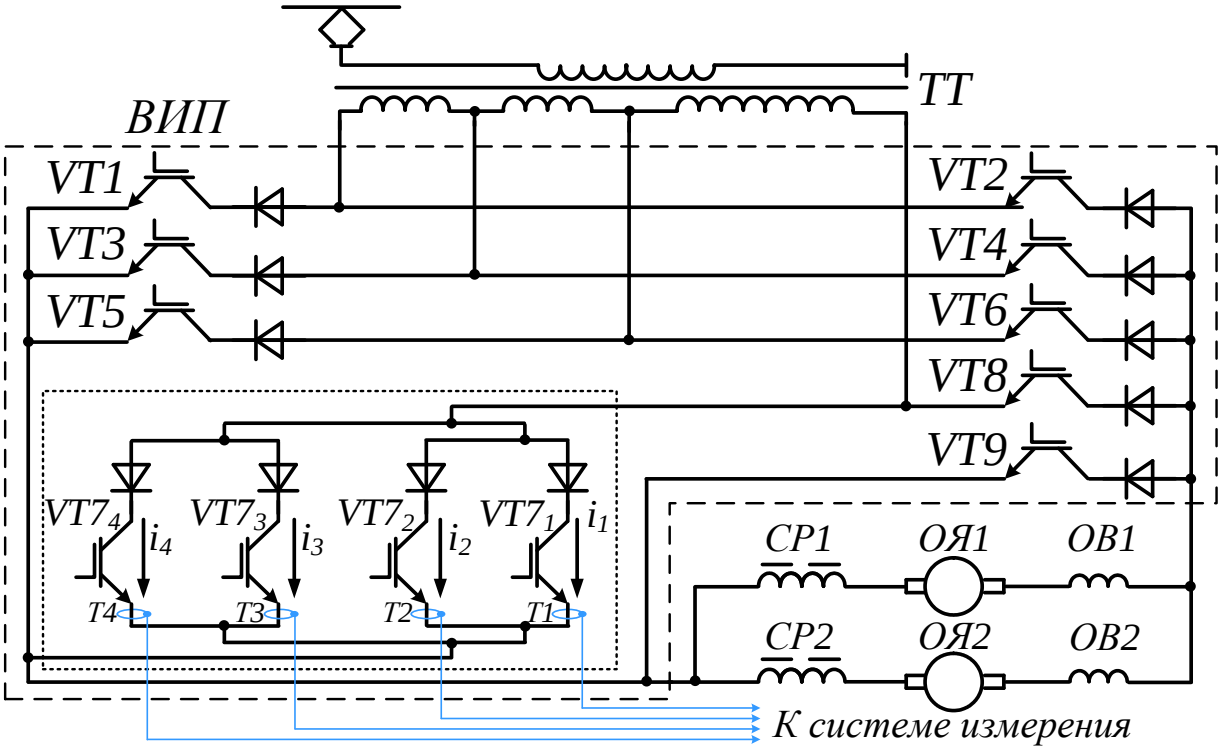
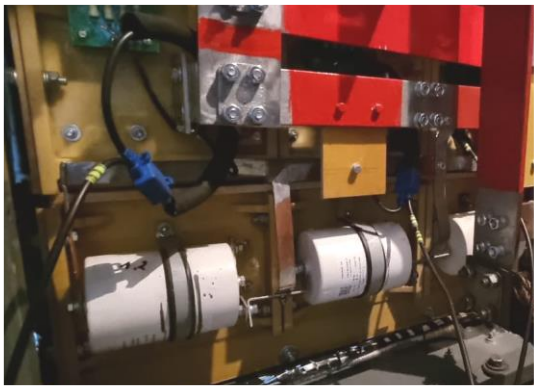


Рисунок 4 - Упрощенная силовая схема тележки электровоза, оборудованного ВИП на базе IGBT-транзисторов с предложенным способом подвода тока к плечу VT7

а)



б)

в)

Рисунок 5 – Испытание предложенного способа подвода тока к параллельным ветвям плеча ВИП на базе IGBT-транзисторов на электровозе Э5К-015:
а) – установленные пояса Роговского на параллельные ветви плеча ВИП;
б) – вывод значений на ЭВМ и осциллограф Tektronix TDS 2024;
в) – пояс Роговского LEM ART-D22 D125

Анализ распределения токов по параллельным ветвям плеча VT7 ВИП на базе IGBT-транзисторов с предложенным способом подвода выполнен в ходе опытной поездки электровоза Э5К-015 на 3.5 зоны регулирования напряжения. Полученные осциллограммы представлены на рисунке 6.

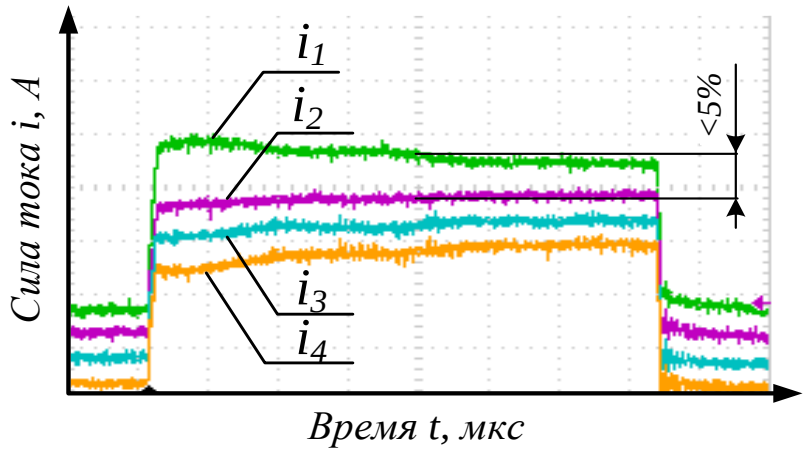


Рисунок 6 – Диаграммы распределения тока по параллельным ветвям плеча ВИП на базе IGBT-транзисторов с предложенным способом подвода тока

Исходя из результатов испытания, представленных на рисунке 6, можем наблюдать удовлетворительное распределение тока по параллельным ветвям плеча ВИП на базе IGBT-транзисторов: в течение периода проводящего состояния разброс между токами не превышает 5 %. Таким образом, предложенный способ подвода тока позволяет обеспечить равномерное распределение токов по параллельным ветвям без применения специальных выравнивающих устройств в цепи.

ВЫВОДЫ:

1. Топология подключения силовых шин к ВИП на базе IGBT-транзисторов оказывает влияние на распределение токов по параллельно включённым силовым полупроводникам;

2. Диагональный способ подвода тока к плечам, используемый в ВИП4000М, не обеспечивает равномерное распределение токов по ветвям в плечах ВИП на базе IGBT-транзисторов;

3. Предложен способ подвода тока к плечам ВИП на базе IGBT-транзисторов, обеспечивающий равномерное распределение токов по параллельным ветвям без применения выравнивающих устройств, который по результатам испытаний на электровозе Э5К-015 подтвердил свою эффективность: разброс токов не превышает 5%.

Список использованных источников

1. Влияние индуктивности на входе выпрямительно-инверторного преобразователя на базе IGBT-транзисторов электровоза переменного тока на работоспособность его плеч при параллельном соединении ветвей / В. Н. Знаенок, О. В. Мельниченко, А. Ю. Портной, А. О. Линьков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2023. – № 2(78). – С. 33-41. – DOI 10.26731/1813-9108.2023.2(78).33-41.

2. Томилов, В. С. Влияние блока балластных резисторов на КПД электрической цепи электровоза переменного тока / В. С. Томилов // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 3(55). – С. 138-144. – DOI 10.20291/2079-0392-2022-3-138-144.

3. ГОСТ Р 55364-2012. Электровозы. Общие технические требования. – Москва : Стандартинформ, 2013. – 36 с. – Текст : непосредственный.

4. Знаенок В. Н. Выпрямительно-инверторный преобразователь электровоза на базе IGBT-транзисторов как способ повышения пропускной способности участков железной дороги / В. Н. Знаенок, А. О. Линьков, О. В. Мельниченко // Известия Транссиба. – 2021. – № 1(45). – С. 66-75.

5. Новый выпрямительно-инверторный преобразователь для тягового подвижного состава переменного тока с повышенными энергетическими характеристиками в режиме тяги / Д. А. Яговкин, О. В. Мельниченко, А. Ю. Портной, С. Г. Шрамко // Наука и техника транспорта. – 2014. – № 3. – С. 46-51.

6. Макашева С.И., Пинчуков П.С., Мельниченко О.В. Оценка потерь напряжения в тяговой сети при работе электровозов с выпрямительно-инверторными преобразователями на базе тиристоров и IGBT-транзисторов // Известия Транссиба, 2022. № 3 (51). С. 112–125.

7. Повышение качества электроэнергии на токоприемнике электровоза переменного тока с транзисторными выпрямительно-инверторными преобразователями в режиме тяги / П.В. Григоренко, О.В. Мельниченко, А.Ю. Портной, А.С. Самойлова // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4(64). – С. 42-54. – DOI: 10.20291/2079-0392-2024-4-42-54.

8. Бушуев, С. В. Повышение пропускной способности участка железной дороги с применением технологии виртуальной сцепки / С. В. Бушуев, К. В. Гундырев, Н. С. Голочалов // Автоматика на транспорте. – 2021. – Т. 7, № 1. – С. 1-20. – DOI 10.20295/2412-9186-2021-7-1-7-20.

9. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К): Руководство по эксплуатации. Книга 5. Описание и работа. Электронное оборудование. Преобразователи. ИДМБ.661142.009.РЭ5. Новочеркасск: ВЭлНИИ, 2005. 125 с.

10. Некрасов О.А., Лисицин А.Л., Мугинштейн Л.А., Рахманинов В.И. Режимы работы магистральных электровозов. М.: Транспорт, 1983. 231 с.

11. Патент № 2190919 C2 Российская Федерация, МПК H02M 7/219, H02M 7/00, H02M 7/04. Силовая цепь электрического силового преобразователя : № 99109135/09 : заявл. 27.04.1999 : опубл. 10.10.2002 / С. Ито, К. Наката, А. Койанаги [и др.].

12. Колпаков, А. Многослойная шина и модули SEMISTACK от SEMIKRON / А. Колпаков // Силовая электроника. – 2004. – № 1. – С. 32-36.

13. Патент № 2546979 C1 Российская Федерация, МПК H02M 7/487. Многослойная шина для силового преобразователя и силовой преобразователь : № 2013144660/07 : заявл. 07.10.2013 : опубл. 10.04.2015 / Я. Ли, Х. Гань, С. Вэнь, Ц. Ин ; заявитель ДЕЛЬТА ЭЛЕКТРОНИКС, ИНК.

14. Патент № 2701870 C1 Российская Федерация, МПК H05K 7/14, H01L 25/11. Фазный модуль для полупроводникового преобразователя электроэнергии : № 2018139471 : заявл. 24.03.2017 : опубл. 02.10.2019 / Ш. Бойгк, Ю. Бемер, Р. Клеффель, Э.У. Крафт, Я. Вайгель ; заявитель СИМЕНС АКЦИЕНГЕЗЕЛЛЬШАФТ.

15. Знаенок, В. Н. Разработка способа подвода тока к плечу выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза на базе IGBT-транзисторов / В. Н. Знаенок, О. В. Мельниченко, А. Ю. Портной // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2024. – № 3(75). – С. 10-19.

16. Патент № 2808309 C1 Российская Федерация, МПК B60L 9/12, H02M 7/219, H02G 5/02. Способ подключения системы токопроводящих шин к параллельным ветвям плеча преобразователя однофазно-переменного тока : № 2023112388 : заявл. 11.05.2023 : опубл. 28.11.2023 / В. Н. Знаенок, А. Ю. Портной, О. В. Мельниченко, А. О. Линьков ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Иркутский государственный университет путей сообщения.

ФГБОУ ВО ИрГУПС, г. Иркутск

Знаенок Вячеслав Николаевич: аспирант, заведующий лабораторией каф. «ЭПС».

Мельниченко Олег Валерьевич: д.т.н., профессор, зав. каф. «ЭПС».

Портной Александр Юрьевич: д.т.н., профессор каф. «ФМиП».

Линьков Алексей Олегович: к.т.н., доцент каф. «ЭПС».

УДК 629.423.001.57:629.423.002.57 ГРНТИ 47.31.15

К. С. Капитонов

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ЗАПРАВКИ БУКС МОТОРНО-ОСЕВЫХ ПОДШИПНИКОВ ЭЛЕКТРОВОЗОВ И ИХ НЕДОСТАТКОВ

Аннотация. *В статье проведен анализ существующих методов заправки букс моторно-осевых подшипников (МОП) электровозов с учетом международного опыта и бенчмаркинга методов. Рассмотрены технические характеристики и принципы работы традиционных систем заправки, их преимущества и недостатки. Особое внимание уделено проблемам, связанным с неполнотой заправки, переливом смазки и отсутствием точного контроля уровня смазки в запасной камере буксы МОП. Показано, что существующие методы не обеспечивают точного контроля уровня смазки, что приводит к экономическим и экологическим рискам. Представлены данные о влиянии неправильной заправки на ресурс МОП и безопасность эксплуатации электровозов. Обоснована необходимость разработки новых методов и систем заправки, которые бы позволяли автоматизировать процесс, исключить перелив смазки и обеспечить постоянный контроль уровня смазки.*

Ключевые слова: *моторно-осевые подшипники, заправка букс, смазочные материалы, экологические риски, автоматизация процесса, контроль уровня смазки.*

Kapitonov K.S.
Joint Stock Company «Design&Research Institute for Information Technology, Signaling and Telecommunication on Railway Transport» (JSC «NIIAS»)

ANALYSIS OF EXISTING METHODS OF FILLING AXLE BOXES OF MOTOR-AXIAL BEARINGS OF ELECTRIC LOCOMOTIVES AND THEIR DISADVANTAGES

Abstract. *The article analyzes the existing methods of filling axle boxes of motor-axial bearings (MOS) of electric locomotives, taking into account international experience and benchmarking methods. The technical characteristics and principles of operation of traditional refueling systems, their advantages and disadvantages are considered. Special attention is paid to the problems associated with incomplete refueling, overfilling of grease and lack of accurate control of the level of grease in the spare chamber of the axle box. It is shown that the existing methods do not provide accurate control of the lubrication level, which leads to economic and environmental risks. Data on the impact of improper refueling on the life of the MOS and the safety of operation of electric locomotives are presented. The necessity of developing new refueling methods and systems is justified, which would allow automating the process, eliminating overfilling of grease and ensuring constant monitoring of the level of lubrication.*

Keywords: *motor-axial bearings, axle box filling, lubricants, environmental risks, process automation, lubrication level control.*

Введение

Моторно-осевой подшипник (МОП) является одним из ответственных и нагруженных узлов в колесно-моторных блоках (КМБ) электровоза, и в немалой степени влияет на надежность работы всего электровоза [1, 2, 3, 4, 5]. От надежности и правильного технического обслуживания МОП зависит безопасность и бесперебойность движения поездов.

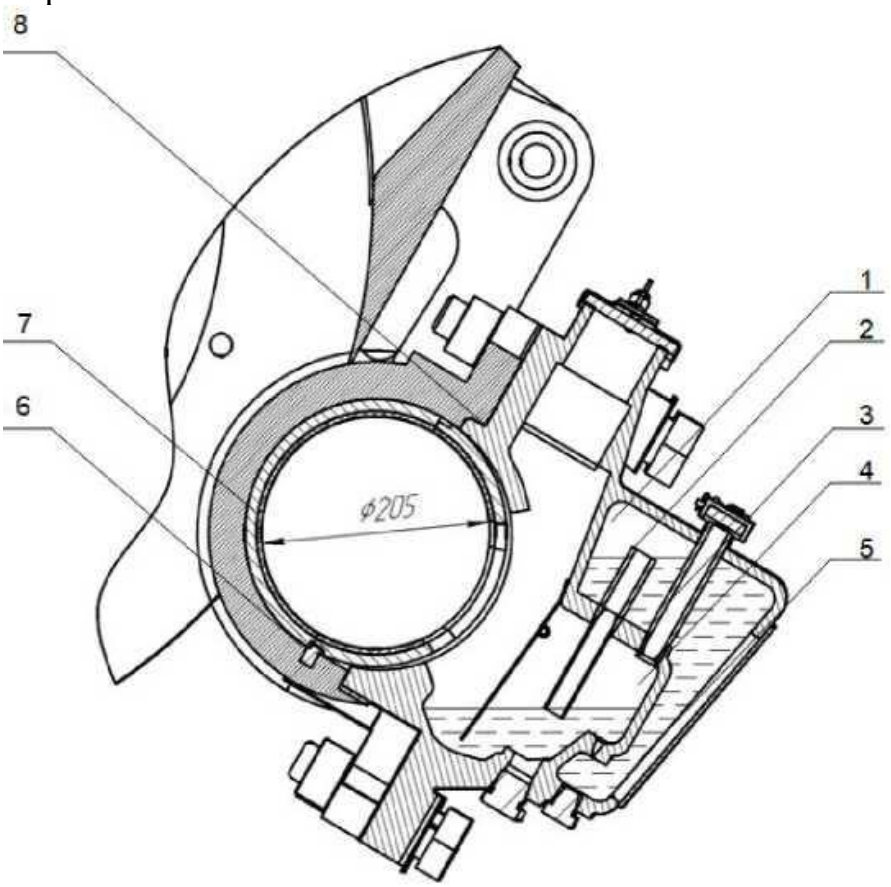
Одним из ключевых факторов, влияющих на ресурс МОП, является правильная заправка смазкой. Несмотря на существующие методы и технологии для заправки букс МОП, до сих пор остаются проблемы, связанные с неполнотой заправки, переливом смазки и отсутствием точного контроля уровня смазки в запасной камере буксы.

Целью данной статьи является анализ существующих методов заправки букс МОП, выявление их недостатков и обоснование необходимости разработки новых решений.

МОП и существующие методы заправки

На железнодорожном транспорте смазка используется в различных механизмах и машинах. В частности, смазка используется непосредственно для смазывания МОП тяговых двигателей электровоза, и ее экологическое воздействие оказывается особенно существенным [6].

Стандартный МОП (Рисунок 1) представляет собой подшипник скольжения, а также буксовый узел, в который заливается смазка, обеспечивающая минимальное трение с осью колесной пары.



1 - запасная камера; 2 - перепускная трубка; 3 - трубка для заправки подшипников; 4 - рабочая камера; 5 - букса с постоянным уровнем смазки; 6 - шпонка; 7 - вкладыш; 8 - стальная прокладка.

Рисунок 1 - Основная конструкция узла МОП электровозов

МОП является одним из ответственных узлов механической части электровоза, и в немалой степени влияет на надежность работы всего электровоза и безопасность движения поездов [1, 2, 3, 4, 5, 7, 8]. Так, при нагреве оси колесной пары вызванном неудовлетворительной работой МОП, возникает аварийная ситуация, остановка поезда на перегоне, вызов вспомогательного локомотива – всё это вызывает рост эксплуатационных расходов.

В настоящее время остается актуальным поиск технических решений для достижения:

- безаварийной работы МОП в эксплуатации [9];
- экономии смазочных композиций [10, 11, 12];
- уменьшения трудоёмкости обслуживания МОП [13];
- снижения негативного воздействия на окружающую среду [14].

Традиционные методы заправки МОП

Наиболее распространенным методом заправки букс МОП является ручная заправка с использованием масленок и шприцев. Этот метод предполагает визуальный контроль уровня смазки оператором и заправку до тех пор, пока смазка не начнет вытекать из заправочной горловины. Однако такой метод имеет ряд недостатков:

1. Неточность контроля уровня смазки: слесарь (оператор) не может точно определить уровень смазки в запасной камере, что приводит к неполноте заправки или переливу смазки.
2. Зависимость от квалификации персонала: результат заправки во многом зависит от опыта и внимательности слесаря (оператора).
3. Высокий риск перелива смазки: при ручной заправке часто происходит перелив смазки через заправочную горловину, что приводит к экономическому ущербу и экологическим проблемам.
4. Отсутствие автоматизации: процесс заправки занимает много времени и требует постоянного участия рабочего персонала.

Автоматизированные системы заправки МОП

В последние годы все шире внедряются автоматизированные системы заправки, которые позволяют дозировать количество заправляемой смазки и автоматически отключаться при достижении заданного уровня. Однако и эти системы имеют свои недостатки:

1. Отсутствие контроля уровня смазки в реальном времени: многие автоматизированные системы не контролируют уровень смазки в запасной камере, а лишь дозируют количество заправляемой смазки.
2. Невозможность учета индивидуальных особенностей букс: различные серии локомотивов имеют разные конструкции букс МОП, что требует адаптации системы заправки.
3. Высокая стоимость и сложность технической поддержки: автоматизированные системы требуют значительных капиталовложений и специализированного персонала для поддержки его работоспособности.

Проблемы существующих методов заправки МОП

Неполнота заправки

Неполнота заправки приводит к уменьшению срока службы МОП, увеличению трения и нагреву узла. Это может привести к серьезным неисправностям и даже авариям.

Перелив смазки

Перелив смазки не только является пустой тратой ресурсов, но также приводит к загрязнению окружающей среды. В ходе эксплуатации смазка попадает на железнодорожное полотно.

Смазочные материалы, вытекающие на рельсы и землю, создают экологическую угрозу и требуют дополнительных затрат на уборку и очистку. При наличии в смазке водорастворимых компонентов (например, поверхностно-активные вещества) они легко вымываются атмосферными осадками и могут попадать в близлежащие водоемы, унося с собой в виде эмульсии нефтяные составляющие смазки. И хотя к смазкам для лубрикации механизмов предъявляются достаточно жесткие требования со стороны экологических норм, тем не менее, некоторые из них содержат тяжелые металлы (молибден, вольфрам), летучие углеводороды или другие вредные компоненты [14, 15, 16, 17].

Отсутствие контроля уровня смазки

Отсутствие точного контроля уровня смазки в запасной камере не позволяет прогнозировать остаточный ресурс МОП и своевременно принимать меры по их обслуживанию.

Заключение

Анализ существующих методов заправки букс МОП показывает, что они имеют ряд недостатков, которые влияют на эксплуатационную надежность электровозов и экологическую безопасность. Для решения этих проблем необходима разработка новых методов и систем заправки, позволяющих автоматизировать процесс и учет смазочных ресурсов, исключить перелив смазки и обеспечить постоянный контроль уровня смазки в запасной камере буксы МОП. Это позволит повысить ресурс МОП, снизить эксплуатационные расходы и уменьшить негативное воздействие на окружающую среду.

Библиографический список:

1. А.И. Беляев, В.А Кондратов, Л.И. Родова. Опорно-рамный тяговый привод // В сб.; Исследование узлов и агрегатов тепловозов. Труды ВНИТИ. Вып. 52. Коломна, 1980. С. 69-73.
2. Алексеев А.Е. Тяговые электродвигатели. М.: Трансжелдориздат, 1955. 411 с.
3. Анализ методов повышение надежности несущей конструкции корпуса моторно-осевого подшипника колесо-моторного блока магистрального локомотива / Ветошко Т.В., Антипин Д.Я. // Наука молодых - Будущее России / ЗАО «Университетская книга». Курск. - 2018 - С. 18-21.

4. Анализ работоспособности моторно-осевого подшипника в узлах колесно-моторного блока / В.А. Тиунов // Инновационные механизмы решения проблем научного развития / ООО «Омега сайнс». Уфа. - 2016 - С. 71-74.
5. Лорман Л.М. Больше внимания моторно-осевым подшипникам // Локомотив. 2004, № 11. С. 21–25.
6. Инструкция по применению смазочных материалов 01ДК.421457.001И «Локомотивы и мотор-вагонный подвижной состав» в ред. от 06.09.2016 г.
7. Ветров Ю.Н., Приставко М.В. Конструкция тягового подвижного состава. Учебник для техникумов ж.д. тр-та, / Под ред. Ветрова Ю.Н. М., Желдориздат, 2000. 316 с.
8. ПКБ ЦТ.06.0079 от 27.01.2014. Электровоз ВЛ85. Руководство по техническому обслуживанию, текущему и деповскому ремонту
9. Протасов Ф.А. автоматизированная система для контроля работы моторно-осевых подшипников электровозов / Ф.А. Протасов, М.Ю. Кейно / Вестник всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения - Новочеркасск, 2010. - № 1. - с. 153-157
10. Ляшенко В.В. Автоматизированное устройство дозаправки буксы МОП локомотивов при поездной работе /Наука и образование транспорту. - Самара. - 2015. - № 1. - С. 14-16.
11. О применении пластичных смазок в МОП / Б.З. Акбашев, А.Н. Германов, Н.Н. Каменев, В.А. Азаренко / Вестник ВНИИЖТ. 1984. № 5. С. 27-30.
12. ООО «Трас-Атом». Каталог нестандартного технологического оборудования 2016. «Заправочное устройство ПМ3-03» [Электронный ресурс] https: //trans-atom. com/page/index. html, 04.02.2018.
13. Пат. 2273580 Российская Федерация, МПК B61F 17/04/ Устройство для заправки маслом двухкамерной буксы моторно-осевого подшипника / Бабушкин В.Д., Кураев А.А., Колонда В.В., Зорин В.Б.; заявитель и патентообладатель Сибирский филиал ФГУП ВНИ и конструкторско-технологический институт МПС РФ - № 2004134781/11; заявл. 29.11.2004; опубл. 10.04.2006, Бюл. № 10.
14. Влияние нефти и нефтепродуктов на различные компоненты окружающей среды / Шамраев А.В., Шорина Т.С. // Вестник ОГУ - 2009 - № 6 (100) - С. 642-645.
15. Вредные химические вещества. Природные органические соединения. Изд. Справ. - энциклопедического типа. Том 7/Под ред. В. А. Филова. - СПб.: СПХФА, НПО «Мир и семья-95», 1998.
16. ГОСТ 30333-2007. Паспорт безопасности химической продукции. Общие требования.
17. ГОСТ 610-72 Масла осевые: Технические условия / Межгосударственный стандарт. Издание 06.2011 г. с Изменениями № 1, 2, утвержденными в октябре 1983 г., сентябре 1990 г. (ИУС 1-84, 9-90) - М.: ФГУП «Стандартинформ», 2011. - 4 с.

АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС», г. Москва)

Капитонов Константин Сергеевич

УДК 65.011.5 ГРНТИ 55.47.35

К. С. Капитонов

О ФОРМИРОВАНИИ ЕДИНОГО ПОЛЯ КОМПЕТЕНЦИЙ В СФЕРЕ АКТУАЛЬНЫХ ИННОВАЦИЙ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Аннотация. *В статье рассматривается проблема интеграции инновационных технологий в железнодорожную отрасль России через формирование единого поля компетенций работников. Акцент сделан на необходимости синхронизации образовательных программ, профессиональных стандартов и корпоративных требований в условиях активного внедрения на железнодорожном транспорте инновационных разработок АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»), включая Восточный полигон российских железных дорог. Предложена многоуровневая модель обучения, объединяющая традиционные и цифровые форматы, а также адаптированная под потребности различных поколений сотрудников. Особое внимание уделено рискам, связанным с человеческим фактором, и методам их минимизации за счёт системного подхода к подготовке кадров. Результаты исследования могут быть использованы для повышения конкурентоспособности отечественного железнодорожного транспорта.*

Ключевые слова: *единое поле компетенций, инновации, железнодорожный транспорт, обучение, АО «НИИАС», Восточный полигон, человеческий фактор.*

ON THE FORMATION OF A UNIFIED FIELD OF COMPETENCIES IN THE FIELD OF RELEVANT INNOVATIONS IN RAILWAY TRANSPORT

Kapitonov K.S.

Joint Stock Company «Design&Research Institute for Information Technology, Signaling and Telecommunication on Railway Transport» (JSC «NIIAS»)

Abstract. *The article examines the problem of integrating innovative technologies into the Russian railway industry through the formation of a unified field of employee competencies. The emphasis is placed on the need to synchronize educational programs, professional standards and corporate requirements in the context of the active implementation of innovative developments of JSC NIIAS in railway transport, including the Eastern Polygon of Russian Railways. A multi-level training model is proposed that combines traditional and digital formats, as well as adapted to the needs of different generations of employees. Special attention is paid to the risks associated with the human factor and methods of minimizing them through a systematic approach to personnel training. The results of the study can be used to increase the competitiveness of domestic railway transport.*

Keywords: *unified field of competence, innovation, railway transport, training, JSC NIIAS, Vostochny polygon, human factor.*

Введение

Развитие высокоскоростных магистралей и цифровизация железнодорожной отрасли России требуют создания единого поля компетенций, обеспечивающего интеграцию передовых технологий в повседневную практику. Особую значимость

данный вопрос приобретает в контексте реализации проектов на Восточном полигоне российских железных дорог (ОАО «РЖД»), где внедрение интеллектуальных систем управления движением поездов и автоматизации инфраструктуры становится ключевым элементом обеспечения технологического суверенитета [1]. Однако успешность таких инициатив напрямую зависит от уровня подготовки персонала, способного работать с инновационными решениями, такими как разработки АО «НИИАС» – «виртуальная сцепка» и «подвижный блок-участок» [2].

Цель статьи – предложить модель формирования единого поля компетенций, объединяющую образовательные, корпоративные и технологические аспекты, с акцентом на снижение рисков, связанных с человеческим фактором.

Проблематика внедрения инноваций

Внедрение передовых технологий на железнодорожном транспорте сталкивается с рядом вызовов, среди которых:

1. Изменение условий труда и содержания трудовой деятельности работников давно существующих железнодорожных профессий – меняется технологический интерфейс производственных процессов, задачи, инструменты и порядок выполнения операций. Это требует от работодателей проведения мероприятий по актуализации профессиональных стандартов, повышению квалификации преподавателей и организации программ профессиональной переподготовки для освоения новых и смежных профессий.
2. Несоответствие квалификаций персонала актуальным технологиям. Например, эксплуатация систем интервального регулирования на Восточном полигоне требует от поездных диспетчеров понимания основ Big Data и навыков работы с прогнозной аналитикой, что отсутствует у большинства сотрудников [3]. Недостаток таких знаний и навыков может привести к ошибкам в работе, что негативно сказывается на безопасности и эффективности транспортного процесса.
3. Разрыв между образованием и практикой. Учебные программы вузов и колледжей отстают от требований работодателей, особенно в регионах с активным развитием железнодорожной инфраструктуры (Дальний Восток и др.).
4. Поколенческий дисбаланс. Молодые специалисты легче адаптируются к цифровым инструментам, тогда как опытные кадры испытывают трудности при переходе от традиционных методов работы к новым системам автоматизированного управления перевозочным процессом.

Эти проблемы усугубляются при масштабировании проектов, таких как высокоскоростная магистраль (ВСМ) «Москва – Санкт-Петербург» и модернизация Транссибирской магистрали, где ежегодная потребность в квалифицированных кадрах превышает 40 тыс. человек [4].

Модель единого поля компетенций

Для решения указанных проблем предлагается трехуровневая система модели единого поля компетенций в сфере актуальных инноваций на железнодорожном транспорте, интегрирующая образовательные учреждения, корпоративные учебные центры и технологических разработчиков.

Такая система должна учитывать особенности различных этапов карьерного роста, обеспечивать постепенное наращивание знаний и навыков у каждого сотрудника, формируя условия для развития мультипотенциальных специалистов (мультипотенциальность – современный тренд в развитии персонала, который выражается в том, что человек может одновременно профессионально развиваться в нескольких содержательных направлениях) [5].

Предлагаемая организационная пирамида включает несколько уровней:

1. Базовый уровень (целевая аудитория – слушатели образовательных программ среднего и высшего профессионального образования по различным направлениям подготовки на базе среднего общего образования; программ освоения новых профессий в Учебных центрах повышения профессиональных квалификаций ОАО «РЖД»):

- получение общих знаний о принципах работы железнодорожного транспорта, изучение и практическое освоение основ техники безопасности;
- освоение модулей по цифровой грамотности и основам кибербезопасности;
- получение общих знаний и приобретение базовых навыков работы с новым (актуальным) и внедряемым (планируемым к внедрению в горизонте до 5 лет) технологическим оборудованием и приборами безопасности;
- получение общих знаний и приобретение базовых навыков работы с автоматизированными системами учета и управления процессами, специализированным программным обеспечением разработки АО «НИИАС»;
- использование цифровых симуляторов для отработки навыков межфункционального взаимодействия представителей различных производственных подразделений железнодорожного транспорта в типовых сценариях практической реализации комплексных технологий управления на железнодорожных магистралях, включая Восточный полигон.

2. Продвинутый уровень (целевая аудитория – слушатели образовательных программ высшего профессионального образования по различным направлениям подготовки на базе среднего профессионального образования; программ профессиональной переподготовки для действующих сотрудников железных дорог из числа руководителей и специалистов; периодических курсов поддерживающего профессионального обучения для действующих сотрудников железных дорог, реализуемых в формате «технической учебы» в условиях производственной деятельности):

- приобретение специализированных навыков в области эксплуатации и обслуживания подвижного состава и объектов железнодорожной инфраструктуры;
- освоение основ информатизации, автоматизации и цифровых технологий на железнодорожном транспорте, с акцентом на технологии АО «НИИАС» (как ведущего института в области обеспечения технологического суверенитета отечественных железных дорог);
- получение общих знаний и приобретение базовых навыков работы с автоматизированными системами учета и управления процессами, специализированным программным обеспечением разработки АО «НИИАС»;
- образовательные программы с акцентом на углубленное изучение специфики работы на магистральном или высокоскоростном железнодорожном транспорте [6] с

применением технологий АО «НИИАС» (например, курсы по управлению «умными» железнодорожными узлами);

- навыки работы с информационными ресурсами и сопровождающей базой знаний для оперативной актуализации специфических профессиональных знаний (мобильные приложения с элементами микрообучения и короткими видеоуроками);
- освоение модулей по цифровой грамотности, основам кибербезопасности и противодействию социоинженерным атакам.

3. Экспертный уровень (целевая аудитория – слушатели программ дополнительного профессионального обучения и программ профессиональной переподготовки для действующих сотрудников железных дорог из числа руководителей, а также специалистов, состоящих в кадровом резерве на замещение должностей руководителей):

- специализированные курсы по управлению сложными системами, программному обеспечению, анализу данных и прогнозированию возможных рисков на железнодорожном транспорте;
- обучение методикам предотвращения аварийных ситуаций на транспорте и реагирования на них;
- освоение модулей по цифровой грамотности, основам кибербезопасности и противодействию социоинженерным атакам;
- развитие кросс-функциональных навыков для проектных управляющих: анализ данных, критическое и стратегическое мышление, управление проектами и проектными командами;
- стажировки в центрах интеграции передовых компетенций в сфере разработок и интеллектуальных продуктов, таких как Центр обучения АО «НИИАС», где эксперты-разработчики новых технологий и инженеры-практики совместно разрабатывают учебные кейсы на основе понимания особенностей практического внедрения передовых технологий на транспорте [7].

Эта структура позволяет поэтапно развивать необходимые компетенции у каждого работника, обеспечивая постепенное углубление знаний и навыков в соответствии с потребностями компании и рынка труда.

Алгоритм построения единого поля компетенций

Для своевременной подготовки компетентных кадров важно отметить высокую актуальность построения тесного сотрудничества между заказчиками новых технологий, разработчиками новых технологий, компаниями-пользователями этих технологий и ведущими отраслевыми вузами. Например, если в ОАО «РЖД» не будет сотрудников, обученных и готовых к применению современных технологий, то имеется значительная вероятность реализации стратегических рисков для всей отечественной транспортной отрасли – проявления человеческого фактора могут привести к серьёзным последствиям, таким как аварии, нарушения сроков выполнения работ и неэффективное использование ресурсов, что в конечном итоге создаст угрозу для безопасности и стабильности жизненного цикла всей транспортной инфраструктуры.

Для обеспечения российских железных дорог персоналом с необходимыми компетенциями и уменьшения риска негативного влияния человеческого фактора на внедрение передовых технологий предлагается следующий алгоритм построения единого

поля компетенций в сфере актуальных разработок и интеллектуальных продуктов АО «НИИАС», внедряемых на железнодорожном транспорте:

1. ОАО «РЖД» – как заказчик инноваций и инициатор внедрения новых технологий в производственную деятельность транспорта:

– создает рабочую группу по определению и внедрению актуальных передовых профессиональных компетенций, и руководит её деятельностью. В состав группы входят функциональные заказчики новых технологий от ОАО «РЖД», разработчик новых технологий (АО «НИИАС»), представители подразделений ОАО «РЖД» (будущие пользователи новых технологий) и представители ведущих отраслевых университетов;

– инициирует мероприятия по определению новых профессиональных компетенций для своих сотрудников;

– определяет источники финансирования процесса повышения квалификации и обучения персонала при внедрении новых технологий;

– организует централизованный цикличный процесс повышения квалификации и обучения персонала технологиям интервального регулирования движения поездов и другим передовым продуктам АО «НИИАС».

2. Центр обучения АО «НИИАС» – как интегратор передовых компетенций в сфере разработок и интеллектуальных продуктов АО «НИИАС» – «учит учителей», то есть реализует каскадный организационный подход в обучении инновациям и новым технологиям (что подразумевает под собой обучение преподавателей и экспертов, которые затем обучают эксплуатационный персонал железных дорог и новые поколения работников железнодорожного транспорта):

– выступает в роли центра повышения квалификации и методической поддержки для преподавательского состава вузов, техникумов, колледжей и учебных центров ОАО «РЖД»;

– разрабатывает и реализует программы дополнительного профессионального образования в сфере компетенций АО «НИИАС»;

– выступает в роли центра инициации разработки информационных ресурсов и сопровождающей базы знаний для оперативной актуализации специфических профессиональных знаний в сфере компетенций АО «НИИАС» (мобильные приложения с элементами микрообучения и короткими видеоуроками – периодические курсы поддерживающего профессионального обучения для действующих сотрудников железных дорог, реализуемых в формате «технической учебы» в условиях производственной деятельности);

– организует практические занятия и стажировки для работников транспорта, преподавателей и студентов (с учетом реализации эффективных форматов обучения для различных поколений работников);

– участвует в разработке, актуализации и согласовании образовательных программ вузов, колледжей и передовых инженерных школ;

– организует разработку методических пособий и учебников по новым областям знаний в сфере новых профессиональных компетенций для работников железнодорожного транспорта;

– проводит мероприятия по популяризации передовых технологий АО «НИИАС» (лектории, семинары и др.);

– участвует в реализации Программы цифровизации ОАО «РЖД», выполняя заявки на обучение работников в области цифровизации и новых технологий.

3. Учебные центры повышения профессиональных квалификаций ОАО «РЖД:

– направляют преподавателей в Центр обучения АО «НИИАС» с периодичностью не реже одного раза в два года для повышения квалификации по программам совершенствования методических компетенций преподавателей профессионального обучения;

– реализуют программы развития актуальных и новых профессиональных навыков для работников ОАО «РЖД» на основе периодического повышения квалификации, постобразовательной и методической поддержки преподавателей в Центре обучения АО «НИИАС»;

– сотрудничают с Центром обучения АО «НИИАС» для получения доступа к самым современным программам и методическим материалам.

4. Вузы, колледжи транспорта, и Передовые инженерные школы, осуществляющие подготовку специалистов для ОАО «РЖД» и транспортной отрасли по программам высшего и среднего профессионального образования:

– направляют представителей профессорско-преподавательского состава в Центр обучения АО «НИИАС» с периодичностью не реже одного раза в три года для повышения квалификации по тем же программам, что и преподаватели учебных центров ОАО «РЖД», а также по другим актуальным образовательным программам в сфере компетенций АО «НИИАС»;

– осуществляют подготовку специалистов для ОАО «РЖД» и транспортной отрасли на основе периодического повышения квалификации, постобразовательной и методической поддержки представителей профессорско-преподавательского состава в Центре обучения АО «НИИАС»;

– разрабатывают новые и выполняют актуализацию соответствующих образовательных программ с учетом требований по развитию актуальных и новых профессиональных навыков для железнодорожных профессий, определяемых в установленном порядке ОАО «РЖД» и соответствующими профессиональными стандартами;

– разрабатывают методические пособия и учебники по новым областям знаний в сфере новых профессиональных компетенций для работников железнодорожного транспорта (с привлечением к созданию учебно-методических материалов Центра обучения АО «НИИАС»);

– участвуют в научной деятельности по различным направлениям в сфере компетенций АО «НИИАС» (включая периодическое участие представителей профессорско-преподавательского состава вузов и Передовых инженерных школ транспорта в научно-технических советах АО «НИИАС»).

Этот предлагаемый универсальный организационный подход к внедрению в ОАО «РЖД» новых технологий в сфере разработок и интеллектуальных продуктов АО «НИИАС» способен значительно улучшить процессы подготовки и повышения квалификации работников транспорта, снижая риски, связанные с человеческим фактором, и повышая безопасность и эффективность работы на высокоскоростных магистралях.

При этом важно помнить, что правильное организованное обучение – это инвестиции, дающие возврат в форме увеличения эффективности производственных процессов, повышения уровня удовлетворенности клиентов, приверженности работников своей профессиональной деятельности, преемственности между поколениями работников и снижения текучести персонала [7].

Заключение

Формирование единого поля компетенций – критический фактор для успешной цифровой трансформации железнодорожного транспорта России. Предложенная модель позволяет синхронизировать образовательные и корпоративные стандарты, снизить риски человеческого фактора и обеспечить готовность персонала к работе с инновациями, включая проекты на Восточном полигоне. Дальнейшие исследования должны быть направлены на оценку эффективности внедрённых форматов обучения и их адаптацию к меняющимся технологическим требованиям.

Библиографический список:

1. URL: https://www.vedomosti.ru/finance/news/2024/12/23/1083125-vtb-profinansiruet-vsm
2. Лёвин Б. А. Цифровая железная дорога: принципы и технологии / Б.А. Лёвин, В. Я. Цветков // Мир транспорта. - 2018. - №16 (3). - С. 50-61
3. Розенберг Е. Н. Принципы построения систем управления и интервального регулирования движением поездов четвертого поколения /Е. Н. Розенберг // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2019): Труды Восьмой науч.-технич. конф., Москва, 21 ноября 2019 г. - М.: АО «НИИАС», 2019. - С. 27-32.
4. URL: https://pish.rut.digital/conference
5. URL: https://hh.ru/article/32138
6. Киселев И.П. Высокоскоростной железнодорожный транспорт. Общий курс: учебное пособие в 2-х томах. Том 1 - Москва : УМЦ ЖДТ, 2014. - 308 с. - ISBN 978-5-89035-734-2.
7. Рой В. Х. Поллок, Эндрю МакК. Джефферсон, Кэлхун У. Уик. Шесть дисциплин прорывного обучения. Как превратить обучение и развитие в бизнес-результаты. (Лучший мировой опыт). - Москва : Эксмо, 2019. - 352 с. - ISBN 978-5-04-103303-3.

АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи
на железнодорожном транспорте»
(АО «НИИАС», г. Москва)

Капитонов Константин Сергеевич

УДК:629.423.1 ГРНТИ 73.29.41

С. А. Кахаев, О. В. Мельниченко, А. Ю. Портной, А. О. Линьков

ИННОВАЦИОННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВОЙ ЦЕПИ ЭЛЕКТРОВОЗА В ЭКСПЛУАТАЦИИ

Аннотация. *Одна из основных причин отказов электроподвижного состава – это пробой изоляции электрооборудования в силовой цепи. Непредвиденные отказы локомотивов приносят значительный ущерб для ОАО «РЖД», характеризующийся многомиллионными убытками, срывами установленных графиков движения поездов, необходимостью вызова вспомогательного локомотива, вынужденными простоями в ремонте. Решением данной проблемы может служить система мониторинга сопротивления изоляции силовых цепей в эксплуатации, основанная на способе анализа тока утечки. Своевременное обнаружение факта снижения сопротивления изоляции силовых цепей позволит заблаговременно исключить постановку аварийного электровоза под поезд, запланировать ремонт и повысить качество его приемки после ремонта. В статье описан макетный образец предлагаемой системы мониторинга и представлены результаты его лабораторных испытаний. Лабораторные испытания подтвердили погрешность измерений менее 7%, что позволяет рекомендовать систему для внедрения.*

Ключевые слова: *электровоз, сопротивление изоляции, лабораторные испытания, мониторинг, силовая цепь, прогнозирование отказов, цифровизация железнодорожного транспорта.*

Актуальность проблемы. Одним из ключевых направлений научно-технологического развития холдинга "РЖД" является реализация проекта "Цифровая железная дорога" [1]. Необходимость повышения надежности тягового подвижного состава (далее ТПС) становится все более очевидной как на практике, так и в рамках стратегического планирования. Этот аспект акцентируется в многочисленных руководящих документах ОАО РЖД, включая «Белую книгу», которая формулирует ключевые задачи локомотивного комплекса. Среди них выделяются цели и задачи, такие как увеличение среднесуточной производительности локомотива рабочего парка в грузовом движении не менее чем на 10%, а также снижение доли неисправных локомотивов, находящихся на всех уровнях ремонта и обслуживания, до 16,3% [2].

В соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 апреля 2021 года №1100-р был утвержден паспорт инвестиционного проекта «Модернизация железнодорожной инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей с целью повышения пропускных и провозных возможностей (второй этап)» [3]. Целевым показателем данного проекта является увеличение пропускной способности указанных магистралей. В частности, в 2023 году полигон осуществил перевозку на 173 млн тонн, затем в 2024 году - 180 миллионов тонн. К 2030 году планируется достичь 210 млн тонн. Рассматривается

возможность обеспечения до 270 млн тонн к 2035 году. Плановые объёмы достижимы при наличии в эксплуатируемом парке исправного и мощного ТПС, однако надежность локомотивов остается на невысоком уровне, что создает риски для реализации поставленных задач.

За 2024 год на Восточном полигоне ОАО «РЖД» допущено более 1500 отказов электровозов по причине пробоя изоляции силовых цепей [4], что привело к значительным задержкам поездов, увеличению парка локомотивов и локомотивных бригад.

Чтобы выявить основные причины выхода из строя электрооборудования и тяговых электродвигателей (далее ТЭД) проанализирована статистика по неплановым ремонтам электровозов Восточно-Сибирской дирекции тяги за 2024 год [5], электровозов переменного тока серии Э5К, 2(3)ЭС5К [6], представленную на рисунке 1. Полученные результаты анализа представлены в виде диаграмм на рисунке 2.

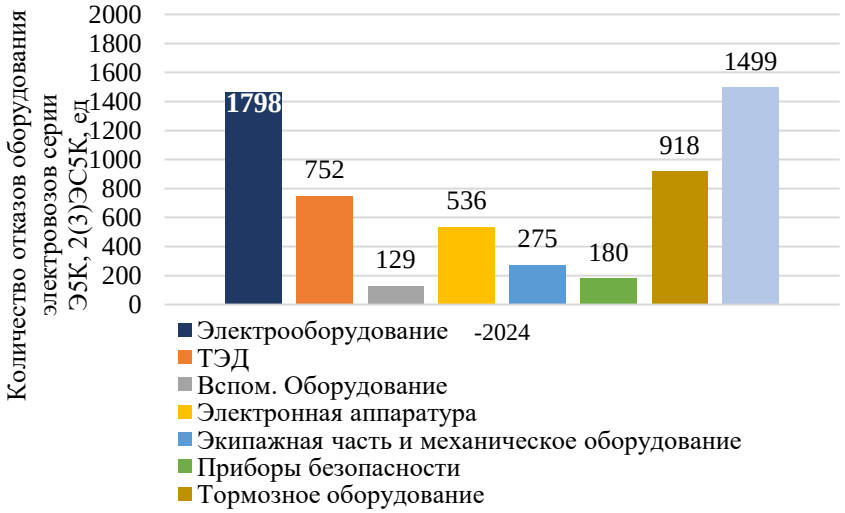
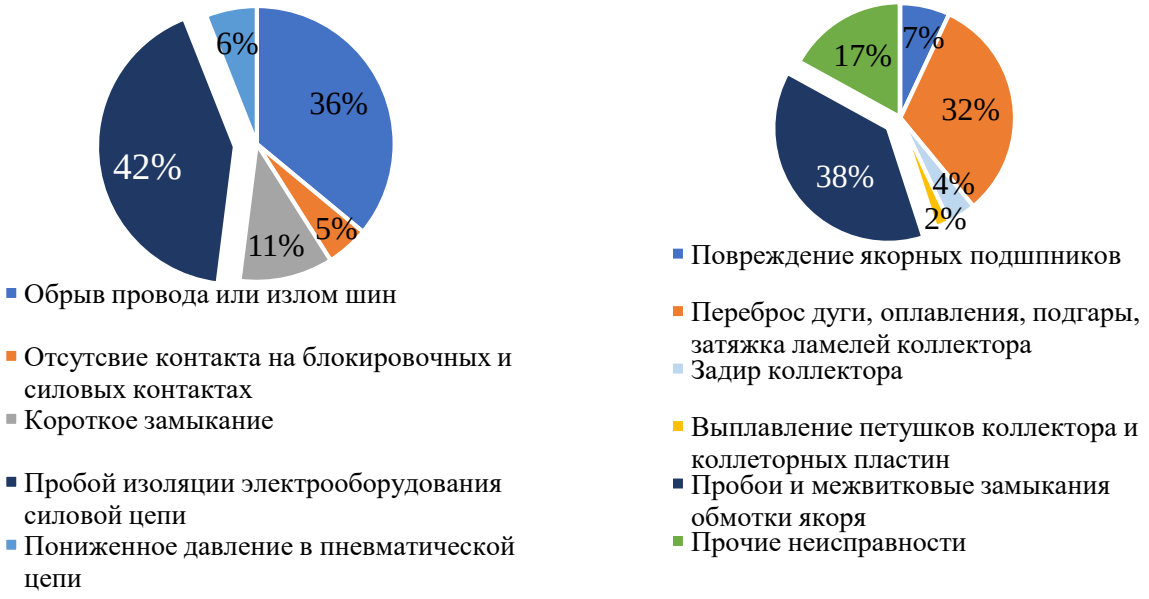


Рисунок 1 – Анализ статистики отказов электрического оборудования электровозов переменного тока Восточно-Сибирской дирекции тяги за 2024 г.



а) б)

Рисунок 2 – Причины выхода из строя электровозов серий Э5К, 2(3)ЭС5К Восточно-Сибирской дирекции тяги за 2024 год. а) – электрооборудования; б) – ТЭД

По данным Восточно-Сибирской дирекции тяги за 2024 год зафиксировано 6088 неплановых ремонтов грузовых электровозов переменного тока, общее время простоя которых (включая передислокацию и ожидание) составило 198436,58 часа. В ходе анализа выявлено 714 случаев неплановых ремонтов, вызванных проблемами изоляции силовой цепи и срабатыванием защиты ГВ РЗ. Суммарное время простоя – 33 560,1 часа.

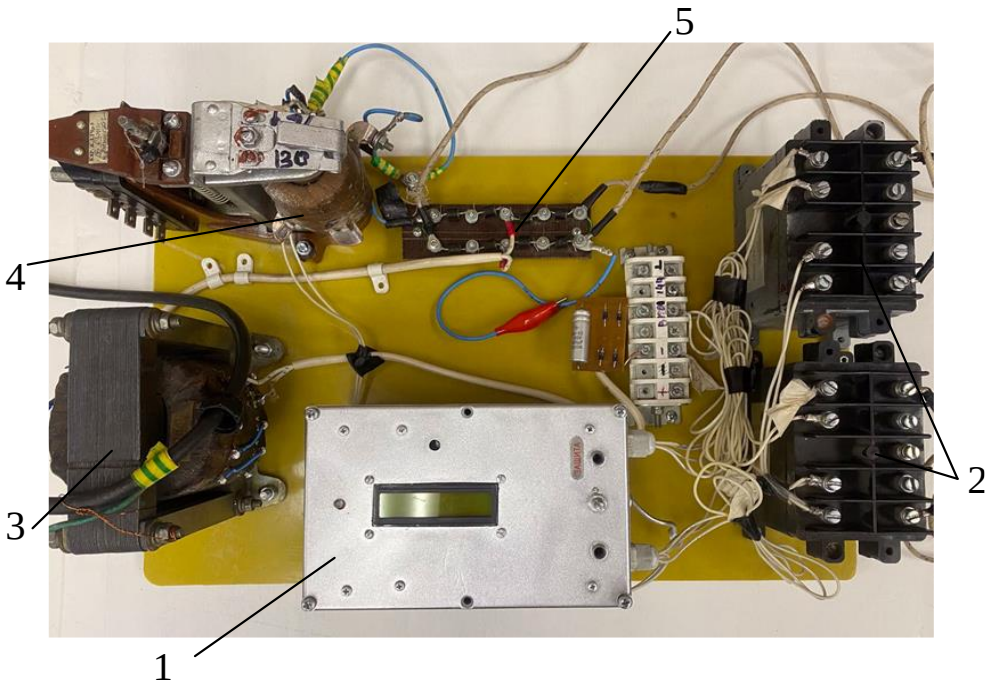
Величина сопротивления изоляции силовых цепей электровоза в эксплуатации на сегодняшний день является неконтролируемым параметром. Для защиты от пробоя изоляции «на землю» применяются аппараты, которые при достижении уставки тока утечки отключают питание электрооборудования, срабатыванием ГВ РЗ. Существующие методы измерения сопротивления изоляции силовых групп электровозов производят на стоянке с разбором силовой схемы электровоза при ТОиР [7].

Работа связана с исследованием способа определения сопротивления изоляции силовой цепи электровоза, который позволит непрерывно контролировать данный параметр в пути следования и обеспечить своевременное выявление отклонений от нормативов, прогнозирование и предупреждение появления отказов [8]. Внедрение предлагаемого устройства обеспечит снижение количества выходов из строя силового оборудования электровоза путем предупреждения и недопущения возникновения отказов по причине пробоя изоляции. Данное решение обеспечит непрерывный контроль сопротивления изоляции силовой цепи как на стоянке электровоза, так и в движении в эксплуатации. Это, в свою очередь повысит качество приемки электровозов после проведения ремонта, позволяя иметь актуальную информацию о текущем состоянии электрооборудования.

Постановка цели. Цель исследования – оценить работоспособность разработанного макетного образца системы мониторинга сопротивления изоляции силовой цепи электровоза переменного тока при проведении лабораторных испытаний.

Предложенный макетный образец. Для проверки технических решений, авторами разработан макетный образец системы мониторинга сопротивления изоляции силовой цепи электровоза переменного тока, представленный на рисунке 3. Макетный образец содержит каналы измерения, подключаемые к элементам силовой цепи, информация с которых через гальванические развязывающие усилители передается в аналого-цифровой преобразователь и поступает в процессор для расчета текущего сопротивления изоляции. Электрические компоненты располагаются на печатных платах, закрытых металлическим корпусом. На верхней части корпуса закреплен блок индикации. Корпус закреплен на текстолитовой плите, обеспечивающей изоляцию от корпуса электровоза. Основные технические характеристики разработанного макетного образца приведены в таблице 1.

Достоинством решения является то, что не требуется непосредственного вмешательства в силовую схему электровоза – мониторинг ведется за счёт каналов, включаемых параллельно штатной системе защиты от пробоя на землю.



1 – Блок контроля сопротивления изоляции с индикатором; 2 – датчики напряжения типа (ПН-1); 3 – трансформатор; 4 – реле заземления (РЗ-303); 5 – диодный мост.
Рисунок 3 – Макетный образец системы мониторинга сопротивления изоляции

Таблица 1 – Технические характеристики макетного образца системы мониторинга сопротивления изоляции

Наименование параметра	Значение
Диапазон измерения сопротивления изоляции силовой цепи, МОм	0,2- 20
Частота измерения сопротивления, не более, с	2
Потребляемая мощность, Вт	55
Номинальный ток, А	1
Связь с внешними устройствами вычислительной техники. Интерфейс	RS-485
Скорость обмена информацией по интерфейсу RS-485, бод, не более	115-200
Габаритные размеры, мм	450x350x350
Масса, кг, не более	10
Предел допускаемой основной относительной погрешности измерения сопротивления изоляции, %, не более	± 10

Проведение испытаний. С целью экспериментальной проверки работоспособности предлагаемого технического решения [9] и его макетного образца (рисунок 3) разработан лабораторный стенд, представленный на рисунке 4, который включает в себя физическую модель электровоза с одним ТЭД, штатное оборудование защиты электровоза от пробоя на землю, измерительные каналы, которые служат для гальванической развязки от силовой цепи электровоза и измерения параметров необходимых для расчета сопротивления изоляции, а также блок контроля сопротивления изоляции. Данный стенд позволяет смоделировать работу системы мониторинга сопротивления изоляции лабораторных условиях. Это дает возможность:

- отработать алгоритмы работы системы мониторинга;
- провести настройку параметров системы;
- произвести общую оценку работоспособности, а также возможность функционирования системы без сбоев;

- идентифицировать и устранить потенциальные неисправности до начала эксплуатационных испытаний;

- оценить реакцию системы на различные возмущающие воздействия и определить ее устойчивость;

- провести сравнительный анализ с результатами математического моделирования;

- подготовить систему мониторинга к дальнейшим испытаниям на реальном электровозе.

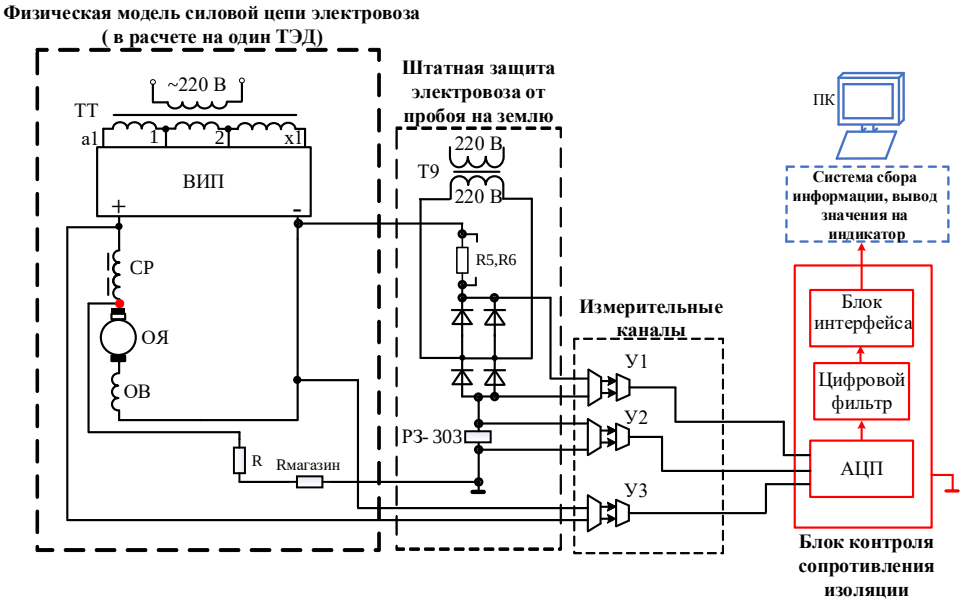


Рисунок 4 – Упрощенная силовая схема лабораторного стенда с предлагаемой системой мониторинга сопротивления изоляции

В рамках испытаний использовалась физическая модель электровоза, созданная на кафедре «Электроподвижной состав» ИрГУПС. На рисунке 5 представлена схема модели «Электровоз» научно-экспериментального стенда, к которой подключается макетный образец системы мониторинга сопротивления изоляции. Модель «Электровоз» содержит следующие функциональные узлы:

– A1 – лабораторный макет преобразователя;
– A2 – выпрямительная установка возбуждения;
– A3 – преобразователь разгон/торможение для вспомогательного двигателя;
– M1 – ТЭД;
– M2 – вспомогательный двигатель;
– Wh 1 – блок измерения параметров первичной цепи.

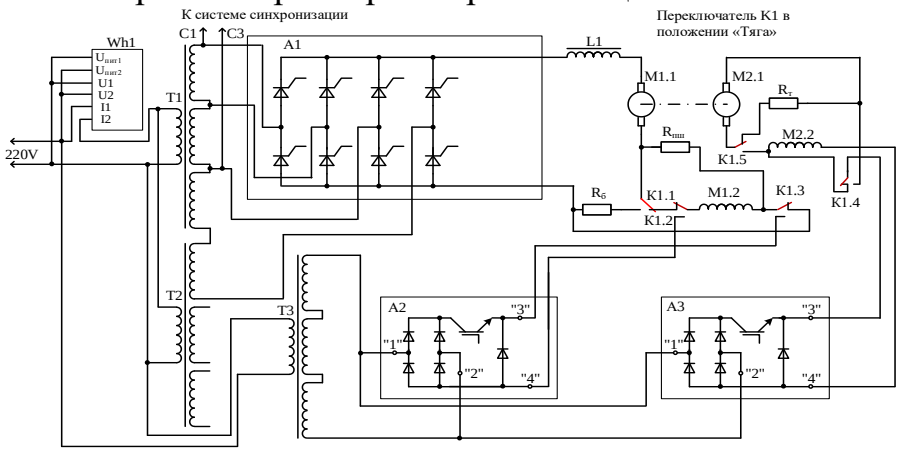


Рисунок 5 – Схема модели «Электровоз» научно-экспериментального стенда

Лабораторный стенд, представляющий собой упрощенную физическую модель электровоза, расположен на базе мини-депо университета ИрГУПС с подключенным макетным образцом системы мониторинга сопротивления изоляции представлен на рисунке 6.

Рисунок 6 – Внешний вид физической модели электровоза с подключённой системой мониторинга сопротивления изоляции

Для оценки работоспособности разработанной системы мониторинга выполнен ряд экспериментов на разработанном стенде. К устройству контроля изоляции последовательно подключены резистор номиналом 5,1 кОм и магазин сопротивлений типа Р33 [10], значения которого регулировались в диапазоне от 10 кОм до 1 МОм. Измерительные каналы У1-У3 выполнены на преобразователях напряжения типа ПН-1 [11], имеющих гальваническую развязку. В качестве диодного моста использовался мост из диодов типа FR307 [12].

С помощью первого измерительного канала У1 измеряется падение напряжения $U_{рз}$ на катушке реле заземления, которое пересчитывается в ток утечки $I_{ут}$ по формуле (1)

$$I_{ут} = \frac{U_{рз}}{R_{рз}}, \quad (1)$$

где $R_{рз}$ – сопротивление катушки реле заземления, Ом;

$U_{рз}$ – напряжение на катушке реле заземления, В.

С помощью второго измерительного канала через гальванически развязывающий усилитель У2 измеряется напряжение $U_{дм}$ диодного моста D1-D4.

Третьим измерительным каналом через гальванически развязывающий усилитель У3 измеряется напряжение $U_{ВИП}$, выдаваемое выпрямительно-инверторным преобразователем ВИП, которое пересчитывается в сопротивление изоляции $R_{из}$ по формуле (2)

$$R_{из} = \frac{U_{дм} - U_{рз} - (R_{5-6} * I_{ут}) + U_{ВИП}}{I_{ут}}, \quad (2)$$

где R_{5-6} – сопротивление резисторов R5 и R6, Ом;

$U_{вип}$ – напряжение на ВИП, В.

Эти параметры позволяют непрерывно отслеживать состояние изоляции и оперативно выявлять отклонения.

Проведенный анализ и сопоставление полученных данных с эталонными значениями сопротивлений, установленными в магазине, позволили определить погрешность измерений (рисунок 7).

Рисунок 7 – Погрешность системы мониторинга, полученная в результате опытов на физической модели электровоза

Проведенные лабораторные испытания подтвердили работоспособность системы мониторинга сопротивления изоляции, погрешность измерений составила менее 7% в режиме соответствующему выбегу. Однако для практической реализации системы мониторинга необходимо провести дополнительные исследования в реальных условиях эксплуатации электровозов, что позволит оценить влияние различных факторов, таких как электромагнитные помехи, температурные воздействия, вибрации и другие внешние воздействия, возникающие в ходе движения электровоза на работу системы.

Если оставить без контроля сопротивление изоляции силовой цепи, то в дальнейшем, при текущем наращивании тяжеловесного движения и росту нагрузки на ТПС, количество отказов в пути следования по причине пробоя изоляции будет увеличиваться. Это приведет к задержкам движения поездов по перегонам, снижению пропускной способности и технической скорости. Своевременное определение текущего состояния сопротивления изоляции силовой цепи предотвратит постановку потенциально неисправного электровоза под поезд и не допустит его отказа в пути следования.

Заключение. Лабораторные испытания, проведенные на физической модели силовой цепи электровоза с расчетом на один ТЭД, показали, что разработанная система мониторинга способна осуществлять достоверный и непрерывный контроль фактического сопротивления изоляции силовой цепи электровоза. Испытания подтвердили высокую точность системы, с погрешностью измерений менее 7%.

Список используемых источников

1. Российская Федерация. Правительство. Об утверждении Стратегии развития транспортного машиностроения Российской Федерации на период до 2030 года и плана мероприятий по ее реализации: распоряжение Правительства Российской Федерации от 17.08.2017 №1756-р. — Текст: непосредственный.

2. ОАО «Российские железные дороги». Об утверждении стратегии научно-технологического развития холдинга "РЖД" на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года: распоряжение от 17 апреля 2018 года №769/р (Белая книга).

3. Паспорт инвестиционного проекта «Модернизация железнодорожной инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей с развитием пропускных и провозных способностей (второй этап)»: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 28 апреля 2021 г. №1100-р.

4. Анализ состояния безопасности движения поездов, отказов в работе технических средств и технологических нарушений в Восточно-Сибирской дирекции тяги за декабрь и 12 месяцев 2024 года, №В-СИБ Т-73/пд от 17.01.2025.

5. Анализ причин и последствий технологических нарушений, допущенных по ответственности линейных предприятий Восточно-Сибирской дирекции тяги за декабрь и 12 месяцев 2023 года и 2024 года.

6. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К): руководство по эксплуатации / Новочеркасский электровозостроительный завод. — Новочеркасск, 2007. — Т. 1. — 635 с.; Т. 2. — 640 с.

7. Кахаев, С.А. Анализ способов контроля сопротивления изоляции силовой группы электровозов переменного тока / С.А. Кахаев, А.О. Линьков, В.Н. Знаенок // Молодежная наука: труды XXVIII Всероссийской студенческой научно практической конференции КрИЖТ ИрГУПС (г. Красноярск, 25.04.2024 г.) : Т. 2: – с.128-134.

8. Патент 2807416 Российская Федерация, МПК G 01 R 27/18, B 60L 3/00. Способ оценки сопротивления изоляции силовой группы постоянного тока электровозов и устройство для его реализации / Мельниченко О.В., Портной А.Ю., Линьков А.О., Шрамко С.Г., Знаенок В.Н., и др.; заявитель и патентообладатель Знаенок В.Н. № 2023116661; заявл. 26.06.2023, опубл. 14.11.2023, Бюл. №32 10 с.

9. Кахаев, С.А. Математическое моделирование работы системы мониторинга сопротивления изоляции силовой цепи электровозов переменного тока / С.А Кахаев, О.В. Мельниченко, А.О. Линьков // ОБРАЗОВАНИЕ – НАУКА – ПРОИЗВОДСТВО: Материалы VIII Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции (г. Чита, 22 ноября 2024 г.): Т.1: Раздел 1. «Подвижной состав железных дорог» / редкол.: А.А. Ерёменко (отв. ред.) [и др.]; ЗабИЖТ ИрГУПС. ¬– Чита: ЗабИЖТ ИрГУПС, 2024. С. 53-63.

10. Техническое описание и инструкция по эксплуатации 3.452.011 ТО [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://armadatest.net/wp-content/uploads/2019/08/magazin-soprotivlenija-izmeritelnyj-r33.-tehnicheskoe-opisanie-i-instrukcija-po-ekspluatacii-3.452.011-to.pdf (дата обращения: 10.03.2025).

11. Тепловоз ТЭМ 18ДМ 6 руководство по эксплуатации. Вспомогательное комплектующее оборудование. Электрооборудование. ТЭМ 18ДМ РЭ5 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://rcit.su/techinfoX66.html (дата обращения: 10.03.2025).

12. Data Sheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.diodes.com/assets/Datasheets/products_inactive_data/ds26003.pdf (дата обращения: 10.03.2025).

Иркутский государственный университет путей сообщения.

ИрГУПС, г. Иркутск.

Кахаев Семен Александрович: аспирант;

Мельниченко Олег Валерьевич: д.т.н., зав. каф. «ЭПС»

Портной Александр Юрьевич: д.ф-м.н., профессор каф. «ФМиП»;

Линьков Алексей Олегович: к.т.н., доцент кафедры «ЭПС».

УДК 621.436-08 ГРНТИ 73.29.41

А. Ю. Коньков, И. Д. Конькова, К. К. Демаков

ОСОБЕННОСТИ СИГНАЛА СКОРОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ВНУТРИЦИЛИНДРОВОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОЗНОГО ДИЗЕЛЯ

Аннотация. *В работе представлен результат обобщения исследований, выполненных авторами на протяжении нескольких последних лет, в направлении разработки новых, простых и эффективных методов диагностирования дизеля на основе сигнала первой производной внутрицилиндрового давления. Источником сигнала является пьезоэлектрический датчик давления, широко распространенный при индицировании ДВС. Все рассмотренные в работе методы являются сигнал-ориентированными методами диагностики, что наряду с простой схемотехнических решений обеспечивает и простоту извлечения диагностической информации.*

Ключевые слова: *дизель, скорость изменения давления, герметичность цилиндра, вибрация, подача топлива, индикаторная диаграмма, пьезоэлектрический датчик.*

Введение

Внутрицилиндровое давление, измеренное синхронно с перемещением поршня, является одним из наиболее информативных диагностических сигналов, содержащим исчерпывающие данные о протекании рабочего процесса поршневого двигателя. Обычно эту информацию представляют в виде индикаторной диаграммы, для диагностического анализа которой в настоящее время разработаны различные подходы. Некоторые из них рассмотрены в монографии [1]. Подавляющее большинство тепловозных дизелей имеет индикаторные краны в каждом цилиндре, что существенно упрощает процедуру измерения давления в условиях эксплуатации. Однако, на пути получения достоверной диагностической информации, основанной на традиционном “классическом” анализе индикаторной диаграммы, существует несколько серьезных препятствий. Во-первых, связь измерительной мембраны датчика давления с камерой сгорания осуществляется через достаточно длинный измерительный канал (индикаторный канал), в котором возникают свои газодинамические процессы, заметно искажающие сигнал давления. По этой причине, классические методики расчета таких параметров, как среднее индикаторное давление, индикаторная мощность и т. п., приводят, зачастую, к нелепым результатам, несогласующимся с надежно определенными эффективными показателями дизеля. Во-вторых, высокие температура контролируемой среды и значительная динамическая нагрузка на датчик давления, существенно ограничивают выбор типа датчика давления. Судя по каталогам признанных лидеров в производстве аппаратуры для контроля процессов в двигателях внутреннего сгорания – компаний AVL [2] и Kistler [3], наиболее надежным типом датчика давления, широко применяемым в системах диагностики и мониторинга двигателей различного назначения, является пьезоэлектрический датчик давления. При этом схемотехника интегрирующих усилителей, разработанных для пьезодатчиков давления, предъявляет чрезвычайно

высокие требования к элементной базе. Неидеальность реальных операционных усилителей приводит к тому, что при изготовлении усилителей заряда разработчики вынуждены решать компромиссную задачу между точностью интегрирования и недопущением перехода усилителя в режим насыщения из-за нескомпенсированных токов утечек во внутренних цепях микросхем. Это, в свою очередь, приводит к росту стоимости измерительного оборудования, особенно для методов, ориентированных на одновременное измерение давления во всех цилиндрах двигателя.

На фоне обозначенных проблем привлекательно выглядит сигнал скорости изменения давления, отличающийся от сигнала давления как простотой аналоговой схемотехники преобразователя, так и рядом ценных диагностических свойств, позволяющими разработать сигнал-ориентированные методы диагностирования некоторых неисправностей и разрегулировок дизеля.

Целью настоящей работы является обобщение выполненных на протяжении нескольких предшествующих лет на кафедре “Транспорт железных дорог” ДВГУПС исследований в направлении поиска простых и надежных методов диагностирования дизеля с использованием сигнала скорости изменения давления.

Измерение скорости изменения внутрицилиндрового давления

Хорошо известно, что принцип работы пьезоэлектрического датчика основан на зависимости электрического заряда q, возникающего на гранях пьезокристаллов, от приложенной к кристаллу силе или давлению. Каким бы высоким не было входное сопротивление измерителя, оно не бесконечно и, поэтому, во входных цепях измерителя возникает ток i, приводящий к “стеканию” заряда: $i = -\frac{dq}{t}$. По этой причине с помощью пьезодатчика невозможно измерить постоянное давление. В реальных приложениях базируются на том, что ток в цепи пьезодатчика пропорционален первой производной давления по времени или, что то же самое – скорости изменения давления. Поэтому, для получения на выходе преобразователя напряжения, пропорционального величине переменного давления, приходится применять схемы, использующие интегрирующее включение операционных усилителей, называемые в данном случае усилителями заряда. Возникающие при этом проблемы уже были кратко охарактеризованы выше.

Если же целью становится получение напряжения, пропорционального скорости изменения давления, то задача существенно упрощается за счет использования схемы преобразователя “ток–напряжение”. Удачный, на наш взгляд, вариант реализации такого преобразователя предложен в работах [4, 5], опубликованных, практически одновременно (рис. 1).

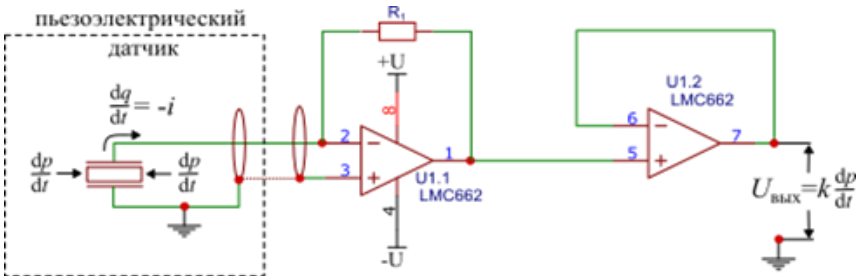


Рис. 1. Схема преобразователя “ток-напряжение” [4]

Замечательным свойством представленного преобразователя является линейная связь выходного напряжения с первой производной давления $U_{\text{вых}} = k\frac{dp}{dt}$. Отсутствие свободного члена в этом уравнении (смещения линии относительно нуля) позволило нам в большинстве рассмотренных ниже примерах использовать сигнал в исходном виде, то есть в величинах напряжения или соответствующих ему кодах аналого-цифрового преобразования без пересчета в физическую величину скорости изменения давления. При этом схемотехника преобразователя, как видно из рисунка, предельно проста. Выбор микросхемы LMC662 обусловлен тем, что этот операционный усилитель обладает ультранизким низким током сдвига (1 фА) и малыми токами смещения по входам (1 пА).

Оценка герметичности цилиндра в насосном режиме

Наиболее простым и широко распространенным методом оценки неплотности надпоршневого пространства является определение давления в конце сжатия (часто называемого компрессией) с помощью специальных приборов – максиметров (компрессометров). При отключенной подаче топлива определение максимального давления является весьма простой задачей. Аналогичный подход может быть использован и при анализе скорости изменения давления (рис. 2).

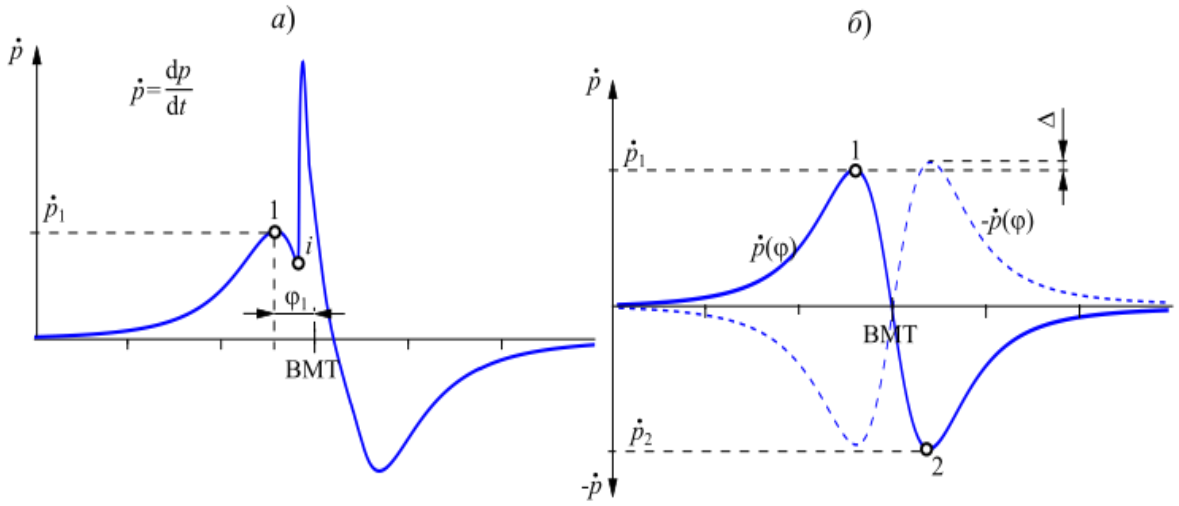


Рис. 2. Форма сигнала скорости изменения давления вблизи ВМТ при сгорании (а) и без сгорания (б)

При отключенной подаче топлива максимум на кривой скорости изменения давления (рис. 2б) имеет место за несколько градусов до ВМТ (φ_1 на рис. 2*а*; конкретное значение зависит главным образом от геометрических характеристик кривошипно-шатунного механизма). Тот факт, что значение этого максимума связано с утечками воздуха из цилиндра, был известен достаточно давно. Так авторы монографии [6] отмечают, что если отношение давлений в конце сжатия у нового и предельно изношенного комплекта цилиндропоршневого группы (ЦПГ) двигателя Д-50 в режиме прокручивания (200 — 400 мин$^{-1}$) составляет 1,2 — 1,3, то отношение максимумов сигнала скорости изменения давления этих же ЦПГ будет составлять 1,6 — 1,7. Впрочем здесь же авторы указывают, что “попытки определения технического состояния ЦПГ по этому показателю не дают удовлетворительных результатов”, что объясняется “большим

количеством побочных факторов", оказывающих влияние на результаты измерений. Указанная проблема имеет достаточно простое решение, если на ряду со значением максимума скорости давления на участке сжатия (точка 1 на рис. 2*б*) одновременно рассматривать значение минимума скорости давления на участке расширения (точка 2 на рис. 2*б*). Влияние всех побочных факторов (частоты вращения коленчатого вала, точности тарировки датчика и др.) будет в этом случае одинаковым. Интервалу времени между точкой 1 и точкой 2 соответствуют самые высокие давления в цилиндре (конец сжатия – начало расширения), а следовательно, и самые большие утечки рабочего тела в цикле. Меньше количество газа в точке 2 по сравнению с таковым в точке 1, приводит к тому, что абсолютное значение скорости в точке 2 оказывается больше, чем в точке 1. И эта разница будет тем больше, чем больше утечки рабочего тела в этот интервал цикла. Основываясь на этом наблюдении, был предложен безразмерный критерий неплотностей k_{seal}, определяемый как

$$k_{seal} = \frac{\Delta}{(dp/dt)_1}, \qquad (1)$$

где Δ – превышение максимум абсолютной скорости давления на участке расширения над минимумом скорости давления на участке сжатия;

$(dp/dt)_1$ – максимальная скорость нарастания давления на участке сжатия.

В работах [7, 8] опубликованы подробные результаты расчетных и экспериментальных исследований, показавшие, что критерий (1) практически не зависит от параметров наддувочного воздуха и теплового состояния двигателя и в меньшей степени по сравнению с давлением в конце сжатия зависит от геометрической степени сжатия. При этом существует взаимосвязь с частотой вращения коленчатого вала, которую нужно учитывать, если измерения выполнялись на разных скоростных режимах (рис. 3).

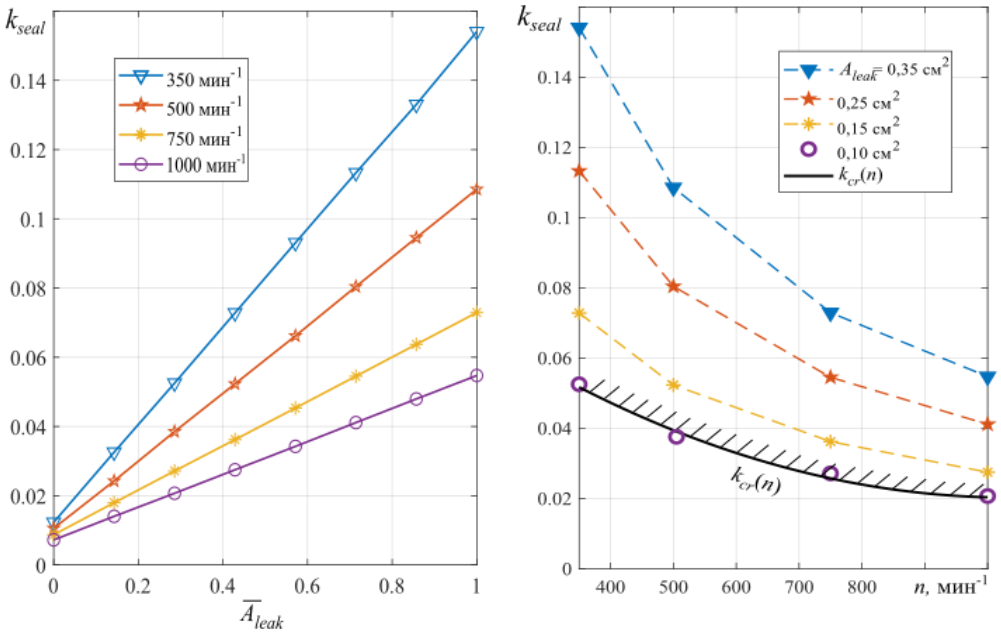


Рис. 3. Расчетные зависимости критерия неплотности k_{seal} от площади неплотностей A_{leak} (а) и от частоты вращения коленчатого вала n (б) для двигателя 1А-5Д49 [7]

Оценка герметичности цилиндра на рабочих режимах

Представленный на рис. 2*а* сигнал, соответствующий рабочему режиму двигателя со сгоранием, также содержит хорошо отличимый на участке сжатия локальный максимум (точку 1). Опыт выполненных нами экспериментальных работ показал, что только в очень редких случаях, при слишком раннем сгорании в быстроходных дизелях возникают трудности с определением этого локального максимума. Для тепловозных среднеоборотных дизелей проблема отсутствует. Как уже отмечалось выше, значение сигнала скорости давления в точке максимума на участке сжатия зависит от многих факторов, делая, практически неразличимым влияние утечек, частоты вращения вала, геометрической степени сжатия простым анализом величины скорости давления в этой точке. Иначе дело обстоит если записать сигнал скорости изменения давления непрерывно в процессе переходного скоростного режима работы двигателя. Если при этом обеспечить неизменность параметров воздуха во впускном коллекторе двигателя, то по значениям максимумов скорости давления на участке сжатия и соответствующим им средним за цикл угловым скоростям коленчатого вала, можно разрешить неразличимое влияние геометрической степени сжатия и утечек благодаря тому, что в циклах с разной частотой вращения коленчатого вала степень сжатия влияет одинаково, а утечки на участке сжатия напрямую зависят от продолжительности сжатия, а, следовательно, от частоты вращения. Аналогичный подход использовался ранее в работе [9] при анализе участка сжатия индикаторной диаграммы.

Расчетное исследование данной гипотезы выполнялось с использованием математической модели, изложенной в [7] и дополненной моделью тепловыделения [10]. Анализ результатов (рис. 4) выявил следующую особенность. При отсутствии утечек и росте оборотов коленчатого вала максимум скорости нарастания давления увеличивается ровно во столько же раз, во сколько увеличивается частота вращения коленчатого вала. При наличии утечек этот “баланс” изменяется в сторону большего изменения отношения скоростей давления, по сравнению с отношением частот вращения. Причем, чем больше утечки, тем больше эта диспропорция. Это позволяет предложить безразмерный коэффициент k_n, с помощью которого можно количественно оценить негерметичность цилиндра

$$k_n = \frac{(dp/dt)_1^{max}}{(dp/dt)_1^{min}} \cdot \frac{n_{min}}{n_{max}}, \qquad (2)$$

где

$n_{\min}$ и $n_{\max}$ - соответственно минимальные и максимальные обороты вала в переходном процессе;

$(dp/dt)_1^{min}$ и $(dp/dt)_1^{max}$ – скорости нарастания давления в точке 1 при этих частотах вращения коленчатого вала.

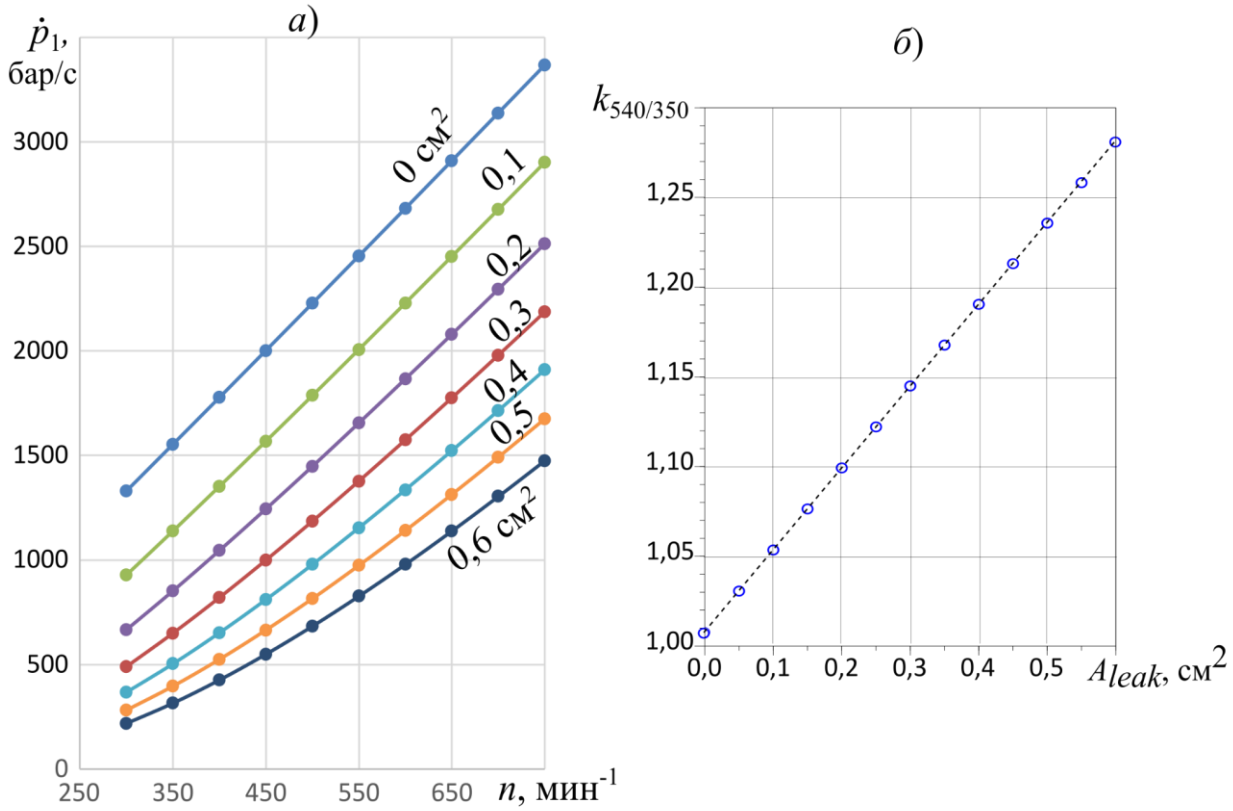


Рис. 4. Расчетные зависимости скорости нарастания давления от частоты вращения коленчатого вала n (а) и коэффициента $k_{540/350}$ (б) от площади неплотностей A_{leak} для двигателя 1А-5Д49

Методика оценки герметичности цилиндра заключается в следующем. При работе двигателя на холостом ходу контроллер машиниста переводится из 0-й позиции, например, в позицию 6 (с непродолжительными остановками в промежуточных позициях). В ходе всего переходного режима непрерывно записывается сигнал скорости изменения давления. Далее, запись разбивается на отдельные циклы с определением значения сигнала в максимуме на участке сжатия (точка 1 на рис. 1*а*) и по продолжительности цикла рассчитывается средняя за цикл частота вращения коленчатого вала. По этим данным по (2) вычисляется коэффициент k_n. На рис. 4*б* в качестве примера показана зависимость коэффициента k_n от площади утечек для случая, когда n_{max} = 540 мин$^{-1}$, а n_{min} = 350 мин$^{-1}$. Видно, что величина этого коэффициента линейно связана с площадью утечек. Чем выше коэффициент k_n=$k_{540/350}$, тем больше воздуха вытекает из цилиндра, а значит – ниже его герметичность.

Вибрационная составляющая сигнала

В связи с тем, что конструкция пьезоэлектрического датчика давления принципиально мало отличается от конструкции пьезоэлектрического виброакселерометра, выходной сигнал с датчика давления может содержать вибрационную составляющую. Обычно, это свойство acceleration sensitivity [2] (анг. чувствительность к виброускорению) принято рассматривать как нежелательное и разработчики датчиков давления стремятся его максимально ослабить. Проблема почти отсутствует при применении интегрирующих усилителей заряда, т.к. интегрирование симметричного знакопеременного сигнала приводит к результату, очень близкому к

нулю, вследствие чего искажения линии давления из-за воспринимаемой датчиком вибрации обычно ничтожно малы. Применение преобразователя “ток – напряжение” существенно изменяет картину. Наш опыт работы с двигателями трех типов показывает, что при установке датчика в крышке цилиндра, в выходном сигнале скорости изменения давления, в большей или меньшей степени, всегда присутствует сигнал вибрации, вызванный ударом клапанов при посадке в седло (рис. 5а).

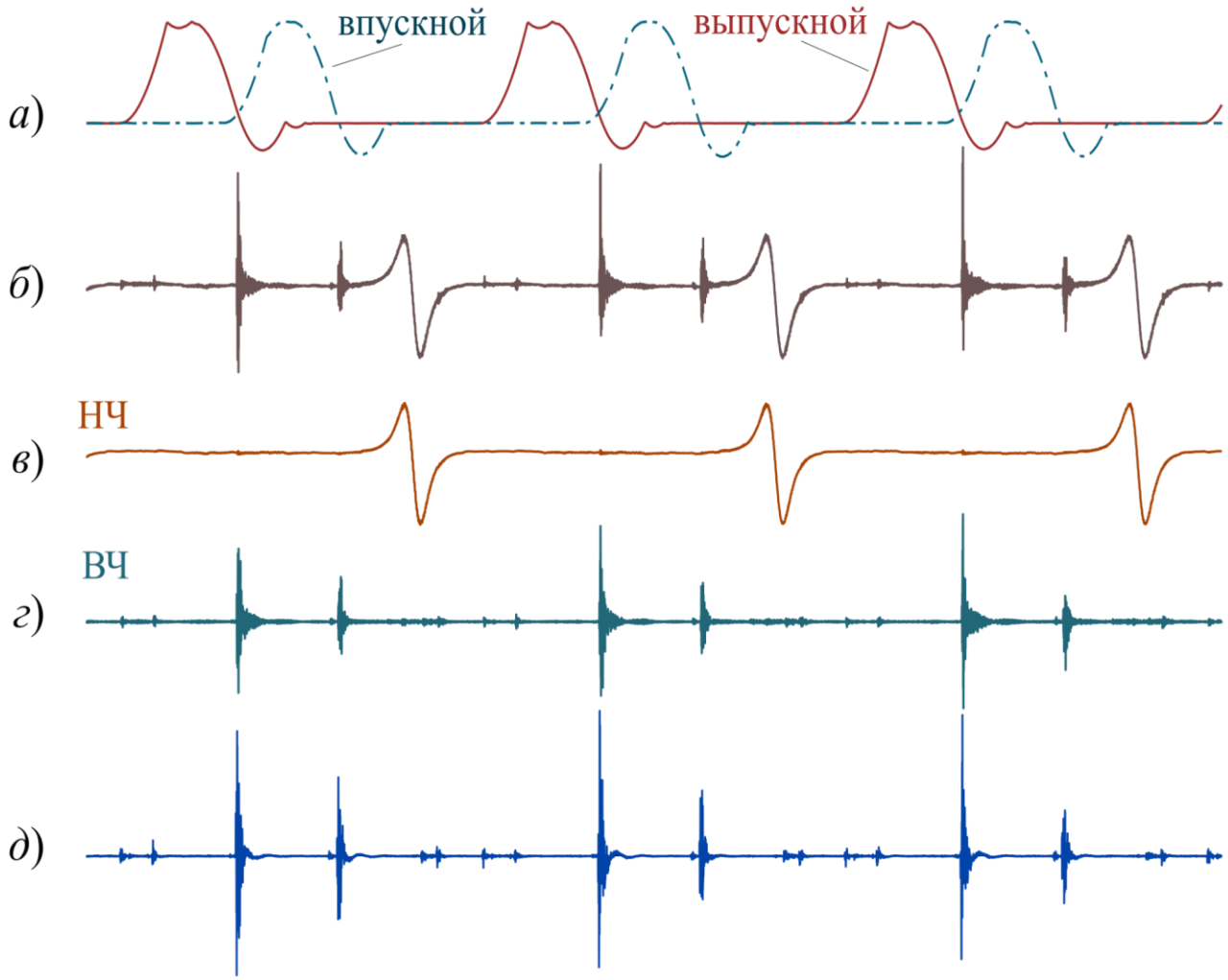


Рис. 5. Сопоставление сигналов различной природы: а) – сигналы с датчиков линейного перемещения клапанов; б) – сигнал скорости изменения давления без фильтрации; в), г) – то же с фильтрами низкой и высокой частоты соответственно (частота среза 4,8 кГц); д) – сигнал с пьезоэлектрического датчика вибрации

Сопоставление результатов одновременной записи сигналов скорости изменения давления с пьезоэлектрического датчика давления Kistler 6613EQ13-C и с виброакселерометра ДН-4-М1, установленного на магнитном креплении вблизи датчика давления, показал их хорошее совпадение, как по фазовым, так и по спектральным характеристикам виброимпульсов, возникающих при закрытии клапанов.

Детальные результаты экспериментальных исследований в этом направлении, включающие оценку возможности диагностирования клапанного механизма, представлены в работах [11, 12].

Оценка своевременности подачи топлива

Возвращаясь к рис. 2*а* отметим, что форма сигнала позволяет сравнительно легко определить локальный минимум на кривой скорости изменения давления – точку i, которой соответствует начало сгорания топлива. С целью простоты определения своевременности подачи топлива можно рекомендовать для этой цели безразмерный критерий k_{inj}

$$k_{inj} = \frac{(dp/dt)_1 - (dp/dt)_i}{2(dp/dt)_1}, \qquad (3)$$

где $(dp/dt)_i$ – скорость нарастания давления в момент воспламенения.

Анализ выражения (3) с учетом отмеченных ранее свойств преобразователя сигнала показывает, что, как и для рассмотренных выше критерия k_{seal} и коэффициента k_n, нет необходимости тарировать сигнал. На рис. 6 представлены результаты экспериментальной проверки взаимосвязи этого критерия с углом опережения подачи топлива, выполненные в лабораторных условиях на отсеке дизеля ОЧН18/22. Подробные результаты теоретических и экспериментальных исследований приведены в работах [7, 13].

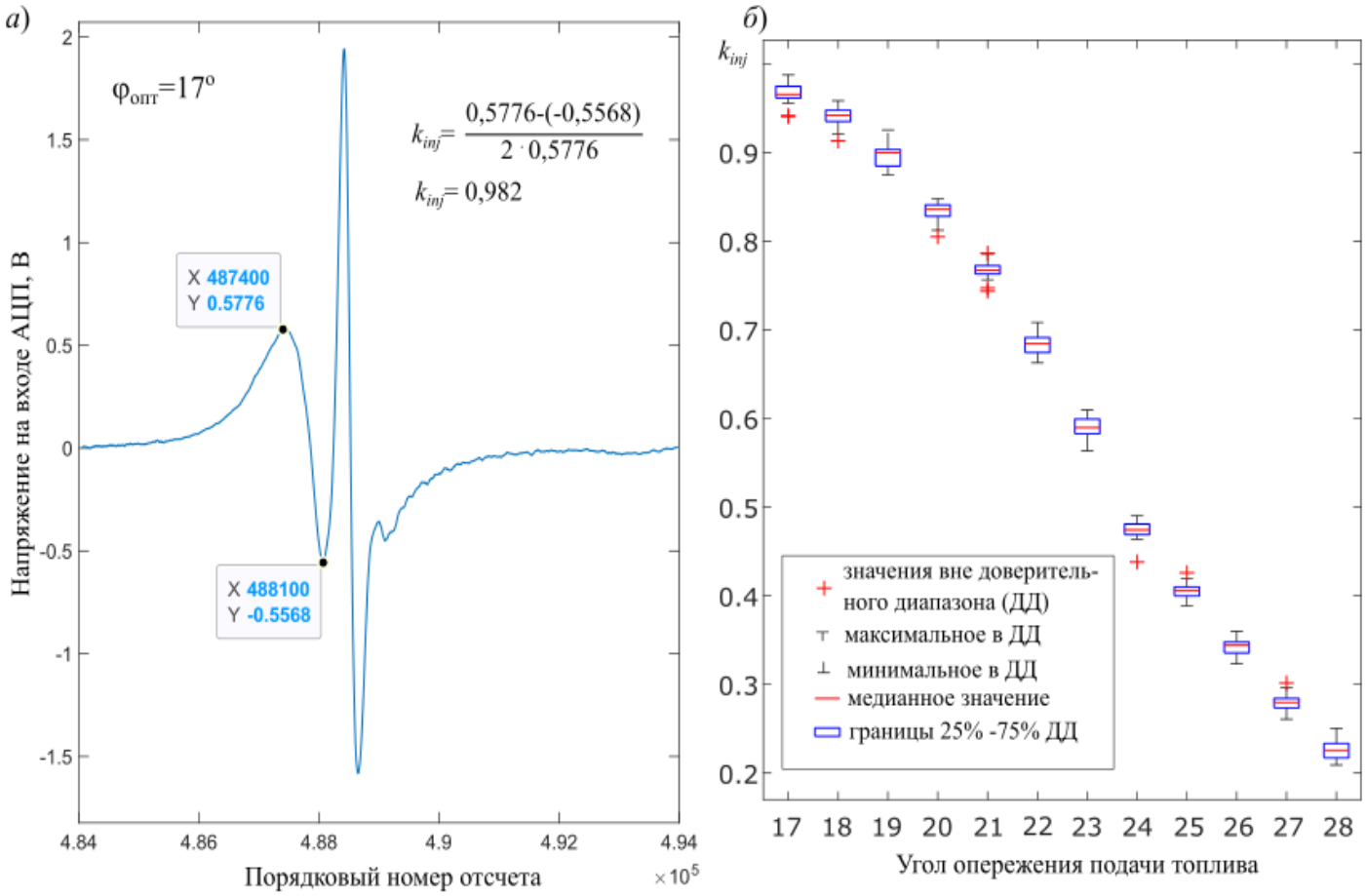


Рис. 6. Пример определения критерия подачи топлива (а) и его связь с углом опережения подачи топлива (б)

Возможность получения индикаторной диаграммы

Рассмотренные выше свойства сигнала скорости изменения давления показывают его самостоятельную ценность для диагностики. Тем не менее, может возникнуть необходимость получения индикаторной диаграммы, анализ которой, безусловно, может помочь в извлечении дополнительной диагностической информации. С этой целью нами были разработаны и экспериментально опробованы методики, основанные на численном интегрировании сигнала скорости изменения давления, в том числе, и при асинхронном измерении сигнала (без датчика положения коленчатого вала). Последнее возможно благодаря отмеченной выше особенности максимума скорости нарастания на участке сжатия, положение которого относительно ВМТ достаточно стабильно. Подробное описание методики тарировки датчика, численного интегрирования, корректировки постоянной составляющей и положения ВМТ представлены в работах [12, 14]. На рис. 7 показаны результаты сравнения развернутых индикаторных диаграмм, полученных с помощью датчика давления ДДГ200/700 производства НПК «Гарант» с традиционным усилителем заряда и по указанной методике.

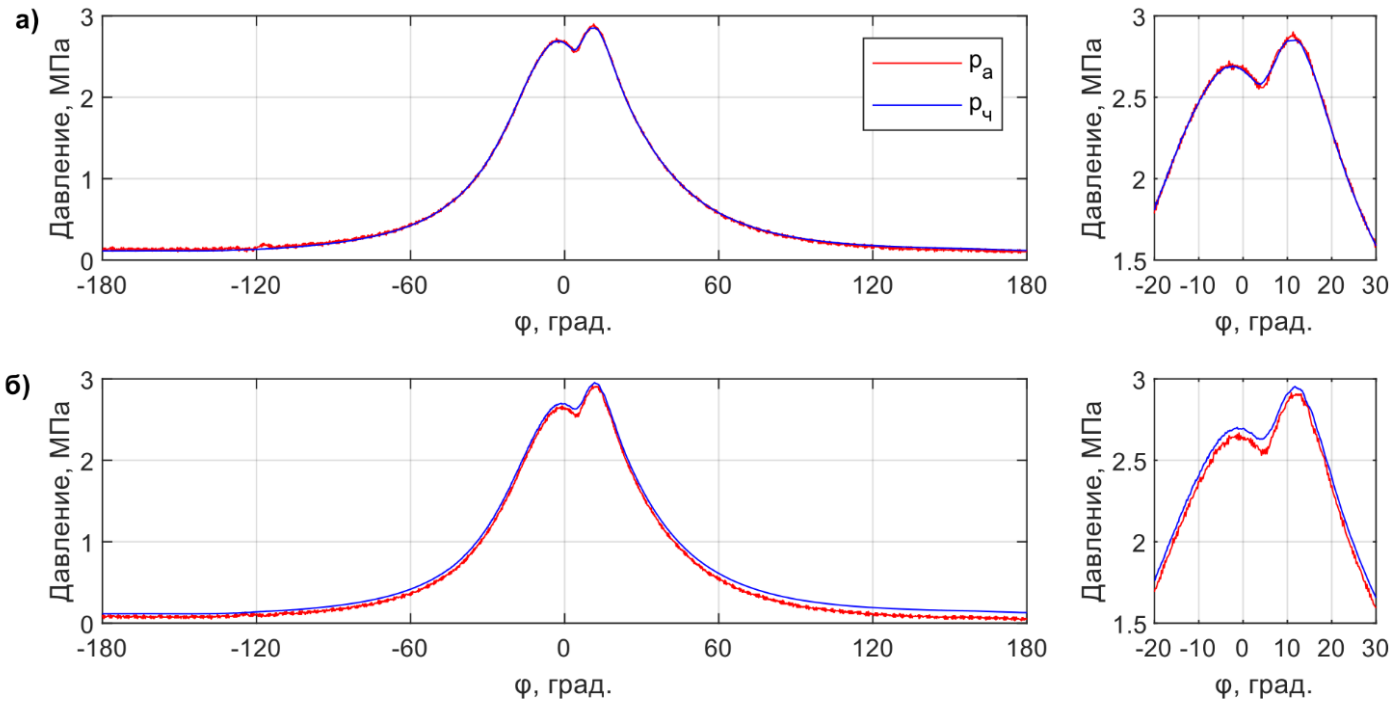


Рис. 7. Примеры индикаторных диаграмм, полученных с использованием датчика скорости изменения давления и датчика давления: а) - цикл с наименьшим расхождением сигналов; б) - цикл с наибольшим расхождением сигналов; p_a – давление, полученное непосредственным измерением; $p_ч$ – давление, полученное расчетным анализом сигнала скорости изменения давления; φ – угол поворота коленчатого вала относительно ВМТ такта сжатия

Оба датчика были установлены через тройник на индикаторный кран двигателя ОЧН18/22. Запись сигналов выполнялась одновременно на протяжении 30-и последовательных циклов дизеля с частотой дискретизации 22,5 кГц. Сигнал скорости изменения давления обрабатывался по разработанной методике [14]. Для обоих сигналов выполнялась коррекция положения ВМТ и постоянной составляющей давления.

Недостатки сигнала скорости изменения давления

На текущий момент мы выявили два недостатка сигнала скорости изменения давления в сравнении с сигналом давления.

Во-первых, наличие вибрационной составляющей в сигнале требует применения высокой частоты дискретизации при оцифровке сигнала. Хорошие результаты можно получить начиная с частоты 20 кГц. В противном случае частотные характеристики вибрации будут получены неверно и результат численного интегрирования сигнала также будет искажен.

Во-вторых, на различных скоростных и нагрузочных режимах максимальные амплитуды сигнала скорости изменения давления изменяются значительно выше, чем у сигнала давления. Поэтому, преобразователь, спроектированный для максимальных режимов работы двигателя, будет иметь низкое разрешение при измерении сигнала на режиме холостого хода. И, наоборот, преобразователь, спроектированный на малые нагрузки двигателя, будет “обрезать” сигнал скорости. Интегрирование такого сигнала приведет к значительным искажениям вычисляемого сигнала давления.

Считаем необходимым отметить, что оба недостатка следует учитывать при использовании сигнала для последующего получения индикаторной диаграммы. При разработке средств диагностики, основанных на определении представленных в работе безразмерных критериев и коэффициентов, оба недостатка не являются критичными.

Выводы

1) Схемотехника преобразователя для получения сигнала скорости изменения давления с пьезоэлектрического датчика давления проста и обеспечивает линейную зависимость выходного напряжения со скоростью изменения давления.
2) Предложены безразмерные критерии и коэффициенты, позволяющие исключительно анализом формы исходного сигнала оценить своевременность подачи топлива и гидравлическую плотность цилиндра. Последнее может быть выполнено как при отключенной подаче топлива, так и на рабочих режимах.
3) Вибрационная составляющая сигнала увеличивает его информационную ценность, позволяя наряду с сигналом скорости изменения давления получить сигнал, идентичный сигналу с датчика виброускорения.
4) Традиционная индикаторная диаграмма может быть получена цифровой обработкой сигнала скорости изменения давления в том числе и при его асинхронном измерении без датчика положения коленчатого вала.

Список используемых источников

1. Коньков, А.Ю. Диагностирование дизеля на основе идентификации рабочих процессов: / А.Ю. Коньков, В.А. Лашко. Владивосток: Дальнаука, 2014, 365.
2. Sensors for combustion analysis : Product catalog [Электронный ресурс] // AVL. - 2019. - Режим доступа: https://www.avl.com/documents/10138/0/Sensorenkatalog2018_web.pdf (дата обращения 05.03.2025).
3. Pressure sensors [электронный ресурс] / Kistler Group 2024 , 2007. Режим доступа: https://www.kistler.com/INT/en/c/pressure-sensors/CG21-pressure-sensors
4. Bueno A. V., Velásquez J. A., Milanez L. F. “A new engine indicating measurement procedure for combustion heat release analysis.” Applied Thermal Engineering, vol. 29, no. 8. 2009, pp. 1657-1675. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.07.023
5. José M. Luján, Vicente Bermúdez, Carlos Guardiola, Ali Abbad. “A methodology for combustion detection in diesel engines through in-cylinder pressure derivative signal.” Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 24, issue 7, 2010, pp. 2261-2275. doi.org/10.1016/j.ymssp.2009.12.012.
6. Диагностика автотракторных двигателей. – 2-е изд. перераб. и доп. / под ред. Н.С. Ждановского. – Л. : Колос, 1977. – 264 с.
7. Конькова, И.Д. Диагностирование тепловозного дизеля по сигналу скорости изменения внутрицилиндрового давления: дис. … канд. техн. наук; 06.04.21; защищена / Конькова Ирина Дмитриевна. – Хабаровск, 2021. – 154 с.
8. Коньков, А.Ю. Диагностирование неплотности цилиндра дизеля по результатам измерения скорости изменения внутрицилиндрового давления / А.Ю. Коньков, А.И. Трунов, И.Д. Конькова, Ю.А. Давыдов // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – №4(51). – 2018. – С. 9-16.
9. Лашко, В.А. Применение методов имитационного моделирования рабочих процессов дизеля при интерпретации результатов диагностического эксперимента / В.А. Лашко, А.Ю. Коньков // Известия высших учебных заведений. – №6. – 2007. – С. 46-53.
10. Пучкова, А.Д. Модель тепловыделения в цилиндрах дизеля и ее компьютерная реализация в среде SCILAB/COS / А.Д. Пучкова, А.Ю. Коньков, И.Д. Конькова // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – №2(35). – 2023. – С. 99-105.
11. Демаков, К.К. О возможности определения тепловых зазоров клапанов анализом сигнала скорости изменения внутрицилиндрового давления дизеля / К.К. Демаков, А.Ю. Коньков // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке : труды Всероссийской научно-практической конференции творческой молодежи с международным участием (Хабаровск, 16–19 апреля 2024 г.). В 2 т. Т. 1. – С. 45-50.
12. Коньков, А.Ю. Индицирование дизеля цифровой обработкой сигнала скорости изменения внутрицилиндрового давления / А.Ю. Коньков, К.К. Демаков, А.И. Трунов // Морские интеллектуальные технологии. – 2024. – №2. – Часть 1. – С. 138-145.
13. Davydov I., Konkova I., Konkov A. (2020) Diagnostic Criteria for the Signal of the First-Order Derivative of Diesel Engine in-Cylinder Pressure. In: Popovic Z., Manakov A., Breskich V. (eds) VIII International Scientific Siberian Transport Forum. TransSiberia 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1115. P. 329-339. Springer, Cham.
14. Коньков, А.Ю. Экспериментальная проверка способа индицирования дизеля по данным асинхронного измерения скорости изменения внутрицилиндрового давления / А.Ю. Коньков, А.И. Трунов, К.К. Демаков // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2023. – №3(70). – С. 7-18.

ДВГУПС, г. Хабаровск

Коньков А.Ю.: д.т.н., доц., профессор кафедры «Транспорт железных дорог»;

Конькова И.Д.: к.т.н., доцент кафедры «Транспорт железных дорог»;

Демаков К.К.: аспирант кафедры «Транспортно-технологические комплексы».

УДК 629.4.021 ГРНТИ 55.41

А. С. Космодамианский, О. В. Измеров, А. Е. Карпов

ТЕХНИЧЕСКАЯ ИННОВАЦИОНИКА И ДИАГНОСТИКА УЗЛОВ И СИСТЕМ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Аннотация: *Рассмотрен вопрос поиска методики проектирования новых диагностических систем для железнодорожного подвижного состава, в частности, для локомотивов, в условиях недостатка знания и опыта при проектировании новых систем. Предложено для решения указанной задачи адаптировать методологию технической инновационики, ранее созданную авторами для проектирования систем инженерного эксперимента. Предложен общий алгоритм создания новых диагностических систем.*

Ключевые слова: *теория конструирования, техническая диагностика, информационные системы, локомотивы, моторвагонный подвижной состав.*

Введение

В настоящее время практика проектирования диагностических систем все чаще сталкивается с одной и той же трудностью: чем выше степень новизны диагностической системы и используемых при ее реализации технических решений, тем в большей степени проектировщик сталкивается с недостатком информации, необходимой для разработки, и, соответственно, тем в меньшей степени может положиться на опыт, накопленный при предыдущих разработках. Даже если взять такой относительно изученный узел экипажной части, как моторно-осевые подшипники (МОП) качения, то, как отмечено в [1], «их техническое состояние определяется совокупностью различных по природе и еще до конца не изученных процессов». Еще более сложная задача возникает в случае, если заранее не известно, какие физические явления могут быть использованы для оценки состояния узла или детали. Развитие предиктивной аналитики и систем искусственного интеллекта не устраняет данной трудности, поскольку эти направления точно так же основаны на неявном допущении, что разработчик располагает достаточной информацией для выбора технических решений.

Таким образом, необходимо использование таких методов создания системы диагностики, которые позволили бы избегать ошибок в условиях недостатка знаний и опыта. К подобным методам относятся методы технической инновационики [2] – направления, которое развивается в нашей стране в течение последних 15 лет. Основной проблемой использования данных методов является то, что они разрабатывались в основном для конструирования машиностроительных изделий, и вопросам применения технической инновационики к задачам диагностики посвящено относительно мало работ [3,4]. Целью данной статьи является попытка решения указанной проблемы.

Анализ проблемы

В технической инновационике конструирование технического объекта рассматривается, как информационная технология, а именно, создание информационного продукта, который определяет свойства технического объекта путем определения способов управления явлениями природы, а также способы производства этого технического объекта. Систему диагностики мы также можем рассматривать, как техническое изделие, а именно информационную систему, предназначенную для получения информации о диагностируемом объекте, на основании которой принимаются решения о действиях в отношении этого объекта. Таким образом, в основу методов разработки диагностических систем можно положить методы создания методики инженерного анализа, ранее рассмотренные авторами в [5].

В качестве важных моментов технической инновационики необходимо отметить следующие:

- введение понятия унинформации, т.е. описания информации, изначально неизвестной, которую необходимо «разведать», получить для принятия решения;

- алгоритмизация процедур конструирования;

- наличие общей части алгоритмов процедур конструирования и производной деятельности в виде матрицы уровней средств управления, сущность которой заключается в том, что разработчик изначально создает некую идеальную структуру функций объекта, а потом определяет физические эффекты, позволяющие реализовать данные функции, и, на следующих шагах – конкретные технические решения, в которых используются эти эффекты (рис.1). Применительно к вопросам инженерного анализа в технической инновационике введено понятие интерфейса средства измерений с выделением физического и логического уровня его реализации. Интерфейсом в средствах и методах измерения считается способ предоставления информации, предназначенный для обмена информацией между устройствами, входящими в состав объекта и системы диагностики, а также между системой диагностики, органами чувств оператора и его сознанием. К физическому уровню реализации интерфейса относится устройство, служащее для обмена информацией за счет того, что оно позволяет получить информацию о требуемом физическом свойстве объекта путем соответствующего изменения другого физического свойства (свойств) данного или иного объекта. К логическому уровню реализации интерфейса отнесен способ предоставления информации, который существенно меняет ее форму представления. Эмпирически установлено, что от числа интерфейсов зависят погрешности передаваемой информации и вероятность ошибок при принятии решения. При этом применительно к диагностике проблема конечного интерфейса усложнена тем, что оператор имеет только общее представление о преобразовании информации в системе и правилах распознавания ситуации, а тот факт, что система предлагает готовые варианты действий психологически ориентирует на то, чтобы считать любую ситуацию штатной. В связи с этим требуется,

помимо конечного интерфейса, т.е. интерфейса, представляющего информацию в виде, непосредственно воспринимаемом оператором, учитывать при проектировании наличие внутренних интерфейсов оператора, т.е. преобразования информации, ощущаемой органами чувств, в информацию в виде образов, формируемых в сознании оператора, которыми он и оперирует при принятии решений. В связи с этим в технической инновационике рассматриваются вопросы снижения влияния ошибок внутренних интерфейсов.

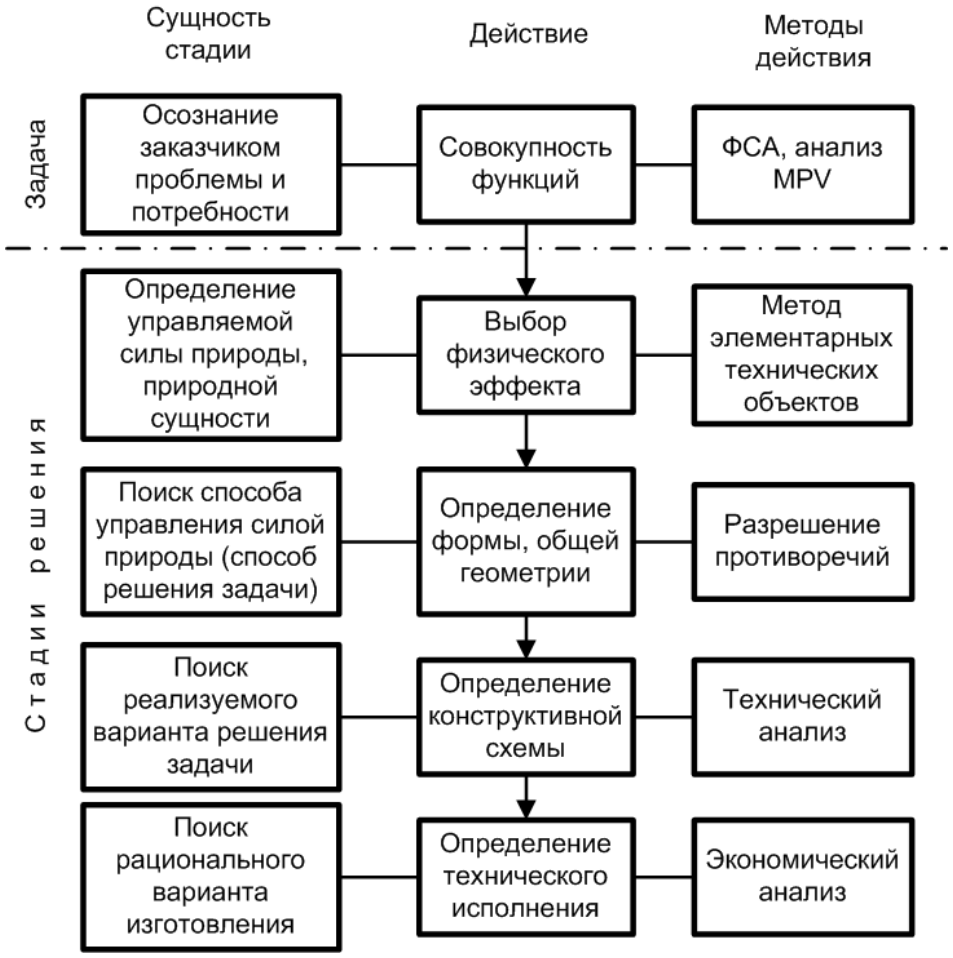


Рисунок 1 – Матрица уровней средств управления при конструировании.

Предлагаемые решения

Авторами предложен общий алгоритм разработки системы диагностики (рис.2).

Исходное событие, запускающее процедуру - появление у эксплуатационных служб потребности в информации для вывода о способности диагностируемого объекта выполнять свои функции в течение определенного периода времени, на основании чего лицо, принимающее решение, производит действия, определенное регламентирующими документами. Далее, на постановочной стадии, производится формализация потребностей, которая начинается с описания унинформации, т.е. информационного запроса в виде описания состояния того или иного узла, или агрегата, которое позволяет прогнозировать дальнейшие события (в виде количественных величин, функциональных зависимостей, рангов свойств, логических зависимостей и т.п.). Общая постановка задачи заключается в определении истинных значений унинформации, на основании чего

производится описание функций информационной системы (формулировка идеальных функций диагностики). На основании описания идеальных функций производится процедура составления требований к диагностике.

Следующая стадия (можно назвать функциональной) состоит из создания функциональной и физической структур диагностической системы. Функциональная структура – это детализация идеальных функций диагностики, как информационной системы, определений взаимосвязей между ними, информационных потоков и видов обработки информации. Если априорная информация о взаимосвязи отслеживаемых явлений и диагностических признаков недостаточна, необходимо представить будущую диагностическую систему в виде элементарного технического объекта, как показано в [4], для определения физических ресурсов, соответствующих информационным. В состав функциональной структуры входит алгоритм использования диагностической информации, состоящий из алгоритмов обработки информации (фильтрация помех, вычисление диагностических признаков и т.п.), представления информации (представление оценок диагностических признаков в сообщения) и принятия решения (набор правил распознавания ситуации и действий). Во время процедуры создания физической структуры определяется, на основании каких физических эффектов будет реализован процесс измерений и оценки и способы использования этих физических эффектов.

На предметной стадии проектировщик переходит к созданию геометрической структуры диагностической системы и определению технических средств ее реализации, т.е. определяет геометрическое расположение точек измерения диагностических параметров, размещение преобразовательной аппаратуры, устройств пользовательского интерфейса, коммуникаций и т.п. и выбирает измерительные датчики, средства их крепления на объекте, средства связи их с измерительно-регистрирующей аппаратурой и телеметрия, сама регистрирующая аппаратура, средства обработки данных, устройства сигнализации, информационные системы и т.п.

На стадии результата производится макетирование и доводка диагностической системы в стендовых условиях, с выявлением и устранением недостатков.

Если на каком-либо из шагов проверки на соответствие реализуемой диагностической системе идеальным представлениям о ней результат получается отрицательным, это указывает на наличие дефицита информации. В этом случае разработчик возвращается к стадии описания унинформации и постановки задачи.

Приведенный алгоритм доказывает принципиальную возможность и целесообразность использования методологии технической инновационики при разработке различных средств технической диагностики подвижного состава, включая размещаемые на самом подвижном составе. Дальнейшее развитие этих методов возможно путем анализа и обобщения опыта создания новых средств диагностики с их применением.

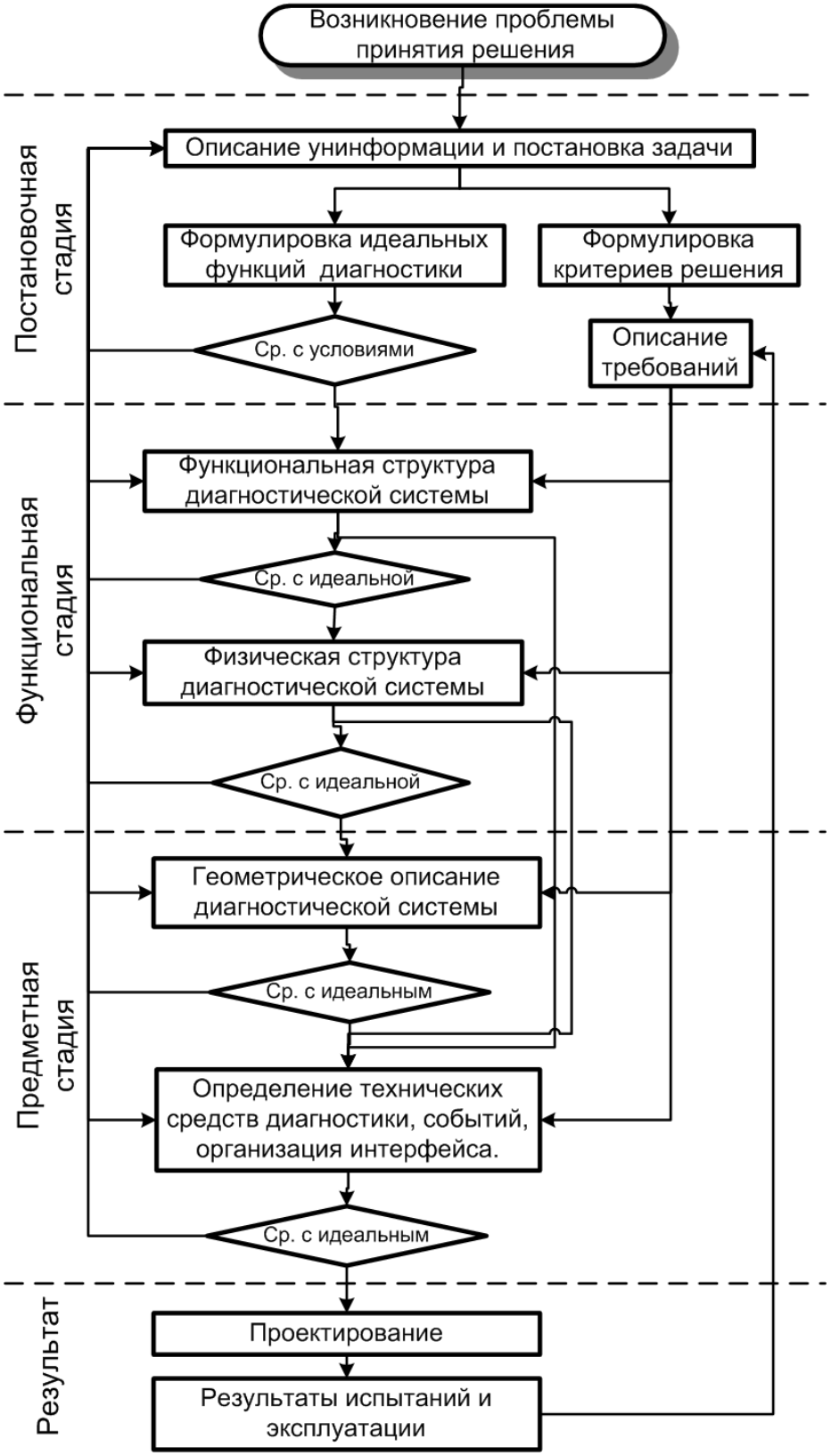


Рисунок 2 – Общий алгоритм создания диагностической системы

Выводы

1. Установлено, что с расширением сферы использования разнообразных диагностических систем на железнодорожном подвижном составе, и, в частности, на локомотивах, все большее значение приобретает недостаток знания и опыта при проектировании новых систем, что не учитывается существующими методиками проектирования.

2. Доказано, что в качестве методов проектирования диагностических систем можно использовать методологию технической инновационики, как нового направления в общей теории конструирования, используя методику, созданную ранее для проектирования систем инженерного эксперимента.
3. Авторами предложен общий алгоритм создания новых диагностических систем.

Список использованных источников

1. Тэттер В. Ю. Разработка технологий и оборудования для вибродиагностирования колесно-моторных блоков локомотивов – автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.07- «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» / В.Ю. Тэттер. – Омск: ОмГУПС, 2005 – 20 с.
2. Техническая инновационика как научное направление / В.И. Воробьев, М.И. Борзенков, С.Н. Злобин, О.В. Измеров, А.Е. Карпов // Материалы международной научно-технической конференции «Динамика, надежность и долговечность механических и биомеханических систем» Орел: Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, № 4 (366), 2024. - С. 32-40.
3. Диагностика автоматизированных систем как информационные технологии: учебное пособие для вузов / С.Н. Злобин, О.В. Измеров, М.И. Борзенков, А.С. Космодамианский, О.В. Дорофеев, В.И. Воробьев, А.А. Пугачев, А.В. Самотканов; под ред. О.В. Измерова. – Орел: ФГБОУ ВПО «Госуниверситет - УНПК», 2014. – 169 с.: ил.
4. Диагностика автоматизированных систем как информационные технологии: учебное пособие для вузов / С.Н. Злобин, А.С. Космодамианский, М.И. Борзенков, О.В.Измеров, О.В. Дорофеев, В.И. Воробьев, А.А. Пугачев, Д.В. Воробьев, А.В. Самотканов, Д.А. Бондаренко; под ред. О.В. Измерова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Орел: ФГБОУ ВПО «Госуниверситет - УНПК», 2014. – 232 с
5. Техническая инновационика. Проблемы инженерного анализа технических систем: монография. / [О.В. Измеров и др.]. – Орел: Госуниверситет – УНПК, 2013, - 261 с.

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

Космодамианский Андрей Сергеевич: д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Тяговый подвижной состав».
Измеров Олег Васильевич: соискатель кафедры «Подвижной состав железных дорог», БГТУ, г. Брянск.

Карпов Артём Евгеньевич: ассистент кафедры «Тяговый подвижной состав», заведующий лабораторией «Системы управления транспортными средствами».

УДК 629.4.021 ГРНТИ 55.41

А. С. Космодамианский, В. И. Воробьев, О. В. Измеров, А. Е. Карпов

ТЕХНИЧЕСКАЯ ИННОВАЦИОНИКА И ПОВЫШЕНИЕ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ ТЯГОВОГО ПРИВОДА

Аннотация: *Рассмотрен вопрос поиска методики анализа конструкции локомотивов, позволяющей находить рациональные решения. В результате анализа узлов тягового привода зарубежных локомотивов с использованием методов технической инновационики выявлены недостатки, приводящие к ухудшению технологичности ремонта. Предложены новые конструкции тягового привода локомотивов и его узлов, обеспечивающие более высокую ремонтопригодность по сравнению с известными зарубежными аналогами. Предложено использовать методы технической инновационики для поиска мер снижения расходов на ремонт локомотивов. Авторами получено 5 патентов на полезные модели и подана заявка на получение патента.*

Ключевые слова: *теория конструирования, изобретательское творчество, инженерный эксперимент, кибернетика, прогнозирование, математическое моделирование, локомотивы, моторвагонный подвижной состав.*

Введение

Расширение использования агрегатного ремонта локомотивов и фирменного сервиса, с одной стороны, позволяет повысить качество ремонта в целом и сократить издержки на содержание и развитие основных фондов в виде производственных мощностей ремонтно-обслуживающих предприятий, находящихся в составе ОАО «РЖД». С другой стороны, это усиливает зависимость эксплуатационных служб железных дорог от производителей локомотивов и затрудняет импортозамещение, учитывая, что в эксплуатации находится значительное количество локомотивов, созданных в сотрудничестве с зарубежными фирмами, в конструкции которых были использованы импортные узлы. Так, к настоящему времени было выпущено около 500 секций электровозов 2ЭС7 и 2ЭС10, в которых использован тяговый привод с использованием комплектующих изделий фирмы Siemens. Таким образом, изменение технологии и организации ремонта не снимает задачи повышения технологичности изготовления и ремонта тягового привода.

Обычно технические решения принято выбирать с учетом изучения современных тенденций конструирования в мировой практике. Такой подход применительно к локомотивостроению мог быть рационален в 50-70-х годах прошлого века, когда число предприятий - разработчиков насчитывалось десятками из-за национальной разобщенности рынков. К настоящему времени в мировом локомотивостроении сложилась ситуация, близкая к той, которая 10 – 20 лет назад возникла в микроэлектронике и производстве программного обеспечения, а именно: технические

решения стали определяться политикой нескольких крупных компаний, заинтересованных в невозможности проникновения на рынок новых производителей за счет продвижения таких конструкций, которые технологически сложно воспроизвести конкурентам.

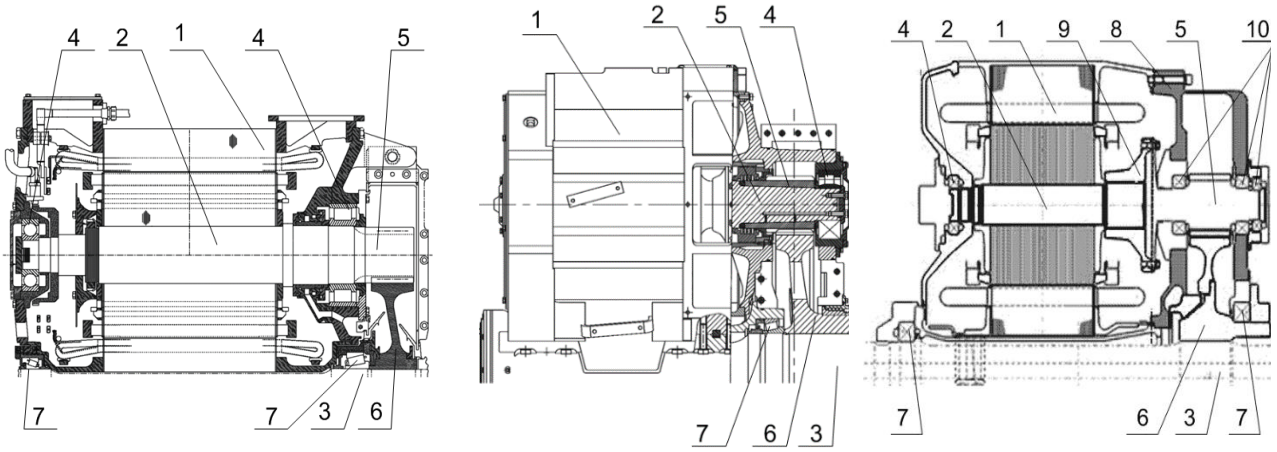
Таким образом, возникает проблема методов выбора вариантов конструкции узлов локомотива (в рассматриваемом случае – тягового привода) применительно к задаче повышения технологичности производства и ремонта его в отечественных условиях. Предлагаемая статья является попыткой решения указанной проблемы.

Анализ проблемы

Поскольку на отечественных ж.д. наиболее распространены грузовые магистральные локомотивы, а интенсивность их работы, рассмотрим примеры современных зарубежные конструкций тягового привода грузовых локомотивов с бесколлекторными тяговыми электродвигателями (ТЭД).

К настоящему времени для абсолютного большинства грузовых локомотивов зарубежных фирм с бесколлекторными ТЭД применяется опорно-осевой привод (рис.1). Исключение составляет грузовой тепловоз ER20 CF производства фирмы Siemens, в котором применен опорно-рамный привод с осевым редуктором [1].

Рассмотрим выбор технических решений в данных тяговых приводах с точки зрения методов технической инновационики [2…4], то есть, реконструируем логику проектировщика, исходя из решаемых задач и технологических возможностей.



а) б) в)

Рисунок 1 – Опорно-осевой привод зарубежных грузовых локомотивов с бесколлекторными тяговыми электродвигателями:
а) тепловоз ТЭ33а; б) электровоз БКГ-1; в) электровоз 2ЭВ-120;
1 – ТЭД; 2 – вал ТЭД; 3 – ось колесной пары; 4 – роторный подшипник; 5 – малое зубчатое колесо; 6 – большое зубчатое колесо; 7 – осевой подшипник; 8 – корпус редуктора; 9 – мембранная муфта; 10 – подшипники редуктора.

Общей причиной, послуживших для создания конструкций рис. 1а-в, была необходимость использовать те потенциальные преимущества, которые асинхронный

ТЭД, то есть, снижение общей и неподрессоренной массы привода за счет повышения максимального числа оборотов ТЭД. В свою очередь, это требовало повышения передаточного числа тяговой передачи, при этом использование двухступенчатой передачи привело бы не только к усложнению последней, но и к существенному уменьшению осевого габарита ТЭД, а, следовательно, его крутящего момента, что усложняло решение задачи. Таким образом, во всех трех случаях пришлось решать задачу уменьшения диаметра малого зубчатого колеса. При традиционном размещении зубчатого колеса на валу с помощью посадки с гарантированным натягом прочность соединения с натягом получалась заведомо недостаточной, как и прочность хвостовика вала на изгиб.

На рис. 1а изображен привод тепловоза ТЭ33а (ES44ACi, разработка компании General Electric, США). Антагонизм свойств (нельзя уменьшать диаметр посадки из-за снижения прочности) в этой конструкции снят тем, что посадка с натягом вообще отсутствует, а зубья нарезаны на самом валу ТЭД. Такой вариант, во-первых, требует изготовления вала из высоколегированной стали, а, во-вторых, существенно снижает ремонтопригодность, поскольку замена изношенного вала-шестерни требует разборки всего двигателя с распрессовкой пакета стали ротора, насаженного на вал без промежуточной гильзы. Восстановление зубьев путем наплавки с последующей механической обработкой, причем в сборе с двигателем, когда канавки для выхода фрезы находятся под обоймой роторного подшипника, также представляется технологически сложной задачей. Съемным зубчатое колесо может быть сделано за счет выполнения вала полым и запрессовки хвостовика малого зубчатого колеса внутрь полого вала, как это сделано на электровозе DJ1 китайских производителей, но это возможно при увеличении диаметра малого зубчатого колеса.

В приводе на рис. 1б электровоза БКГ-1 разработки Датунского завода, КНР, совместно с компанией Alstom, Франция, на основе электровоза Alstom Prima 47000, проблема прочности посадки малого зубчатого колеса на вал решена путем увеличения длины ступицы. Чтобы снять антагонизм свойств (нельзя увеличить длину хвостовика из-за ограничения габаритов), роторный подшипник размещен на конце вала, а малое зубчатое колесо – между подшипником и пакетом стали ротора, что позволило существенно увеличить длину посадки и уменьшить толщину зубчатого колеса за счет снижения натяга. Для замены малого зубчатого колеса требуется разборка ТЭД, но без спрессовки пакета ротора с вала.

Приводы на рис. 1а и рис. 1б имеют общий недостаток: усилия от зубчатой передачи в основном приходятся на ближний роторный подшипник, что, в сочетании с увеличением частоты вращения вала ТЭД, создает препятствия для повышения его срока службы. Антагонизм свойств в данном случае состоит в том, что возможность увеличения размеров подшипника для повышения его несущей способности также ограничена по условиям нагрева при повышенной частоте вращения вала. Данный антагонизм свойств был снят в приводе интегрированной компоновки электровоза 2ЭВ-120, разработанном

фирмой Bombardier, Канада (рис.1в), за счет того, что малое зубчатое колесо, выполненное в виде вал-шестерни, симметрично опирается на два подшипника, а вал ротора ТЭД опирается на подшипники малого зубчатого колеса через металлическую диафрагменную муфту, имеющую высокую жесткость в радиальном направлении, благодаря чему критическое число оборотов вала значительно выше предельного числа оборотов ТЭД. Аналогичная конструкция применена в тяговом приводе фирмы Siemens, Германия, установленном на электровозах 2ЭС7 и 2ЭС10.

Увеличение срока службы подшипников малого зубчатого колеса для интегрированного привода на рис. 1в достигнуто за счет существенного ухудшения технологичности его изготовления и ремонта, поскольку положение зубчатых колес относительно друг друга в этом случае зависит не только от точности изготовления корпуса редуктора, но и корпуса ТЭД, а также ступицы ведомой шестерни, на которую опирается осевой подшипник со стороны тяговой передачи, при этом базирование производится по поверхностям, перпендикулярным друг другу, что требует более высокой точности обработки и монтажа.

При этом все три рассмотренные вида тягового привода не имеют упругого звена в валопроводах. Это ведет к росту динамических моментов в приводе и ухудшению сцепления колеса с рельсом, что было отмечено еще в [5,6].

Полагая для упрощения, что при прохождении неровностей пути не происходит скольжения колесной пары по рельсу, зависимость динамического момента на валу тягового электродвигателя ТЭД колес колесной пары от вертикальных ускорений оси колесной пары можно в первом приближении определить на основании [7] следующим образом:

$$M_{д} = \frac{I_{р}(i+1)}{c}\ddot{x}_{кп}; \qquad (1)$$

где

$\ddot{x}_{кп}$ - вертикальные ускорения оси колесной пары в расчетном режиме тяги, м/сек;

с - расстояние между точкой подвеса к раме (точкой поворота КМБ при прохождении вертикальных неровностей) и осью колесной пары, м;

$I_р$ – момент инерции ротора ТЭД, кг/м^2;

I - передаточное число тяговой передачи.

Авторами получены следующие приближенные значения динамического момента:

- для электровоза 2ЭС10 среднеквадратическое значение $М_д$=4 кНм, что составляет примерно 60% от тягового момента двигателя 1ТВ-2822 в расчетном режиме;
- для тепловоза ТЭ33а среднемаксимальное значение $М_д$ = 6,4 кНм, что соответствует режиму тяги при коэффициенте сцепления ψ = 0,28.

Таким образом, динамическая составляющая момента при жесткой тяговой передаче приводит как к сокращению срока службы элементов тягового привода, так и к сокращению службы бандажей либо цельнокатаных колес локомотива из-за увеличения скольжения их по рельсам (в [5] указано, что применение упругого зубчатого колеса (УЗК) на отечественных грузовых тепловозах позволило на 15% снизить темпы износа бандажей). В то же время применение упругого звена в виде УЗК в опорно-осевом тяговом приводе имело смысл в условиях, когда данный тип привода, во-первых, имел простую конструкцию, поскольку для замены эластичных элементов УЗК требовалось снимать кожух тяговой передачи, и, во-вторых, когда срок службы тяговой передачи был сопоставим со сроком службы УЗК. Переход на моторно-осевые подшипники (МОП) качения сделал размещение упругих элементов в зубчатом колесе нерациональным [8], по крайней мере, до значительного увеличения срока службы УЗК.

Из изложенного следует вывод, что рассмотренные конструктивные решения содержат противоречие требований к ним. С точки зрения долговечности подшипников малого зубчатого колеса наиболее предпочтительна конструкция, изображенная на рис. 1в. При этом, для того, чтобы повысить технологичность данной конструкции, необходимо выполнить ТЭД и осевой редуктор раздельными, как это сделано в опорно-рамном приводе с осевым редуктором, однако в то же время ТЭД и осевой редуктор должны быть соединены друг с другом, поскольку размещение упруго-компенсирующего механизма в полом валу ТЭД невозможно из-за необходимости увеличить диаметр вала ротора и внутренний диаметр роторных подшипников, что, в свою очередь, ведет к их перегреву из-за высокой частоты вращения.

Предлагаемые решения

Рассмотрим физический смысл выявленных противоречий требований. Требование «ТЭД и осевой редуктор должны быть соединены друг с другом» означает, что между ними должна быть связь, которая препятствует их перемещению друг относительно друга. Требование «ТЭД и осевой редуктор не должны быть соединены друг с другом» означает, что между ними не должно быть связи. Таким образом, антагонизм свойств данного устройства заключается в том, что физическая связь между ТЭД и осевым редуктором одновременно должна быть и ее не должно быть. На основании этого, мы можем сформулировать функцию связи, как устройства, которое препятствует и не препятствует перемещению относительно друг друга данных узлов. Физически это реализуемо, если связь является гибкой или шарнирной и допускает перемещения ТЭД и осевого редуктора друг относительно друга, компенсируя неточности монтажа, но ТЭД не имеет возможности перемещаться относительно осевого редуктора при колебаниях рамы тележки на рессорах.

Некоторые из вариантов данной конструкции, предложенные авторами, представлены на рис. 2 а-д. В данных вариантах привода осевой редуктор представляет собой отдельный агрегат, что значительно упрощает его изготовление и ремонт по сравнению с приводом рис. 1в. Поскольку при колебаниях надрессорного строения

осевой редуктор не перемещается относительно ТЭД, то упругая муфта, соединяющая валы ТЭД и осевого редуктора, компенсирует только небольшие смещения, вызванные неточностью монтажа, и может быть выполнена одинарной. При этом муфта располагается снаружи редуктора, что упрощает ее осмотр и ремонт без разборки редуктора.

Недостатком данной схемы привода, названной авторами агрегатной, является увеличение общего числа подшипников, что само по себе не оказывает однозначного влияния на трудоемкость ремонта, кроме увеличения числа объектов, подлежащих диагностике. Распределение нагрузок на большее число подшипниковых узлов позволяет обойтись без использования сложных в регулировке конических подшипников.

В варианте привода рис.2б для возможности увеличения подшипникового узла и сокращения числа подшипников ТЭД расположен на неподвижной трубе, одним концом опирающуюся на подшипник на колесном центре, а другим, через сферическую опору, на корпус осевого редуктора.

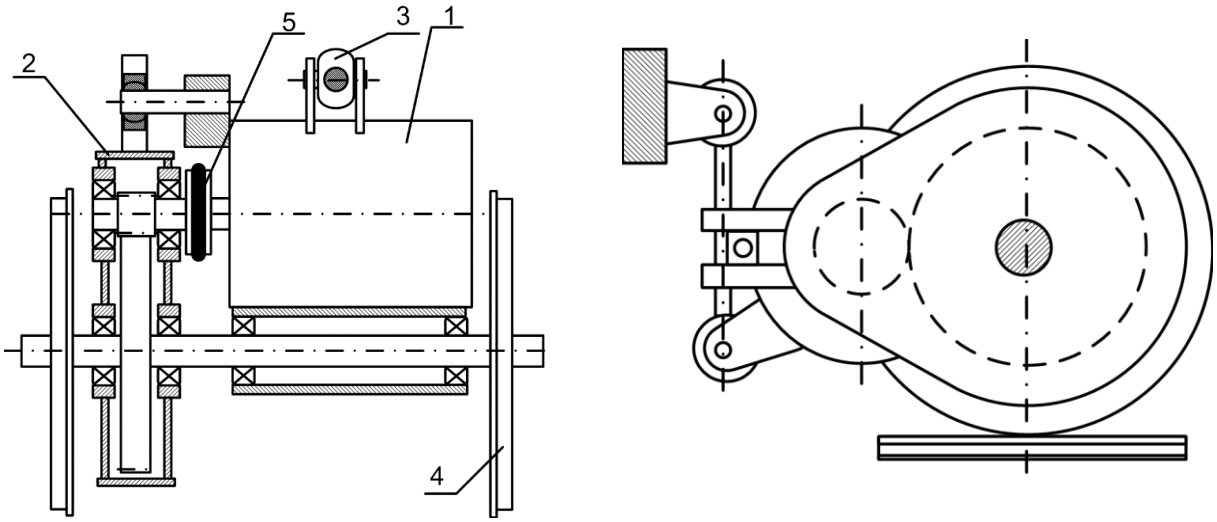
В варианте привода рис. 2в для равномерного распределения нагрузки на осевые подшипники редуктора ТЭД опирается на корпус осевого редуктора через шарнирные соединения. В приводе рис. 2г. подшипники размещены на месте ступицы большого зубчатого колеса, что позволяет увеличить их габариты, а на рис. 2д показан пассажирский вариант привода с упругим опиранием на колесную пару.

На предложенные конструкции тяговых приводов авторами получены патенты на полезные модели [9-12].

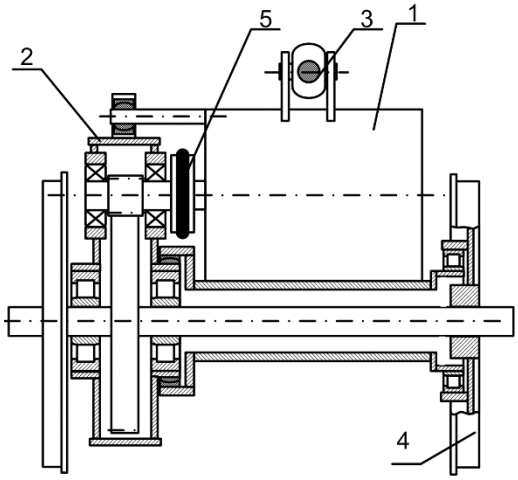
Создание агрегатного привода в основном сводится к созданию упругой муфты, рассчитанной на работу при частоте вращения порядка 4000 мин$^{-1}$, поскольку остальные узлы привода к настоящему времени достаточно исследованы. Возможность размещения упруго-компенсирующей муфты в габаритах тягового привода ранее была доказана авторами в [13]. В качестве возможных примеров рассмотрим предложенные авторами конструкции резинометаллической и резинокордной муфт (рис. 3 а, б).

Основной задачей создания упруго-компенсирующей муфты является снижение поперечной жесткости муфты при сохранении несущей способности. Для этого в резинометаллической муфте (рис.3а) втулки выполнены двойными, работающими последовательно. В резинокордной муфте (рис. 3б) внутри кольцевых выступов размещена промежуточная металлическая арматура, что, при сохранении жесткости на сжатие и усилия прижатия резины к фланцам для обеспечения требуемой силы трения между резиной и фланцами, дает возможность увеличить суммарную толщину резинового слоя и возможность увеличить поперечное смещение валов. На предложенную конструкцию резинометаллической муфты получен патент на полезную модель [14], на конструкцию резинокордной – оформлена заявка на получение патента.

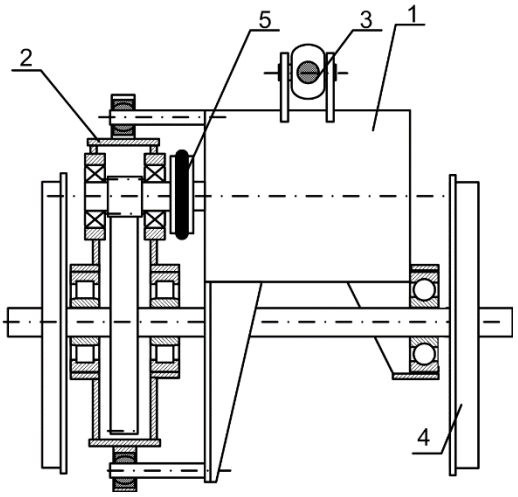
Из изложенного следует, что методы технической инновационики целесообразно использовать для поиска мер снижения расходов на ремонт локомотивов.



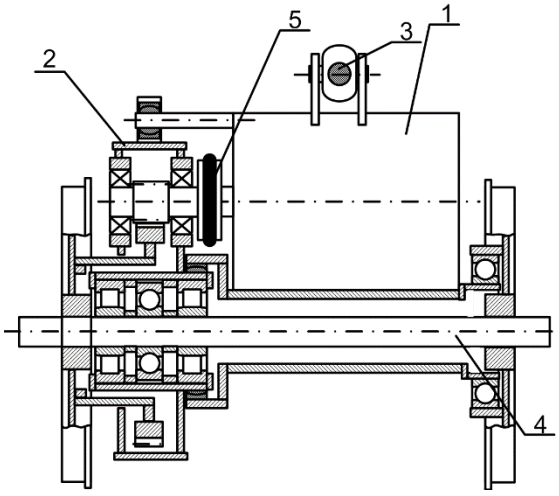
а)



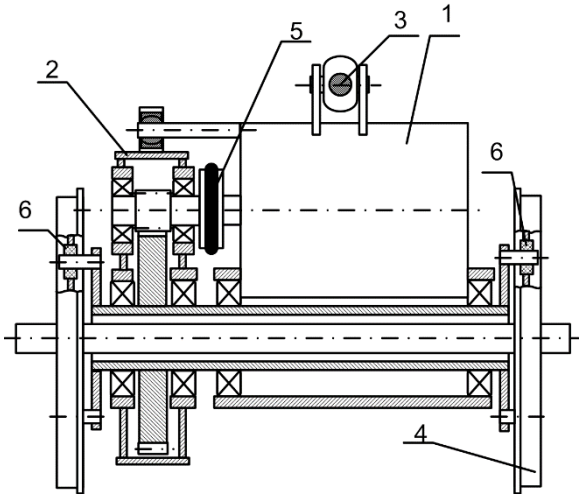
б)



в)

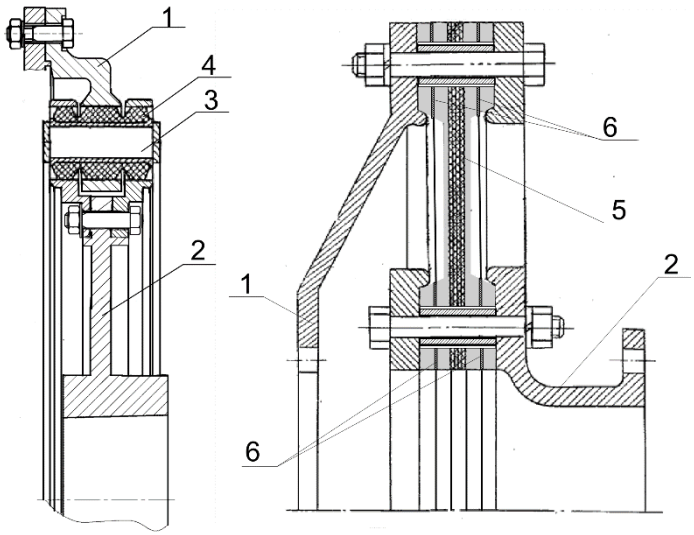


г)



д)

Рисунок 2 - Схемы вариантов агрегатного тягового привода с опиранием ТЭД на осевой редуктор: а – с раздельными опорами ТЭД и редуктора; б - с опорой ТЭД через неподвижную трубу; в – с опорой ТЭД через два шарнира; г – с креплением большого зубчатого венца на колесе; д – с упругим опиранием: 1 – ТЭД; 2 – осевой редуктор; 3 – подвеска; 4 – колесная пара; 5 – упругая муфта; 6 – упругие элементы.



а) б)

Рисунок 3 - Схемы вариантов муфт для агрегатного привода:
а - резинометаллической; б) резинокордной.
в – с креплением большого зубчатого венца на колесе; г – с упругим опиранием:
1, 2 – фланцы; 3 – втулка; 4 – резиновый элемент; 5 – резинокордная муфта; 6 – плоская арматура.

Выводы

1. Установлено, что анализ тенденций в мировом локомотивостроении не позволяет определить технические решения узлов локомотива, рациональные с точки зрения снижений затрат на ремонт, вследствие монополизации производства локомотивов. Выявлена необходимость поиска методики анализа конструкции локомотивов, позволяющей находить рациональные решения.

2. Использование для анализа узла тягового привода зарубежных локомотивов методов технической инновационики позволила выявить их недостатки, приводящие к ухудшению технологичности ремонта.

3. Авторами предложен ряд новых конструкций тягового привода локомотивов и его узлов, обеспечивающих более высокую ремонтопригодность по сравнению с известными зарубежными аналогами

4. На предложенные авторами технические решения получены 5 патентов на полезные модели и подана заявка на получение патента.

5. Предлагается использовать методы технической инновационики для поиска мер снижения расходов на ремонт локомотивов.

Список использованных источников

1. Грузовой тепловоз ER20 CF для Литвы // Железные дороги мира, 2009, №5. – с. 17-24.

2. Техническая инновационика. Проектирование конкурентоспособных машин: монография / [О.В. Измеров и др.]; под ред. чл.-кор. Академии электротехн. наук Рос. Федерации, д-ра техн. наук, проф. А.С. Космодамианского. - Орел: Госуниверситет - УНПК, 2013. - 415 с.

3. Техническая инновационика. Проблемы инженерного анализа технических систем: монография. / [О.В. Измеров и др.]. – Орел: Госуниверситет – УНПК, 2013, - 261 с.

4. Техническая инновационика. Рациональный выбор технических решений при проектировании: монография / [О.В. Измеров и др.]; под ред. О.В. Измерова. – Орел: Госуниверситет - УНПК, 2013. – 340 с.

5. Бирюков И.В.Тяговые передачи электроподвижного состава железных дорог / И.В. Бирюков, А.И. Беляев А.И, Е.К. Рыбников - М., Транспорт, 1986 – 256 с.

6. Развитие локомотивной тяги. / Н.А. Фуфрянский, А.С. Нестрахов, А.Н. Долганов, Н.Н. Каменев, Э.А. Пахомов; Под ред. Н.А. Фуфрянского и А.И. Бевзенко. – М.: Трангспорт, 1982 – 303 с.

7. Конструкция и динамика тепловозов. / В.Н. Иванов, В.В. Иванов, Н.И. Панов, А.П. Третьяков. М., «Транспорт», 1974 – 336 с.

8. Михайлов Г.И. Повышение надежности и несущей способности зубчатых тяговых передач / Г.И. Михайлов. – Казань: Алгоритм+, 2023. – 560 с.

9. Патент на полезную модель № 164797, Российская Федерация, МПК B61C 9/48. Тяговый привод локомотива [Текст] / Воробьев В.И., Измеров О.В., Новиков В.Г., Вдовин А.В., Бондаренко Д.А., Новиков А.С., Воробьев Д.В. Опубл. 20.09.2016, бюл. № 26.

10. Патент на полезную модель № 189364, Российская Федерация, СПК B61C 15/08 (2013.01). Тяговый привод локомотива. / Воробьев В.И., Антипин Д.Я., Космодамианский А.С., Измеров О.В., Маслов М.А., Копылов С.О. Опубл. 21.05.2019, бюл. №15.

11. Патент РФ на полезную модель № 206748. СПК B61C 9/38 (2021.08); B61C 9/48 (2021.08) Тяговый привод локомотива. / Воробьев В.И., Антипин Д.Я., Измеров О.В., Маслов М.А., Шевченко Д.Н. Опубл. 24.09.2021, бюл. № 27.

12. Патент РФ на полезную модель № 215944. СПК B61C 9/50. Тяговый привод локомотива / А.С. Космодамианский, О.В. Измеров, С.О. Копылов, В.И. Воробьев, В.О. Корчагин, А.А. Пугачев, М.Ю. Капустин, А.В. Самотканов, Д.Н. Шевченко, Е.В. Николаев, А.Е. Карпов. Опубл. 11.01.2023, бюл. №2.

13. Применение агрегатных тяговых приводов для локомотивов с повышенными тяговыми свойствами / Космодамианский А.С., Пугачев А.А., Воробьев В.И., Измеров О.В., Николаев Е.В. // «Транспорт Урала», № 2(77), Екатеринбург, УрГУПС, 2023, С.41-48.

14. Патент на полезную модель № 172577, Российская Федерация, МПК B61C 9/44, F16D 3/50. Компенсационная муфта тягового привода локомотива. / Воробьев В.И., Антипин Д.Я., Измеров О.В., Новиков А.С., Шорохов С.Г., Тысева Н.Ю. Опубл. 13.07.2017. Бюл. № 20.

РУТ (МИИТ), г. Москва, БГТУ, г. Брянск

Космодамианский Андрей Сергеевич: д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Тяговый подвижной состав».

Воробьев Владимир Иванович: к.т.н., доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог» БГТУ.

Измеров Олег Васильевич: соискатель кафедры «Подвижной состав железных дорог», БГТУ, г. Брянск.

Карпов Артём Евгеньевич: ассистент кафедры «Тяговый подвижной состав», заведующий лабораторией «Системы управления транспортными средствами».

УДК 629.423.25 ГРНТИ 73.29.41

И. И. Лакин

КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ ОБСЛУЖИВАНИЕМ И РЕМОНТОМ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Аннотация. *Цель исследования – разработка системы управления техническим состоянием отечественных высокоскоростных электропоездов с использованием данных бортовой диагностики. Разработана технологическая модель управления техническим состоянием подвижного состава с использованием данных бортовой диагностики и с инкапсуляцией математических методов. Предложен метод расчётов и анализа с использованием теории нечётких множеств. Разработаны методы прогнозирования ТОиР и управления ресурсами ТОиР, оценки информативности бортовых систем диагностики, определения запасов ресурсов на складе для проведения ТОиР. Методической основой является теория тяги поездов и теория надёжности, вероятностно-статистические методы, методические подходы теории нечётких множеств, методы теории информации и метод Монте-Карло (имитационное математическое моделирование на Visual Basic for Applications), методы искусственных нейросетей, включая методы RBF-сетей. Анализ функциональных возможностей нейросетей выполнен в среде Python с использованием библиотек Keras, Theano и др.*

Ключевые слова. *Тяговый подвижной состав. ТОиР. Модель автоматизированного управления.*

Одно из главных свойств подвижного состава – это надёжность, которая в ГОСТ 27.102-2021 [1] определена как «свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции в заданных режимах, условиях применения, стратегиях технического обслуживания, хранения и транспортирования». Таким образом, наличие системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР) является обязательным условием обеспечения надёжности. Локомотивный и моторвагонный комплексы как отечественные, так и зарубежные имеют развитую систему депо и пунктов технического обслуживания, оснащённых диагностическим, наладочным и технологическим оборудованием [2].

Современная система ТОиР, как и любая другая современная производственная система должна иметь автоматизированную систему управления (АСУ) на базе передовых IT-технологий. При этом следует отметить, что особенностью современного этапа развития информационных систем является отсутствие единого информационного пространства – исторически имеет место принцип «лоскутного одеяла». Поэтому популярным является принцип построения АСУ как киберфизических производственных систем (CPPS), когда различные аппаратно-программные комплексы обмениваются

информацией по установленному в системах протоколу [3]. Таким образом, модель АСУ ТОиР должна предусматривать взаимодействие нескольких IT-систем.

Следует бы отметить, что CPPS нужна не только потому, что различные компании сами параллельно разрабатывают свои АСУ, которые потом приходиться стыковать. Тут есть и системная проблема: разработка АСУ предприятия занимает, как правило, не менее 5 лет, при том, что эмпирическому закону Мура, смена поколений вычислительной техники происходит каждые 18 месяцев. Таким образом, любая АСУ изначально является морально устаревшей. Замена АСУ одного поколения на следующее на действующем производстве – всегда трудный процесс. Тем более трудный для больших комплексных систем. Тут и возникает потребность в интероперабельных системах [4], способных по открытому интерфейсу совместно взаимодействовать и функционировать. И в этом смысле построение АСУ ТОиР как CPPS – идеальный подход.

Также следует отметить, что отличие АСУ от простой IT-системы – это обязательное наличие отрицательных обратных связей [5] для создания контуров автоматического и автоматизированного управления. Применительно к АСУ предприятий Эдвард Деминг сформулировал это как принцип постоянного улучшения – цикл PDCA (Plan, Do, Check, Act) [6]. Предлагаемая структура модели АСУ ТОиР приведена на рисунке 1.

Первая группа IT – это системы эксплуатации подвижного состава (блок 1), которые можно разделить на стационарные и бортовые. От стационарных систем (управление движением поездов, диспетчерская централизация, АСУ надёжности, СЦБ, и др. необходимо получать) необходимо получать данные о статусе ТПС, пробегах, наличие отказов, а передавать плановые сроки ТОиР. От бортовых систем также можно получать данные о пробеге ТПС и, главное, диагностические данные о параметрах оборудования с прогнозированием его работоспособности, остаточном ресурсе, отказах и предотказных состояниях.

На основании данных об эксплуатации ТПС (блок 1) осуществляется планирование ТОиР с подготовкой ресурсов (блок 3): ремонтных позиций, инструмента и технологического оборудования, трудовых ресурсов требуемой квалификации, запасных частей (товарно-материальных ценностей и материалов повторного использования).

После захода подвижного состава в депо осуществляется ТОиР (блок 4). АСУ работает как MES (планирование) и ERP (ресурсное обеспечение) система. При этом в АСУ дополнительно поступает информация от стационарных и переносных систем диагностирования и испытания, от бортовой диагностики и других автономных систем. Работа АСУ ТОиР достаточно хорошо проработана в АО «Трансмашхолдинг» [7]. Далее ТПС возвращается в эксплуатацию (переход от блока 4 в блок 5).

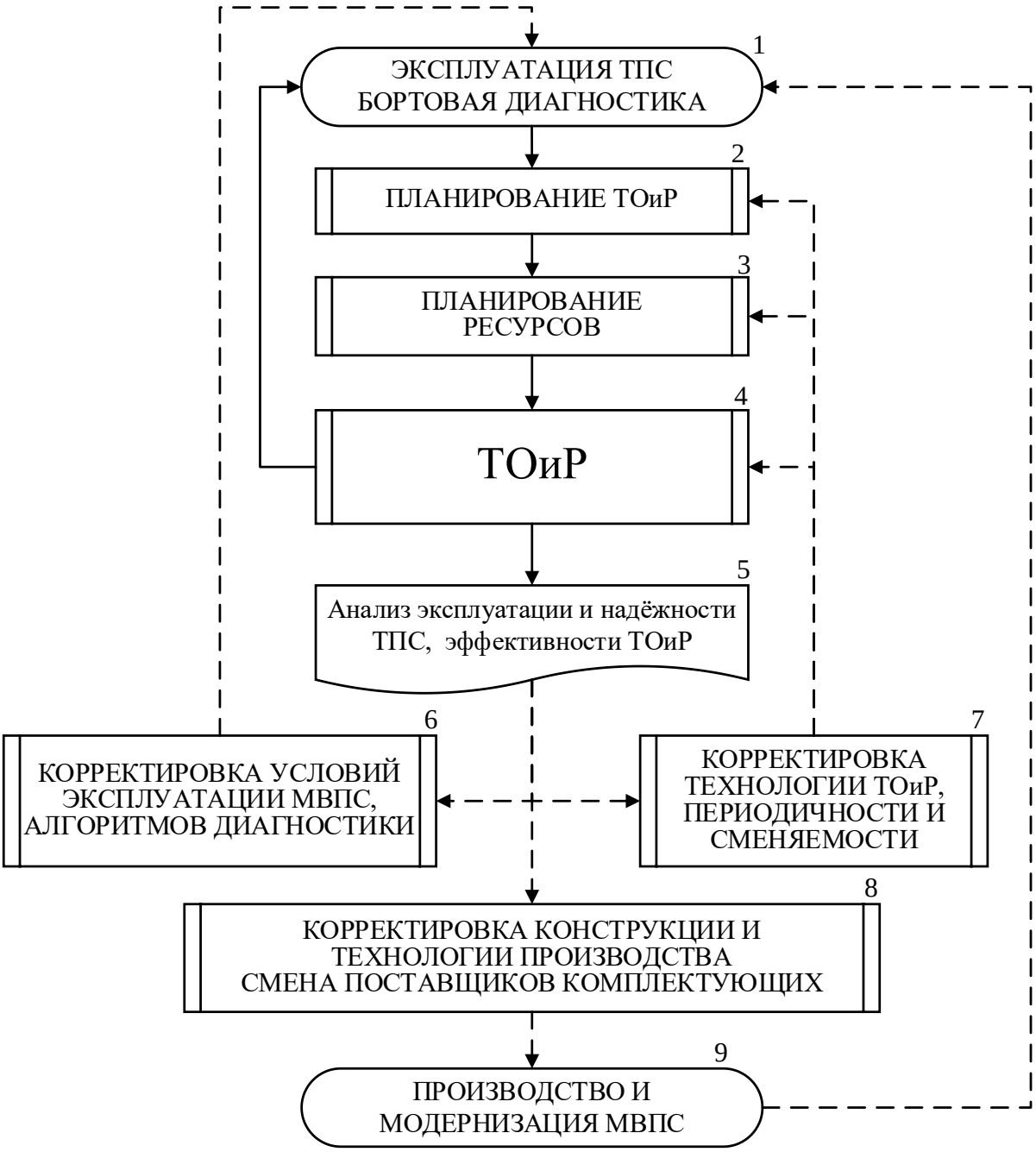


Рисунок 1 *– Алгоритм управления ТОиР по циклу PDCA*

Согласно принципу постоянного улучшения (цикл PDCA) должны быть обратные связи совершенствования самих алгоритмов управления (на рисунке 1 показаны пунктиром). В результате работы АСУ ТОиР накапливается комплексная поступающая из разных источников по принципу CPPS информация для факторного анализа (блок 5), служащая объективным основанием для реализации принципа постоянного улучшения корректировки конструкции составов и технологии их изготовления (блок 8), изменению технологии ТОиР (блок 7) и условий эксплуатации (блок 6). Таким образом, постоянно совершенствуется не только сам подвижной состав (блок 8), но вся система его жизненного цикла.

Важное свойство модели АСУ – инкапсуляция математических методов: в программное обеспечение следует включать алгоритмы математического управления

любой сложности, но удобные и простые в применении. Например, при проверке на унимодальность статистических данных можно просто подсвечивать данные в зависимости от вероятности их унимодальности согласно шкале Чеддока. Пользователю не надо знать алгоритм расчёта по критериям согласи или каким другим. По такому же пути идёт создание нейронных сетей для распознавания образов. Основными инкапсулируемыми методами являются: вероятностно-статистические, логические, включая нечётки множества и функции принадлежности, тяговые расчёты, диагностика технического состояния, места отказа и прогнозирования остаточного ресурса, RBF-сети, нейросети, теория массового обслуживания, сети Петри, дифференциально-интегральное исчисление, Монте-Карло, информатики и др. Математические методы должны быть основой системы поддержки принятия решений. Далее рассмотрены некоторые на взгляд автора важные математические методы, подлежащие инкапсуляции.

Первые инкапсулируемые методы – логические: классическая формальная логика лежит в основе алгоритмов АСУ. Но чёткие границы понятий мешают принятию правильных решений. Например, поезд массой 6300 т считается тяжеловесным, а 6299 т – нет. Работа тяговых электродвигателей с часовым током 61 минуту считается опасной, а 59 минут – нет. Логический аппарат следует дополнить использованием методов теории нечётких множеств [8]. Предлагается предусмотреть нечёткую границу между классами состояний, на которой принадлежность к классу определяется функцией принадлежности $\mu \in \{0, 1\}$ (по сути, вероятностной) в зависимости от значения параметра x. Форма переходной функции определяется анализом физических процессов. По умолчанию предлагается использовать сигмоидную зависимость:

$$\mu(x) = 1 / (1 + \mathrm{Exp}(-x)) \text{ или } \mu(x) = 1 - 1 / (1 + \mathrm{Exp}(-x)). \quad (1)$$

Разработан метод и программное обеспечение определения риска наступления отказа [9]. Например, если нарушена весовая норма поезда (опасное событие A) и скоростной режим на руководящем подъёме (опасное событие B), то есть риск R отказа тяговых электродвигателей (ТЭД). В чёткой логике это:

$$\textit{If A or B then R = 1,} \quad (2)$$

в нечёткой логике это выражение будет выглядеть следующим образом:

$$R = \mu_A(m) + (1 - \mu_A(m)) * \mu_B(v) \leq 1, \quad (3)$$

где: $m \in M$ – возможные массы поезда, $v \in V$ – возможные скорости поезда, $\mu_A \in \{0, 1\}$ и $\mu_B \in \{0, 1\}$ – функции принадлежности текущих значений $\mu_A(m)$ и $\mu_B(v)$ опасным событиям A и B. При диагностике тягового подвижного состава для определения принадлежности сигналов к исправному состоянию, определяется риск R отказа как произведение рисков отказов R_n оборудования $n \in N$:

$$R = \prod_{n=1}^{N} Rn = \prod_{n=1}^{N} (1 - \mu_n(x_n)), \quad (4)$$

где $\mu_n(x_n)$ – функция принадлежности оборудования *n* к исправным при текущем значении параметра x_n.

Разработанная программное обеспечение позволяет задавать 12 различных форм функции принадлежности, в основе которых лежат четыре возможных графика (рисунок 2) перехода от состояния μA(x1) = 0 к состоянию μA(x2) = 1.

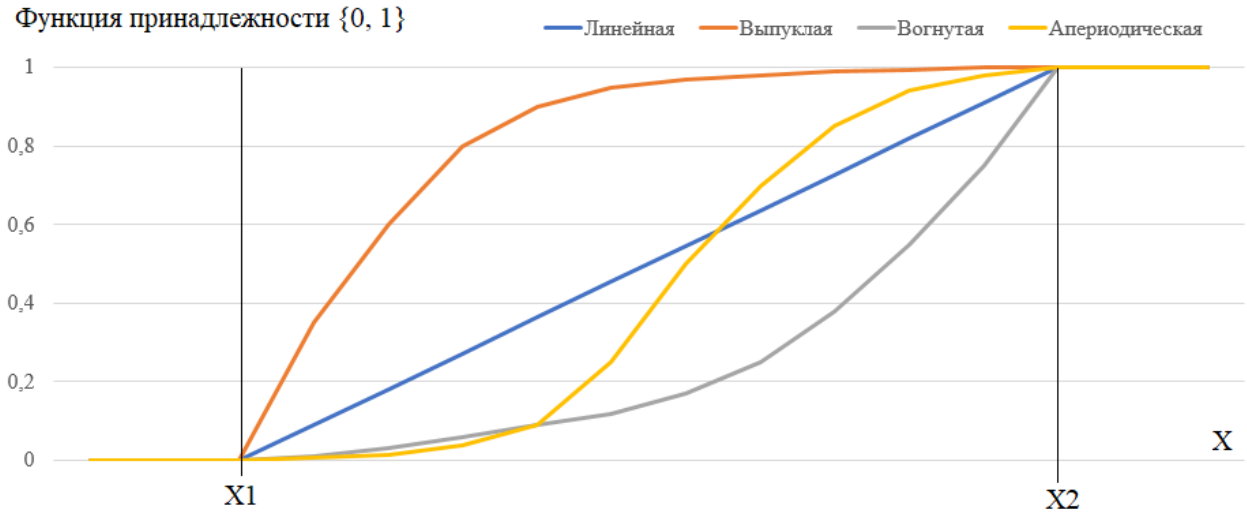


Рисунок 2 *– Примеры формы кривой функции принадлежности* $\mu_A(x)$

Выбор переходной функции зависит от моделируемых процессов. Например, для риска перегрева двигателя при работе с пятиминутным или часовым током, а также при нарушении скоростного режима на руководящем подъёме характерна выпуклая кривая. Для определения принадлежности состава к тяжеловесным – сигмоида. Для нарушения скоростного режима – обратная сигмоила.

Вторая группа инкапсулируемых методов – вероятностно статистические. Анализ национальных (ГОСТ) и международных (ISO) свидетельствует о наличие готового набора математических вероятностно-статистических методов: расчёт математического ожидания, среднеквадратичного отклонения, коэффициента вариации, вероятности принадлежности к участку распределения – всё это считается по заданным в стандартах формулам [10, 11] (рисунок 3). Математическое ожидание M(x), среднеквадратичное отклонение SKO, коэффициент вариации KV, минимальное mn и максимальное mx значения выборки M(x) (блок 2). При числе исходных данных в массиве M(0) < Minimum дальнейший расчёт не производится (блоки 3, 4). Изначально предлагается Minimum = 50. Для расчёта гистограмм необходимо определить число диапазонов (столбцов) N, для чего известно несколько формул, каждая из которых обладает недостатками, поэтому использован опыт автора: для получения удовлетворительного результата число столбцов N меняется от 8 до 17 (блок 5). Для каждого диапазона n ϵ N рассчитывается фактическое число попаданий элементов x массива M(x) и записывается в массив G(n) с рассчитанными границами диапазонов согласно массивам: слева G1(n) и справа G2(n) (блок 6).

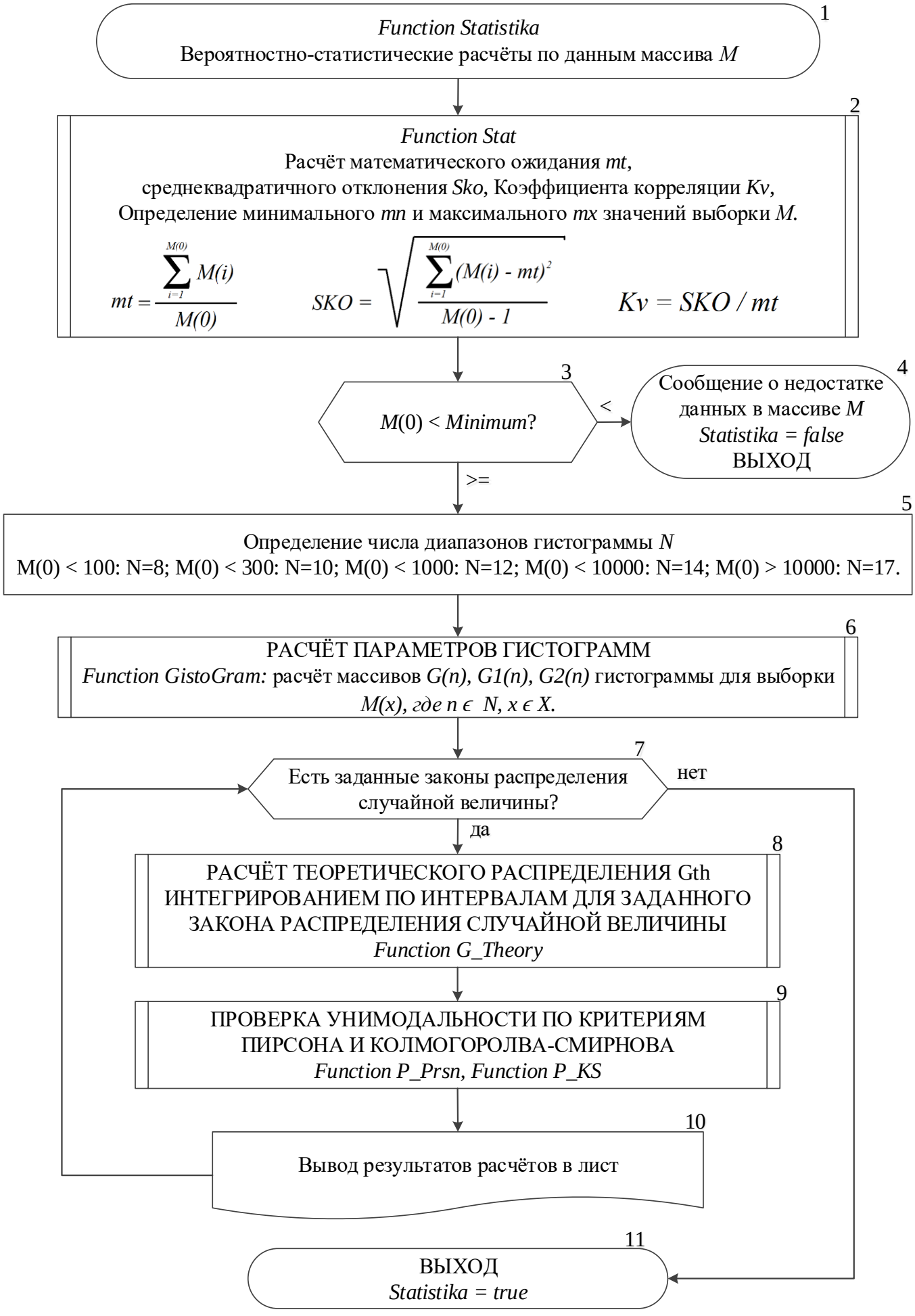


Рисунок 3 *– Блок-схема функции расчёта статистических показателей*

Для законов распределения случайной величины (блок 7) рассчитывается теоретическое распределение (блок 8). Результат записывается в массив Gth(n), по которому в сравнении с массивом фактического распределения G(n) оценивается унимодальность (блок 9) как вероятность соответствия одному из законов распределения случайной величины: нормальному, экспоненциальному, логнормальному и равномерному по критериям согласия Пирсона и Колмогорова-Смирнова.

Важным результатом вероятностно-статистических расчётов является проверка исходных данных на унимодальность для исключения эффекта, известного в Интернет как «средняя температура по больнице»: достаточно часто данные являются не достоверными в силу их мультимодальности. Проверку на унимодальность предложено выполнять через расчёт вероятности соответствия фактического распределения одному из теоретических [11]. Такой подход соответствует закону больших чисел: любое распределение стремиться к стандартному. Если унимодальность отсутствует, то выборку следует разделить за счёт фильтрации по место события, серии, виду оборудования, виду тяги, времени года и др. Например, в ряде работ доказано, что анализ работы локомотивов по данным МСУ надо вести по каждой серии и по каждому полигону в отдельности.

Для прогнозирования постановки ТПС на ТОиР предлагается инкапсулировать в АСУ математическую стохастическую модель эксплуатации ТОиР поездов, в основу которой положить теорию массового обслуживания, сети Петри и метод Монте-Карло. Автором разработано соответствующее тестовое программное обеспечение [12, 13], с использованием которого выполнено имитационное математическое моделирование параметров планирования постановки на ТОиР.

Следующими инкапсулируемыми математическими методами должны стать нейронные сети с элементами искусственного интеллекта. Первым очевидным местом их применения является диагностирование технического состояния оборудования ТПС с прогнозированием остаточного ресурса для планирования объёма ТОиР, времени проведения профилактических работ.

Автором рассмотрены однослойные RBF-сети, достоинством которых является простота их инкапсуляции в программное обеспечение АСУ [14]. RBF-сети предполагают расчёт многомерных нормализованных векторов классов и определение принадлежности конкретного события к области того или иного вектора. Для тестирования метода разработано программное обеспечение.

В таблице 1 приведены результаты расчёта класса принадлежности технического состояния к классу «Норма» или отказу одного из ТЭД. Признак отказа – отклонение тока отказавшего ТЭД. Из таблицы видна высокая эффективность применения метода.

Таблица 1 – Расчёт принадлежности к классу параллельно работающих ТЭД

№ п/п	Токи диагностируемых ТЭД, А				Принадлежность к классам, %				
	ТЭД 1	ТЭД 2	ТЭД 3	ТЭД 4	Норма	ТЭД 1	ТЭД 2	ТЭД 3	ТЭД 4
1	500	500	500	500	77,90%	5,05%	3,78%	3,80%	9,47%
2	850	840	860	855	77,90%	5,15%	4,55%	3,34%	9,02%
3	300	300	300	300	77,90%	5,05%	3,78%	3,80%	9,47%
4	530	540	550	560	77,90%	7,25%	7,00%	4,26%	3,40%
5	1200	1190	1170	1195	77,90%	4,47%	3,75%	4,47%	8,96%
6	500	1000	1000	1000	5,26%	95,00%	0,03%	0,05%	0,15%
7	500	800	790	820	19,64%	79,00%	0,23%	0,35%	0,62%
8	100	700	710	720	0,06%	99,94%	0,00%	0,00%	0,00%
9	833	400	850	840	3,25%	0,04%	96,66%	0,02%	0,02%
10	1000	1100	700	1050	34,38%	1,38%	1,58%	62,41%	1,58%
11	777	800	750	500	22,51%	0,44%	0,19%	0,51%	76,34%

Расчёт с использованием RBF-сетей хоть и дал правильный результат, но вероятность отнесения к правильному классу оказалась невысокой. Таким образом, для задач такой сложности следует использовать многослойные нейросети. Аналогично рассмотрена задача прогнозирования потребности в запасных частях, где метод также оказался эффективным.

Рассмотрен более сложный пример, когда отказ проявлялся через изменение тяговых характеристик ТЭД при несрабатывании одной позиции ослабления поля (ОП1, ОП2, ОП3). Для анализа взяты характеристики тяговых электродвигателей типа НБ-418К6 электровозов серии ВЛ85. Вручную сформирована обучающая выборка для исправного и неисправных состояний. RBF-сети оказались низко эффективны. Формирование многослойной нейронной сети с использованием облачных технологий (5 слоёв) позволило достичь высокой достоверности (таблица 2). Если в обучающей выборке оставить только те режимы, где отказ может проявиться, то достоверность данных становится отличной (таблица 3).

Таблица 2 – Вероятность диагностирования отказа ОП через многослойные нейросети

№ теста	Заданный класс	Вероятность принадлежности к классу				
		Норма	ТЭД	ОП1	ОП2	ОП3
1	Норма	0,3685	0,0001	0,1994	0,1802	0,2517
2	Отказ ТЭД	0,0000	0,9999	0,0000	0,0000	0,0000
3	Отказ ОП1	0,0496	0,0028	0,7133	0,1815	0,0527
4	Отказ ОП2	0,0174	0,001	0,0695	0,8152	0,1052
5	Отказ ОП3	0,03	0,0001	0,0336	0,1733	0,7615

Таблица 3 – Вероятность диагностирования отказа ОП при определении зоны поиска

№ теста	Заданный класс	Вероятность принадлежности к классу				
		Норма	ТЭД	ОП1	ОП2	ОП3
1	Норма	0,9979	0,0000	0,0001	0,0020	0,0000
2	Отказ ТЭД полный	0,0000	0,9999	0,0000	0,0000	0,0000
3	Отказ ОП1	0,1500	0,0001	0,8495	0,0001	0,0000
4	Отказ ОП2	0,1105	0,0001	0,0123	0,8824	0,0001
5	Отказ ОП3	0,1675	0,0001	0,0000	0,0032	0,8293

Диагностирование с использованием многослойных нейросетей выполнено на алгоритмическом языке Python с использованием библиотек нейросетей Keras, Theano в которых находятся многочисленные достаточно сложные методы искусственного интеллекта, разработка и совершенствование которых происходит постоянно. Это большое достоинство и главный недостаток метода, т.к. требуется использование внешнего математического аппарата, встраивание которого в АСУ затруднительно. Нейросети могут быть успешно использованы в АСУ ТОиР для диагностирования и поддержки принятия решений.

ВЫВОДЫ

В результате выполненных исследований разработана модель управления техническим обслуживанием и ремонтом (ТОиР) и надёжностью тягового подвижного состава (МВПС), которая строиться как киберфизическая производственная система (CPPS) на базе стандартного пакета программ систем ресурсного обеспечения (ERP) и планирования (MES) во взаимодействии с бортовыми и деповскими системами технического диагностирования, системами эксплуатации МВПС, реализацией принципа «интернета вещей», а также реализацией системы поддержки принятия решений на базе инкапсулированных математических методов. В ходе работ получены следующие результаты.

Таким образом, предлагаемая АСУ ТОиР использует следующие принципы построения: обязательность автоматизированных обратных связей, защита от неустойчивой работы (колебаний и автоколебаний), решение новых задач, первичность электронной информации по отношению к бумажным документам, логический контроль вводимой информации с максимально возможным использованием классификаторов, киберфизическое построение АСУ, персональная работа в АСУ всех участников процесса, дружественный интерфейс, интернет вещей, автоматическое формирование отчётных форм, исключение повторного ввода информации, инкапсуляция математических методов, доступность, ограниченность и целостность информации, ролевое построение АСУ, расчёт ключевых показателей качества.

ЛИТЕРАТУРА

1 ГОСТ 27.102-2021. Надёжность объекта. Термины и определения. -М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2021 г. 27 с.

2 Киселев В.И. Эксплуатация и техническое обслуживание подвижного состава. В. И. Киселёв, В. А. Гапанович, И. К. Лакин, др. – М.: «ИРИС-Групп», 2012, 576 с.

3 Киберфизические производственные системы (Cyber-Physical Production System — CPPS) / Industry 4.0 /Киберфизические производственные системы (CPPS) (janberg.by).

4 Интероперабельность. Сайт Новосибирского государственного университета. http://db4.sbras.ru/elbib/data/.

5 Винер, Н. Человек управляющий / Норберт Винер. – Санкт-Петербург: Питер, 2001. – 288 с. – Текст : непосредственный.

6 Деминг, Э. Выход из кризиса: Новая парадигма управления людьми, системами и процессами / Э. Деминг. – Пер. с англ. – Москва : Альпина Бизнес Букс, 2007. – 370 с. – Текст : непосредственный.

7 Лакин, И. К. Автоматизированное управление жизненным циклом локомотивов на этапе их эксплуатации / И. К. Лакин, А. А. Аболмасов, И. И. Лакин, И. В. Пустовой, А. И. Баранов, А. А. Храпин, А. В. Гребенюк // Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов: материалы третьей международной научно-практической конференции «Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов». –Москва : ООО «ЛокоТех», 2018 г. – 448 с. С.214 – 233. – Текст : непосредственный.

8 Заде, Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближённых решений / Л. А. Заде. – М.: Мир, 1976. –166 с. – Текст : непосредственный.

9 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023617487 РФ. Расчёт риска отказов с использованием теории нечётких множеств : № 2023615793 : заявлено 28.03.2023 : опубл. 11.04.2023, Бюл. № 4 / Лакин И. И.

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

11 Лакин, И. И. Математические методы проверки достоверности данных о надёжности локомотивов, их эксплуатации и техническом обслуживании / И. И. Лакин, В. А. Мельников // Известия Транссиба. – 2022. – № 2. – С. 66-73. – Текст : непосредственный.

12 Лакин, И. И. Применение теории массового обслуживания и сетей Петри при анализе параметров системы обслуживания тягового подвижного состава методом математического моделирования / И. И. Лакин, В. В. Семченко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2023. – № 4. – С. 65-77. – Текст : непосредственный.

13 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023663017 РФ. Модель технического обслуживания и ремонта скоростных электропоездов с использованием данных бортовых систем диагностики : № 2023660448 : заявлено 23.05.2023 : опубл. 19.06.2023, Бюл. № 6 / Лакин И. И.

14 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024666171 РФ. Диагностирование технического состояния оборудования по обучающей выборке с использованием методологии RBF-сетей : № 2024664838 : заявлено 28.06.2024 : опубл. 10.07.2024, Бюл.№7/ Лакин И. И.

Инжиниринговый центр железнодорожного транспорта (ИЦ ЖТ), г. Москва

Лакин Игорь Игоревич: к.т.н., ведущий специалист.

УДК 629.423.25 ГРНТИ 73.29.41

И. И. Лакин

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОиР РЕСУРСАМИ КАК ЗАДАЧА ТЕОРИИ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Аннотация. *При внедрении автоматизированных систем управления (АСУ) техническим обслуживанием и ремонтом (ТОиР) тягового подвижного состава возникают проблемы с материально-техническим обеспечением (МТО). В отличие от заводов-изготовителей в локомотивных депо значительная часть потребности в запасных частях и материалах носит вариативный характер, что существенно усложняет снабжение, создаёт риск отсутствия нужных деталей или их избыток. В статье предлагается решение проблемы с использованием метода Монте Карло (математическое моделирование случайных процессов) и методов теории массового обслуживания. В результате предложен метод управления МТО ТОиР. Метод отлажен с использованием имитационного моделирования на алгоритмическом языке Visual Basic for Applications в среде MS Excel.*

Ключевые слова. *Тяговый подвижной состав, техническое обслуживание и ремонт, материально-техническое обеспечение, управление ресурсами.*

Annotation. *When implementing automated control systems (ACS) for traction rolling stock maintenance and repair (MRO), problems arise with logistical support (MTO). Unlike manufacturing plants in locomotive depots, a significant part of the spare parts and materials need is variable, which significantly complicates the supply, creates the risk of missing the necessary parts or their excess. The article proposes a solution to the problem using the Monte Carlo method (mathematical random processes modeling) and methods of queuing theory. As a result, a method for managing the MTO MRO is proposed. The method was debugged using simulation modeling in the algorithmic language Visual Basic for Applications in the MS Excel environment.*

Keywords. *Traction rolling stock, maintenance and repair, logistics, resource management.*

Основными ресурсами для ТОиР являются (рисунок 1): запасные детали и материалы для ремонта и обслуживания («склад»), трудовые ресурсы (мастера, электромеханики, слесари нужной квалификации), ремонтное оборудование и инструменты, ремонтные позиции («канавы»). Управление ресурсами является одной из основных задач управления производством и известно как ERP-система (Enterprise Resource Planning) [1]. В практической работе предприятий обычно используется пакет программ 1С:ERP [1] или SAP R/3 [2].

Применяемые пакеты программ ERP-управления решают задачи собственно управления ресурсами и в меньшей степени содержат инкапсулированные математические методы для оптимизации процесса, хотя это очень важно.

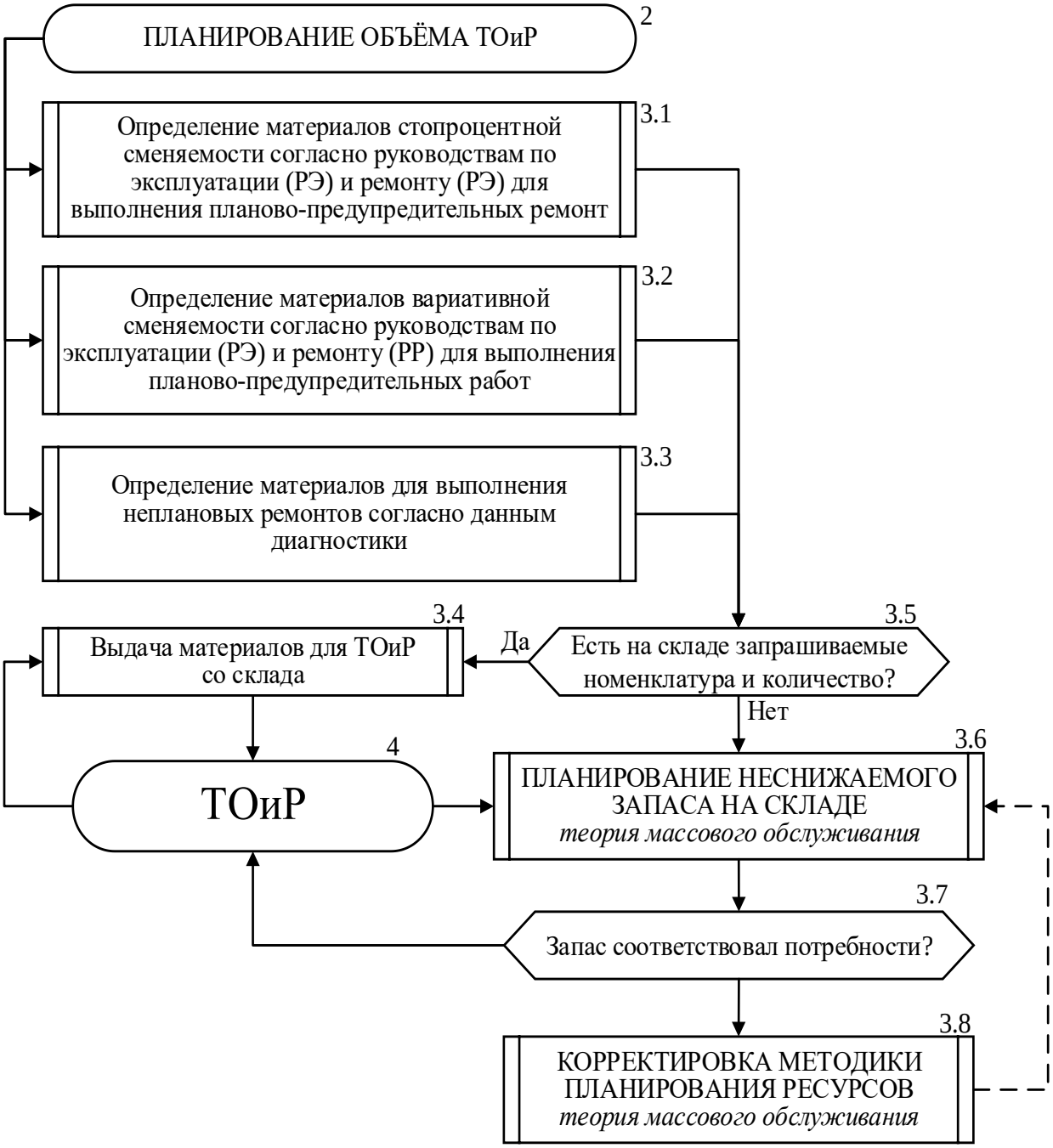


Рисунок 1 *– Планирование ресурсов для выполнения ТОиР*

Недостаток ресурсов может привести к остановке технологического процесса, чего нельзя допускать. С другой стороны, большие запасы ресурсов приводят «замораживанию» оборотных средств предприятия, увеличению потребности в них. Лишние трудовые ресурсы приводят к перерасходу заработной платы. Излишний станочный парк приводит к перерасходу капитальных средств, лишним амортизационным отчислениям. Решение этого диалектического конфликта (противоречия) – классическая задача теории массового обслуживания (теории очередей) [3]. Соотношение потока обслуживания (например, наличия касс) и потока покупателей и дало название целому разделу математики, решающему задачу на базе вероятностно-статистических методов: задача всегда решается с учётом вероятности наличия предложения и потребности в обслуживании.

На практике на железнодорожном транспорте задача управления складом решается через создание неснижаемых запасов как процент от потребности. Например, дирекцией по ремонту тягового подвижного состава (ЦТР) предлагалось иметь запас в 5 % от обслуживаемого. Много это или мало – неизвестно, т.к. средств на создание такого запаса выделено не было. А настоящее время задачу пытаются решать через создание нормативов на содержание парка. Но при этом опять не используются динамические статистические модели.

При планировании ресурсов по средней норме допускаются элементарные ошибки, когда любое превышение среднего значения признаётся перерасходом. В результате при нормальном распределении случайной величины в каждом втором случае будет перерасход запасных частей, а в остальных – перерасход. Незнание «правила трёх сигм» [4] приводит к элементарным ошибкам в управлении.

Решение задачи обеспечения ресурсами предлагается осуществить методом математического вероятностного моделирования.

Материально-техническое обеспечение (МТО) запасными частями требует определённого времени $T_{МТО}$. на изготовление $T_{ИЗГ}$ и доставку $T_{ДСТ}$:

$$T_{МТО} = T_{ИЗГ} + T_{ДСТ.} \quad (1)$$

Предлагается для анализа применить методы теории нечётких множеств – функцию принадлежности μ_T времени к готовности продукции. Время изготовления можно разбить на пять этапов: минимальное время, быстрее которого изделие не может быть изготовлено согласно технологии ΔT_1, время, когда есть вероятность готовности продукции ΔT_2, нормативное время готовности продукции ΔT_3 и время задержки выдачи продукции ΔT_4.

$$T_{ИЗГ} = \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 + \Delta T_4. \quad (2)$$

ΔT_1 = const, а $\mu_{T1} = 0$. Период $\Delta T_2 = T_2 - T_1$ имеет переходную функцию принадлежности μ_{T2}, варианты которых описаны в разделе 2. По умолчанию предлагается взять сигмоидную форму кривой (логистическая кривая), часто используемую в нейросетях:

$$\mu_{T2} = 1 / (1 + Exp(-t)). \quad (3)$$

Период ΔT_3 имеет стопроцентную принадлежность: $\mu_{T3} = 1$. Период ΔT_4 также имеет переходную сигмоидную, но обратную форму:

$$\mu_{T4} = 1 - 1 / (1 + Exp(-t)). \quad (4)$$

Сигмоида в дальнейших расчётах принята по умолчанию. Кривая может быть другая, форма которой можно уточнять по мере накопления статистики. На рисунке 2 приведён пример функции принадлежности к готовности продукции.

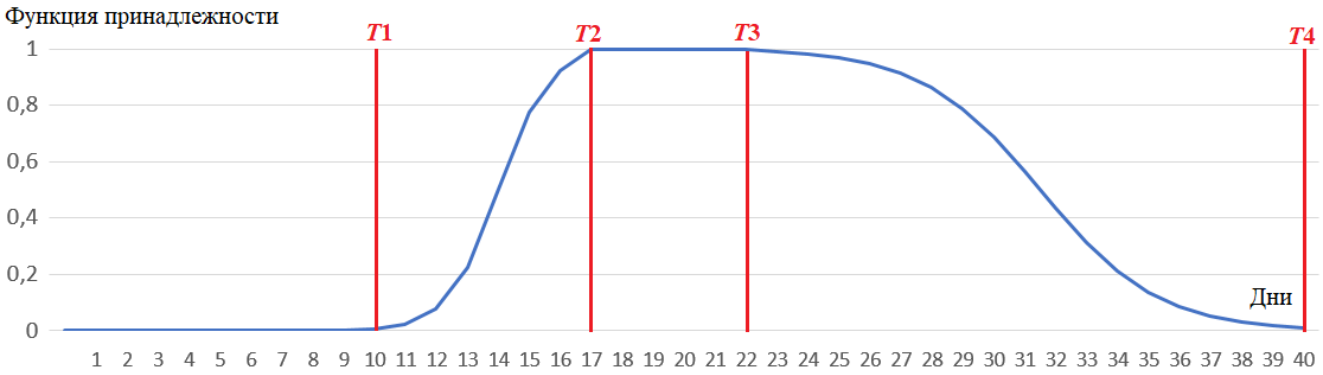


Рисунок 2 *– Функция принадлежности μ готовности изделия (пример для 40 дней)*

Моделирование выполнено на VBA в среде Excel. Для расчёта сигмоиды написана функция *Sigmoid*. Для построения функции принадлежности – функция *Zakon*. По функции принадлежности μ_T рассчитывается плотность функции распределения $F(D)$ как отношение значения функции принадлежности μ_{TD} за день D к сумме всех значений функций за D_{max} дней:

$$F(D) = \mu_T(D) / \sum_1^{Dmax} \mu_{TD} \quad (5)$$

Случайное значение x ϵ {0, 1} задаётся функцией VBA: *x = Rnd*, по которому определяется попадание в тот или иной день. На рисунке 3 для примера по рисунку 2 приведены результаты расчёта для 1000, 10 000 и 1 000 000 итераций. Из графиков видно, что число итераций должно быть не менее 1 млн.

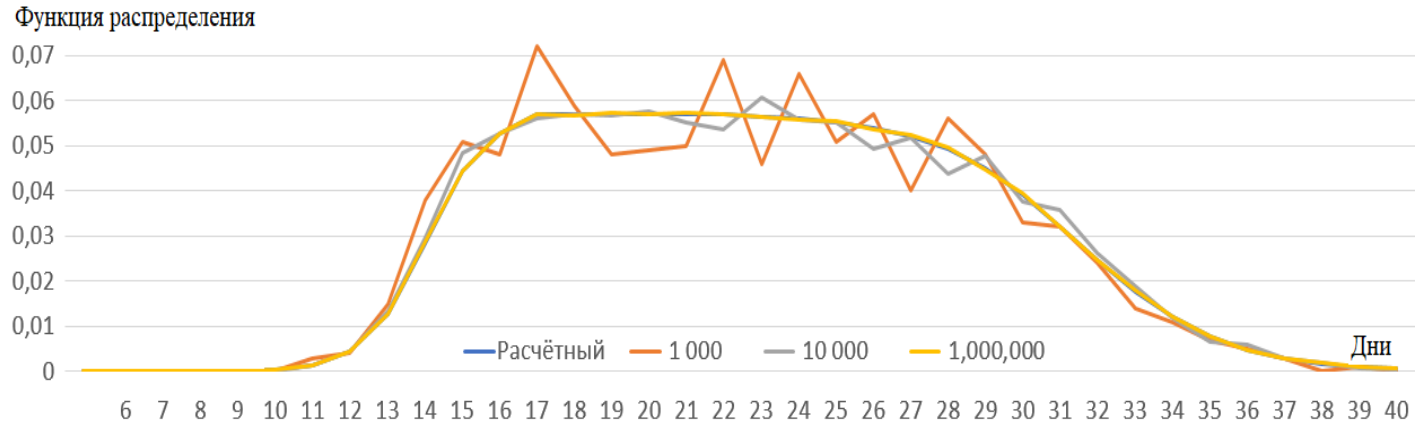


Рисунок 3 *– Функция принадлежности μ готовности при разном числе итераций*

Изделия изготавливаются партиями *N*. Партия может изготавливаться одновременно или параллельно по *M* изделий, кратных N. В этом случае при работе счётчика дней $D = D + 1$ следует суммировать $D = D + M / N$.

Доставка имеет ту же логику, что изготовление: есть физически минимально возможное время доставки, нормативное время и возможны задержки. Тогда, последовательно в каждой итерации следует просуммировать время изготовления $D_{ИЗГ}$ и время доставки $D_{ДОСТ}$:

$$D = D_{ИЗГ} + D_{ДОСТ}. \quad (6)$$

В таблице 1 приведены исходные данные для много итерационного расчёта, выполненного в этом подразделе. На рисунке 4 приведены результаты расчёта D, $D_{ИЗГ}$, $D_{ДОСТ}$ при 1 млн итераций.

Таблица 1 *– Исходные данные для моделирования*

	ИЗГ	ДСТ
Длительность минимальная, дней	10	3
Норма начало	17	5
Норма конец	22	6
Длительность максимальная	40	10
Число изделий в партии	10	
Параллельное изготовление	5	

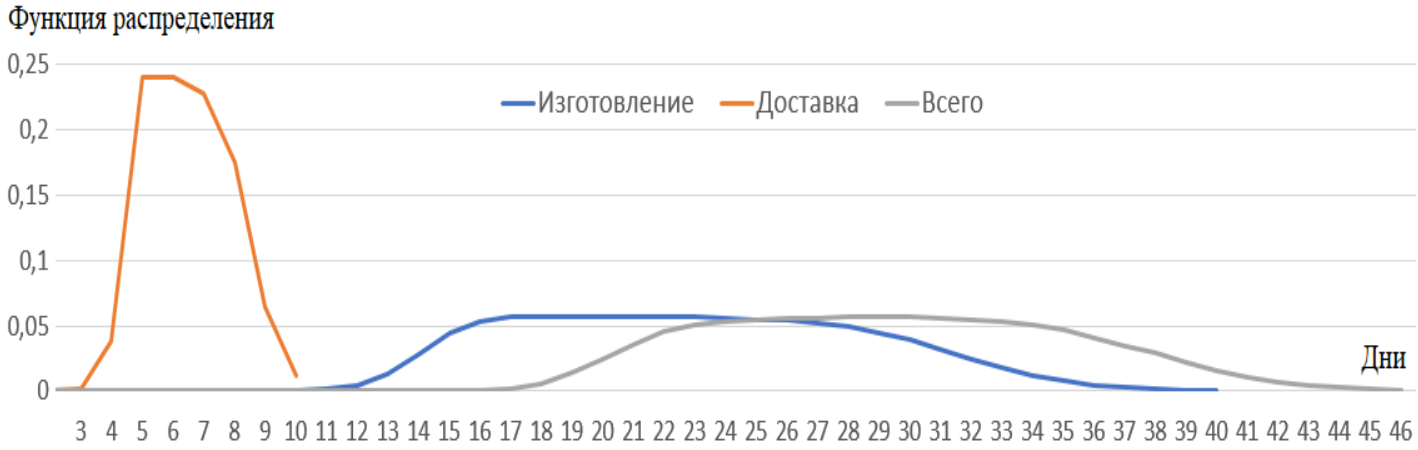


Рисунок 4 *– Функция принадлежности μ готовности изделия*

Зная распределение по рисунку 4, можно определить, за сколько дней следует выполнить заказ для доставки груза вовремя с заданной вероятностью P. Результаты расчёта приведены в таблице 2 и на рисунке 5. Следует обратить внимание, что увеличение вероятности доставки в срок с $P = 0{,}97$ до $P = 1{,}00$ приводить к росту запаса по времени на 20 % (в примере – 10 дней).

Таблица 2 *– Вероятность доставки запасных частей*

D	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
P	0,78	0,83	0,87	0,91	0,93	0,96	0,97	0,98	0,99	0,99	0,997	0,998	0,999	0,9998	0,99996	0,99998	1

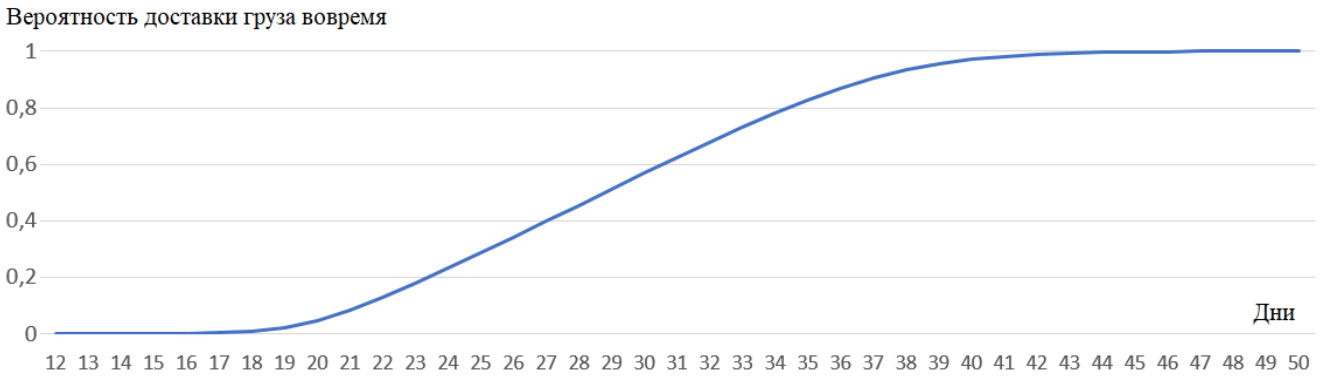


Рисунок 5 *– Вероятность доставки запасных частей при 1 млн итераций*

В дальнейших расчётах принята вероятность доставки в срок P = 0,990, что в рассматриваемом примере соответствует 42 дням.

Для ежесуточного обеспечения ТОиР ΔR ресурсом R на складе должен быть достаточный запас этого ресурса $S \geq \Delta R$ при доставке товара на склад за время ΔD (при стационарном процессе ΔR = const, ΔD = const) в объёме ΔS:

$$S < \Delta R * \Delta D. \quad (7)$$

При наличии N ранее сделанных заказов запасных частей ΔS для последующего заказа дополнительно должно выполняться условие:

$$S + N \cdot \Delta S < \Delta R \cdot \Delta D. \quad (8)$$

Для проверки выполнения условий заказа запасных частей выполнено математическое имитационное моделирование на VBA в среде Excel. Программа последовательно на каждый день определяет расход запасных частей ΔR и контролирует наличие запасных деталей на складе S для определения необходимости доставки новой партии запасных частей ΔS при условии: $\Delta S \geq \Delta R$.

На рисунках 6 и 7 показаны результаты моделирования процесса потребления и доставки запасных частей за 200 дней для стационарного и стохастического примеров процессов при математическом ожидании ежесуточного потребления ΔR = 10 шт., времени доставки ΔD = 20 дней партии ΔS = 40 шт. с начальным запасом на складе S = 220 шт.

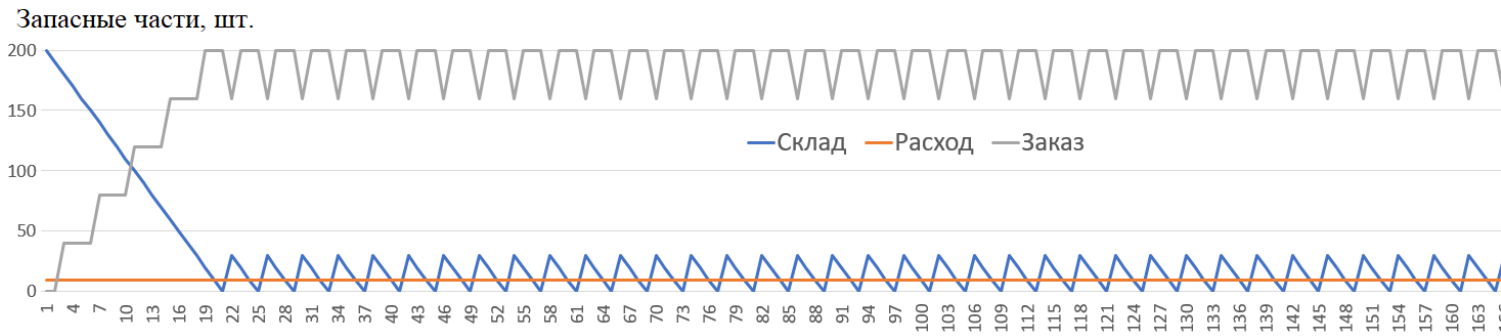


Рисунок 6 *– Расход ресурсов при стационарных процессах потребления и доставки*

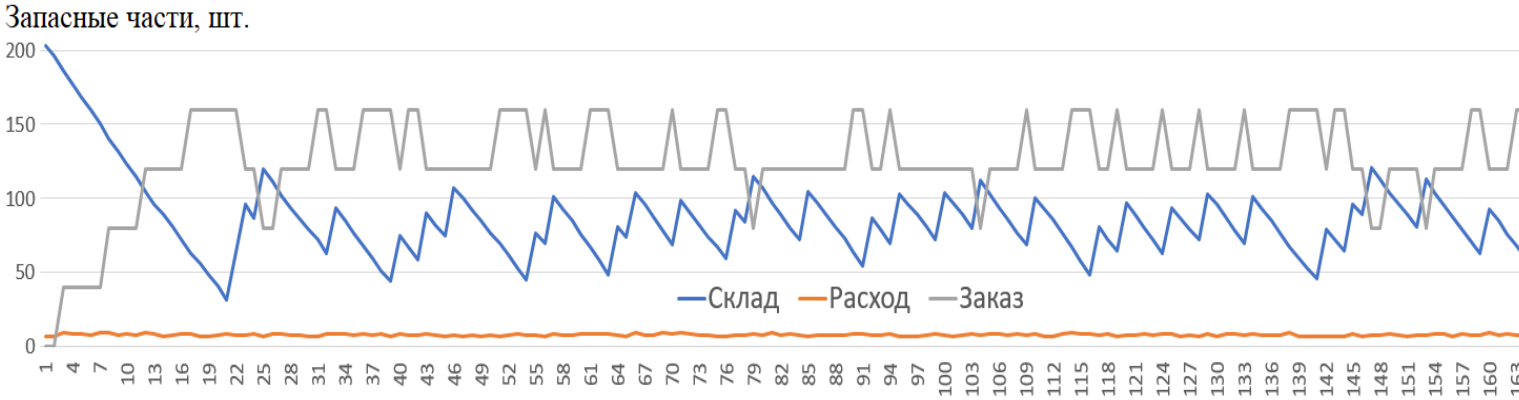


Рисунок 7 *– Работа склада при стохастических процессах потребления и доставки*

Статический процесс является установившемся с минимальным запасом запасных частей на складе. Дальнейшее сокращение запасов на складе возможно за счёт ускорения доставки, например, за счёт создания буферных складов (имеет смысл при наличии нескольких складов на полигоне.

Ситуация меняется при случайном процессе потреблении и доставки запасных частей. Видно, что содержание склада (синий график) стал нестабильным и возрос со среднего значения $S\text{ср} = 23$ единицы до $S\text{ср} = 82{,}2$. Ухудшились условия работы материально-технического обеспечения (МТО). Представляется целесообразным проведение много итерационного моделирования работы МТО для оптимизации складских запасов $S\text{ср} \rightarrow \min$.

Процесс потребления ресурсов носит стохастический (вариативный) характер, значит прогнозирование потребления ресурса ΔR и времени доставки ресурса ΔD носит вероятностный характер: при расчётах следует задаться вероятностью потребления P_R и вероятностью доставки P_D. Возникает риск отсутствия ресурса R, а если задать $P_R \rightarrow 1$ и $P_D \rightarrow 1$, то возникает пересодержание склада, заморозка оборотных средств, как следствие – повышение себестоимости ТОиР. Следует помнить, что для $P_R = 1$ и $P_D = 1$ теоретически потребуется $S \rightarrow \infty$.

Задачу оптимизации складских запасов предлагается решить имитационным математическим моделированием по методу Монте-Карло [6]. Характер вероятностных процессов определён в предыдущих подразделах.

На рисунке 8 приведена блок-схема предлагаемого алгоритма управления ресурсами ТОиР на примере поставки ЗИП. В программное обеспечение АСУ ТОиР должен быть инкапсулирован предлагаемый алгоритм, которые периодически запускается на исполнение (блок 1).

Изначально считываются статистические данные о времени изготовления и доставки ЗИП, его потреблении по стопроцентной и вариативной сменяемости, размер партии доставки и другие исходные данные (блок 2), по которым производится подготовка к расчётам, в т.ч. расчёт по статистическим данным и функциям принадлежности μ функций распределения изготовления и доставки ЗИП (блок 3).

Задача программы – минимизировать запасы на складе S так, чтобы минимальный запас S_{min} не был отрицательным (дефицит ЗИП) с вероятностью P не менее заданной. При этом управление происходит через время предзаказа ЗИП *Delta*. Программа производит много итерационный расчёт, увеличивая каждый раз период планирования: *Delta* = *Delta* + 1 (блок 4) до максимально заданного *DeltaMax* (блок 5).

Для каждого значения *Delta* программа моделирует работу материально-технического снабжения за заданное D_{max} дней. По умолчанию задано 777 дней моделирования (блоки 6 – 7).

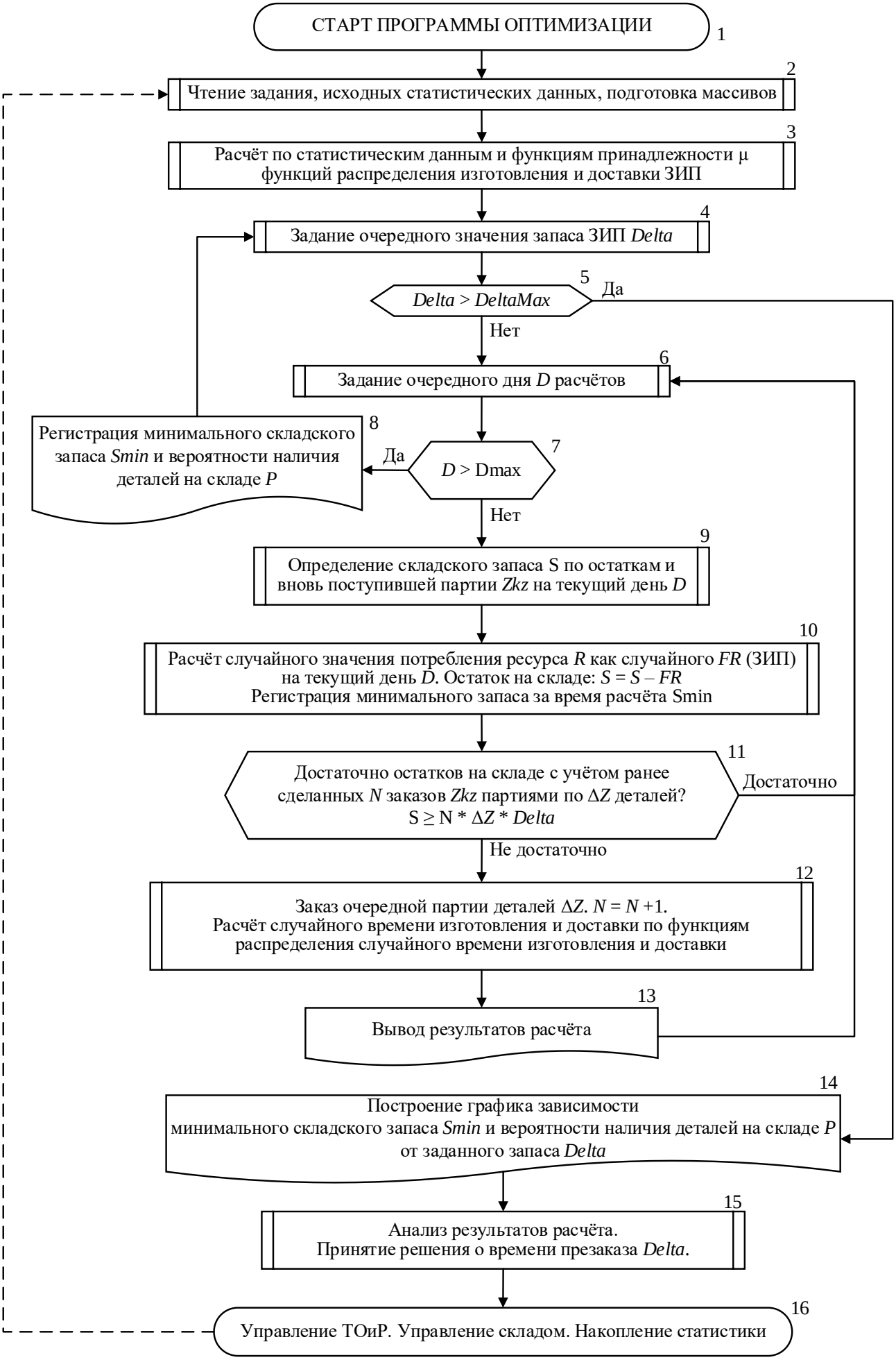


Рисунок 8 *– Алгоритм определения неснижаемого запаса ЗИП по Delta*

Для каждого дня программа контролирует складской запас S (блок 9) с учётом поступления заказов партиями по ΔZ изделий и расхода ресурсов FR. Расход материалов и время их поступления определяются как случайные данные с использованием генератора случайных чисел Rnd. В этот момент фиксируется минимальный запас на складе S_{min}.

Для каждого дня D после выдачи материалов FR и получения по заказу ΔZ (блок 10) следует проверить необходимость следующего заказа по условию:

$$S < N * \Delta Z * Delta. \quad (9)$$

После сравнения (блок 11) в случае необходимости производится заказ (блок 12). Результаты моделирования выводятся на лист (блок 13). И так повторяется для каждого заданного значения $Delta$ (блок 4). По окончании расчётов строится график (блок 14) и определяется оптимальное значение $Delta$. Работа продолжается с продолжением накопления статистики (блок 16).

На рисунках 9 и 10 приведены результаты расчёта по разработанной программе зависимости минимального запаса деталей на складе S_{min} и вероятности наличия деталей на складе P для следующих данных:

- длительность изготовления и доставки минимальные: 10 и 3;
- ожидаемой время изготовления и доставки: 17 – 22 и 5 – 6;
- максимальное ожидаемое время изготовления и доставки: 40 и 10;
- число изделий в партии: 30;
- параллельное изготовление: 5;
- стопроцентная сменяемость: 10;
- средняя вариативная сменяемость: 2;
- число дней расчёта: 777.

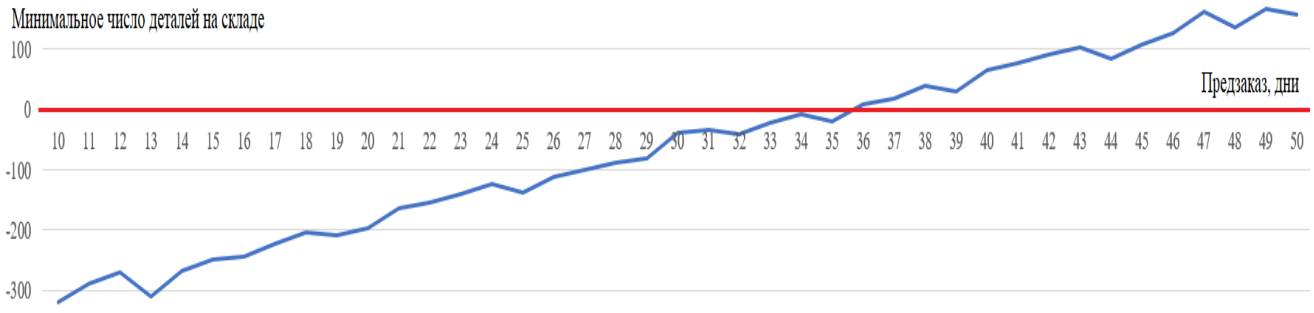


Рисунок 9 *– Определение оптимального запаса ресурсов*

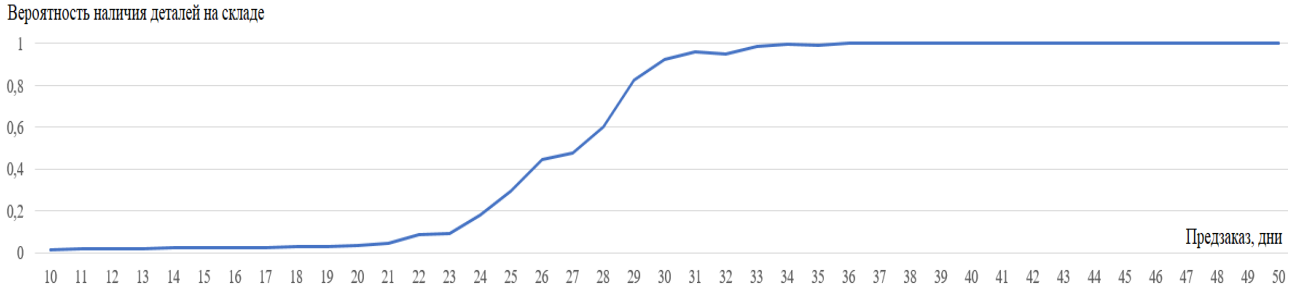


Рисунок 10 *– Вероятность наличия деталей на складе по рисунку 9*

Расчёты показали, что число дней предзаказа для рассматриваемого примера должно быть не менее 34-х (таблица 3). Таким образом, постоянно обновляя статистику о поступлении и расходе ресурса, можно постоянно корректировать условия управления, отказавшись от статичных нормативов содержания склада [5].

Таблица 3 *– Результаты расчёта по рисункам 9 и 10*

Дней предзаказа *Delta*	Минимальный остаток	Вероятность наличия деталей
29	-80	0,8237
30	-39	0,9260
31	-34	0,9615
32	-42	0,9498
33	-22	0,9853
34	-7	0,9985
35	-20	0,9897
36	9	1
37	19	1

ЛИТЕРАТУРА

1. 1С:ERP Управление предприятием. Официальный сайт https:// v8.1c.ru/erp/
2. Что такое цифровая трансформация / SAP // www.sap.com/central-asia-caucasus/insights/what-is-digital-transformation.html
3. Пустовой, В. Н. История становления предиктивного ремонта в АО "Трансмашхолдинг" / В. Н. Пустовой, И. И. Лакин // Локомотив. – 2021. – № 10. – С. 12-13. – Текст : непосредственный.
4. Ассоциация Деминга, официальный сайт. – URL: www.deming.ru (дата обращения: 25.01.2021). – Текст электронный.
5. Куцевол, Н. А. Метод формирования неснижаемого запаса материалов по статистике их потребления на техническом обслуживании и ремонте тягового подвижного состава / Н. А. Куцевол, И. И. Лакин, И. В. Пустовой // Материалы VI всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава (Ремонт и Динамика'23)». – Омск: ОмГУПС, 2023. – С. 159-166. – Текст : непосредственный.
6. Михайлов, Г. А. Статистическое моделирование. Методы Монте-Карло : учебное пособие для вузов / Г. А. Михайлов, А. В. Войтишек. — Москва : Издательство Юрайт, 2024. — 323 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-11518-5. — Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. — URL:

Инжиниринговый центр железнодорожного транспорта (ИЦ ЖТ), г. Москва

Лакин Игорь Игоревич: к.т.н., ведущий специалист

УДК 629.423.25 ГРНТИ 73.29.41

И. К. Лакин

АНАЛИЗ ТИПОВЫХ ОШИБОК ПРИ ВНЕДРЕНИИ АСУ ТОиР ТЯГОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Аннотация. *Автором за последние 40 лет внедрения автоматизированных технологий, прежде всего, в локомотивном комплексе накоплен огромный как положительный, так и отрицательный опыт. «Все семьи счастливы одинаково» – поэтому и положительный опыт автора статьи сильно не отличается от опыта других: выполнен анализ типовых ошибок, сильно влияющих на эффективность автоматизированных систем управления (АСУ). При этом по аналогии со слоганом древнекитайского философа Лао-Цзы «Это болезнь» применён слоган «это не АСУ», подчёркивающий критичное влияние признака на работоспособность информационной системы. Автор надеется, что сформулированные принципы разработки и внедрения АСУ помогут читателям в их работе.*

Ключевые слова: *информационные технологии (AI), автоматизация технического обслуживания и ремонта тягового подвижного состава, типовые ошибки.*

Принципы современных цифровых технологий и двоичного исчисления заложены ещё в 17-м веке Готфридом Лейбницем [1]. Джорджем Булем в 19-м веке предложена двоичная логика. Идеи автоматизации расчётов и управления были сформулированы Чарльзом Бэббиджем в конце 19-го века, сделана попытка создать аналитическую вычислительную машину. Изобретатель электронной вычислительной машины Алан Тьюринг в середине 20 века определил абстрактные правила работы «Машины Тьюринга», лежащие в основе функционирования всех современных электронных вычислительных машин (ЭВМ). Норберт Винер в 50-е годы 20-го века определил автоматизированную систему управления (АСУ) как систему с отрицательными обратными связями [2]. Академик В. М. Глушков в 60 – 70-е годы, исходя из собственного опыта, сформулировал принципы создания АСУ [3].

Современный этап развития систем управления и менеджмента не мыслим без использования вычислительной техники – от сверхмощных серверов до персональных компьютеров, планшетов и даже smart-телефонов. Феноменального развития достигла технология обмена информацией. При этом опыт внедрения АСУ свидетельствует о наличие большого числа ошибок. Автор статьи хочет поделиться личным опытом и опытом своих коллег, накопленным за 40 лет внедрения АСУ в локомотивном хозяйстве в целом и его системе технического обслуживания и ремонта (ТОиР) в частности [4]. Сделана попытка выявить основные ошибки при внедрении информационных систем на примере локомотивного хозяйства. Идеи искусственного интеллекта (ИИ, AI) в статье не рассматриваются, т.к. до идей фантаста Айзика Азимова, несмотря на огромные достижения в области использования нейронных сетей, ещё далеко.

В России, ОАО «РЖД», в локомотивном хозяйстве успешно внедряются информационные технологии, на базе которых строятся и АСУ [4]. Имеются существенные достижения, перспективы развития. Внедрение информационных технологий на железнодорожном транспорте началось в конце 60-х годов под руководством академика А. П. Петрова. Сразу же был взят курс на создание АСУ железнодорожного транспорта («кибернизацию» транспорта) – «АСУЖТ», принципы которой остаются в основе IT-технологий ОАО «РЖД». Несмотря на успешное и часто опережающее внедрение АСУЖТ, допускаются и ошибки.

В трудах древнекитайского философа Лао-Цзы (4-й век до нашей эры) есть рассуждения «о ста заболеваниях» от обратного – какое поведение приводит к болезни. Например: «В гневе желать кому-то смерти – это болезнь», «Будучи сильным и влиятельным, предаваться лени – это болезнь», «Делая зло людям, радоваться себе – это болезнь», «Делая добрые дела, ждать воздаяния – это болезнь». В статье аналогичным образом и с использованием **слоганов** сформулированы основные ошибки внедрения АСУ на примере АСУ ТОиР.

Решение старых задач – это не АСУ. Это один из основополагающих принципов АСУ В. М. Глушкова [3]. К сожалению, очень часто в АСУ повторяют старую технологию работы, рассчитанную на ручную обработку информации. Например, формирование планов и отчётов за календарные месяц, квартал: трудоёмкость ручной работы требовала ограничения числа отчётов. При этом возникала проблема с данными в начале периода: если в первый день месяца машинист съездил в поездку, то у него 200 % выработки, если нет – 0 %. Управлять режимом труда и отдыха по таким данным невозможно первые 10 дней месяца. В АСУ следует контролировать работу за последние 30 дней. Значительная часть отчётов нужна была для ручного контроля процесса, необходимость в котором отсутствует в АСУ. В приведённом примере АС просто не допустит подвязку бригады под поезд при наличии нарушения режима труда и отдыха. В ТОиР – не допустит слесаря низкой квалификации к работам.

Использование текстовых данных – это не АСУ. Ввод данных в АСУ должен максимально использовать различные классификаторы: депо, серий локомотивов, оборудования и др. Неформализованные поля трудно использовать прим факторном анализе. Именно использование классификаторов позволяет исключить ошибки при вводе названий. У автора был опыт, когда в системе SAP R/3 надо было посчитать число водителей автомобилей: задач оказалась невыполнимой из-за отсутствия классификаторов: «водителей», «шофёров», «машинистов» и даже «водитель машины с гос. номером …» оказалось слишком много. Создание и сопровождение классификаторов – трудоёмкий процесс. Отсутствие нужного поля может затормозить процесс. Поэтому предлагается плюс к обязательному классифицируемому полю иметь текстовое, контролируя которое можно сопровождать классификаторы, добавляя и изменяя их содержание.

Информация в АСУ вторична – это не АСУ. Наличие первичной информации не в АСУ губительно для АСУ. Ещё в 1988-м году при внедрении автоматизированного рабочего места (АРМ) нарядчика локомотивных бригад возник конфликт между данными на ручном табло работы бригад и данными АРМ, которые были вторичны и менее достоверны. Ликвидация доски нарядов, бумажных книги адресов, расписания и др. обеспечила достоверность данных АСУ. Сейчас вместо бумажных «исходников» выступают файлы в формате Word, Excel и др. Однозначно эти файлы губят АСУ. Как топили идолов в Днепре, так надо объявить войну исходной информации вне АСУ.

Часто, в т.ч. на складе и в бухгалтерии, звучит тезис: «У меня бумажный документ обязательный». Аналогичная ситуация возникает при передаче и приёмке локомотива на ТОиР. Во-первых, это противоречит федеральному закону «Об электронной подписи» (№ 63-ФЗ от 06.04.2011, первый ФЗ, подписанный президентом электронной подписью). Во-вторых, всегда можно распечатать материал АСУ по итогам работы.

Сложнее ситуация с начальными замерами и определением технического состояния локомотива при приёмке и выполнении ТОиР. Но и здесь есть выход. Во-первых, это использование данных бортовых микропроцессорных систем управления (МСУ). Во-вторых, использование автоматизированных систем технического диагностирования (АСТД), опыт разработки и внедрения которых накоплен в НИИТКД и компании ОМИКС, в т.ч. в сервисном локомотивном депо (СЛД) «Братское».

Таким образом, принципиально можно отказаться от ручных документов. При этом достоверность вводимой информации выше за счёт использования классификаторов и логическому контролю.

Повторный ввод информации – это не АСУ. Это классический пример интеллектуальных потерь, который ещё и понижает достоверность данных. Типичные примеры ввода информации в компьютер, который уже есть в АСУ: пробег локомотивов, депо приписки локомотива, фамилия машиниста, название детали и многое другое. К сожалению, эта информация в различные акты и протоколы в среде Excel и Word в депо регулярно вводится по много раз. Да и сами эти документы, как отмечалось выше, должны исчезнуть.

Нет автоматического контроля вводимых данных – это не АСУ. Первый контроль даёт использование классификаторов, второй – логический контроль. Например, если введённая толщина бандажа колёсной пары 75 мм, а предыдущее значение было 73 мм, то АСУ должна выдать сообщение об ошибке. Важную роль играет использование классификаторов совместно с логическим контролем: серия локомотива с контролем наличия такой серии на полигоне, депо приписки с выводом в списке только депо полигона, фамилия машиниста или мастера, др. При работе с отказами (дефектами, сверхцикловыми работами и др.) допускает наличие вспомогательного необязательного текстового поля.

Наличие операторов – это не АСУ. Работа с АСУ предполагает отсутствие других, в т.ч. рукописных, источников информации. Наглядное представление

информации и поддержка принятия решений – важные элементы АСУ, позволяющие специалисту принимать правильные решения, контролировать процесс. Если под предлогом большой занятости у руководителя появляется оператор для ввода информации – он лишается важных достоинств АСУ, невольно возвращается к старой ручной технологии. Неоднократно автор убеждался, что, если мастер свободно владеет работой в АРМ, то и уровень управления ТОиР у него на высоком уровне.

Ручные отчёты и анализы – это не АСУ. Ранее упоминаемый АРМ нарядчика окончательно признали, когда автоматизировали отчётность. Отчёты –наглядный пример интеллектуальных потерь первого рода согласно методологии Бережливого производства (Lean Production) [5, 6]. Не случайно в МПС СССР был запреет на отчёты неустановленных форм и периодичности. В АСУ отчёты формируются без трудоёмких потерь с любым набором фильтров и периодом, в т.ч. с использованием популярной технологии Power BI («интерактивные дашборды»).

Но, несмотря на важность функции формирования отчётов, АСУ должна исключать отчёты как признак старой ручной технологии управления. Пример: если АСУ блокирует нарушения режима труда и отдыха локомотивных бригад, то и отчёты о нарушениях не нужны. Если АСУ блокирует перепробег локомотивов, возможность выдачи локомотива без выполнения всех предусмотренных планово-предупредительных ТОиР, то и не нужны соответствующие отчёты.

Функции встроенного качества делают отчёты не нужными в управлении. «Правильно или никак» - принцип работы АСУ. Остаётся необходимость только в аналитических отчётах для реализации принципов цикла PDCA [7]. Учитывая, что большинство чиновников заняты формированием отчётности, АСУ должна резко сократить штат управленцев.

Сотрудники для отчётов – это не АСУ. К сожалению, запрос информации «у линии» или поручение подчинённым подготовить тот или иной отчёт – обычная ежедневная практика. Более того, работа многих сотрудников и даже подразделений сводится к подготовке отчётов. Хуже того, после подготовки отчётов на ЭВМ, они распечатываются. Это отнимает очень много времени, при этом создаются предпосылки искажения информации или просто ошибки. Умение самостоятельно делать запросы в АСУ, умение работать с информацией на экране – обязательное требование к современному руководителю любого уровня управления. Руководители 21-го века должны принципиально отличаться от руководителей предыдущих веков способностью общаться с компьютером. В решении этой задачи должен сыграть роль и искусственный интеллект. Также не следует путать отчётность и многофакторный анализ.

Неумение работать с компьютером – это не АСУ. Об этом тоже уже шла речь. На первых этапах внедрения АСУ такая проблема была. И нарядчики работали с клавиатурой «одним пальцем». И позже у машинистов возникала проблема с прохождением электронного инструктажа. Да и при внедрении АРМ Мастера постоянно звучало: он отлично знает локомотив, а с компьютером работать не умеет. Сейчас, в

третьем десятилетии 21-го века умение работать с компьютером следует считать обязательным. Редкий житель России не имеет smart-телефон и не знает, что такое диалог с программой (интерфейс). Умение работать с компьютером следует вписывать в должностные инструкции работников. Но это не снимает требование «дружественного интерфейса» используемых в АСУ программ.

Компьютер сбоку стола – это не АСУ. Компьютер – это вход работника в АСУ, его главный инструмент автоматизированного исполнения своих обязанностей. Если компьютер в рабочее время выключен или неудобно стоит сбоку, значит, скорее всего, есть параллельная бумажная технология работы, которая недопустима. Отсутствие ЭВМ на удобном месте стола – признак отсутствия АСУ.

Бумаги на рабочем столе – это не АСУ. Эта тема уже раскрыта в предыдущих слоганах. Выделена отдельно, т.к. это наглядный признак неправильной работы АСУ. В настоящее время остаются бортовые журналы замечаний машинистов формы ТУ-152. Это явный архаизм: на всех современных локомотивах, число которых уже больше половины всего парка, в кабине машиниста есть бортовой компьютер, на котором легко реализовать электронный журнал ТУ-152. С него по радиоканалам информация может автоматически передаваться в деповской электронный журнал ремонтов (аналог журнала ТУ-28) для управления ТОиР. Принцип отсутствия бумаг – обязателен в АСУ.

Увеличение штата для АСУ – это не АСУ. Часто руководители линейных предприятий жалуются, что внедрение АСУ приводит к увеличению штата для ввода исходной информации. На переходном этапе такое может быть. Но анализ показал, что причина, во-первых, в оставшихся ручных отчётах, протоколах, актах и др., во-вторых, в повторном вводе данных: в блокнот, в Excel, в АСУ. В-третьих, отсутствие классификаторов и повторный ввод. Также имеет место экономия времени за счёт нарушения технологии работы, которые при АСУ становятся невозможными. Большой опыт автора статьи позволяет утверждать, что потребность в увеличении штата может возникать только при неправильной организации работы АСУ, даже при увеличении объёма контролируемых параметров.

Усложнение работы – это не АСУ. Такие жалобы приходится слышать постоянно. Причин может быть несколько, и они описаны выше: работник не отказался от «ручного» ведения информации, формирует отчёты вручную, недостаточно обучен работе с компьютером, перегружен «чужими» ролями. Возможны и другие временные проблемы: низкое быстродействие АСУ, неудобный интерфейс, отсутствие нужных данных в классификаторах – при внедрении АСУ должна действовать постоянная «горячая линия». АСУ должна облегчать труд, делать его более интеллектуальным и эффективным.

Полный доступ к данным – это не АСУ. При внедрении безбумажных технологий наряду с явными достоинствами возникает риск потери данных, невозможность доступа к ним, возможность доступа к данным непричастных и даже хакеров. Это очень важная проблема, которая должна решаться комплексно по принятым в АСУ канонам. И,

безусловно, доступ к информации должен быть ограничен и по условиям коммерческой безопасности. При создании АСУ эта зада должна решаться сразу.

Отсутствие ролей – это не АСУ. Этот тезис – продолжение предыдущего. Изменение штатного расписания – процесс длительный. Штат может учитывать местные условия. Привязка действий в АСУ с ограничением ввода и чтения должна определяться ролями, жёстко не привязанным к должностям: один работник может выполнять несколько ролей, и одна роль может исполняться несколькими работниками. Мастер выполняет роли назначения и закрытия нарядов, слесарь – отметка о начале и завершении работ. А роль диагностирования локомотива и формирования отчётов может выполняться несколькими работниками. Роль ограничивает доступ к информации: чем ниже уровень управления, тем уже информация, но шире права ввода данных. У роли высокого уровня управления расширенный доступ к информации, но низкие права по вводу данных. В должностных инструкциях конкретных работников должно указываться, какие роли он должен исполнять.

Отсутствие защиты данных – это не АСУ. Это уже третий слоган практически на одну тему. Безопасность базы данных – важный элемент АСУ. По статистике США, 70 % компаний, утративших базу данных, не сумели восстановиться. Современные аппаратно-программные средства обладают высокой надёжностью, что «расслабляет», создаёт ощущение безопасности. Но сбои в работе АСУ бывают, имеют место хакерские и вирусные атаки, возможны умышленные действия работников (первый вирус в мире был запущен в компании IBM обиженным, но талантливым сотрудником). Система безопасности АСУ должна создаваться сразу, профессионально и с использованием всех достижений.

Нет эффекта – это не АСУ. При технико-экономическом обосновании АСУ часто приходится слышать о «кумулятивном эффекте» – мол, всё станет лучше. И, на первый взгляд, действительно сложно оценить эффект от перехода на компьютерные технологии, если это не явное сокращение штата. Эту ошибку заметили авторы методологии Lean Production, чётко сформулировав тезис: что не создаёт прибавочной стоимости – является потерями (muda) первого и второго рода (т.е. от которых можно избавиться прямо сейчас или только потом). Именно через увеличение доходности производства следует оценивать эффективность АСУ. В ТОиР – это сокращение затрат на ремонт и обслуживание, сокращение парка локомотивов за счёт повышения их надёжности и сокращения времени простоя в депо, в конечном счёте – повышение объёма перевозок за счёт повышения их привлекательности. Нельзя оценивать эффект от АСУ в показателях АСУ. Эффект должен быть исчисляем в рублях.

Теперь два тезиса, собственно связанных с назначением АСУ.

Нет отрицательной обратной связи – это не АСУ. Это, собственно, главное требование к АСУ с позиций Кибернетики. Норберт Винер настаивал на этом тезисе, ставя его во главу угла [2]. АСУ должна управлять, сравнивая задание с текущей ситуацией по данным базы данных. Простейший вариант – контроль вводимой

информации, более сложный – формирование тревожных сообщений на экран, по почте и др. при наличии отклонений («отрицательная обратная связь»). Высший уровень – поддержка принятия решений и даже само принятие решений – автоматизированное (с участием человека) и автоматическое управление. И как раз этот принцип не соблюдается: большинство IT-систем нельзя считать АСУ. На железнодорожном транспорте главные АСУ (АСОУП, ГИД «Урал», АСУТ, ЕК АСУФР, КАС АНТ, АСУ «Сетевой график» и др.) АСУ не являются. При том, что основатель теории вариабельности предприятий, самый известный специалист в области управления качеством Эдвард Деминг, настаивал на реализации в системе менеджмента предприятия принципа постоянного улучшения, известного как цикл PDCA [7], который сам называл принципом Уолтера Шухарта.

Нет инкапсуляции математических методов – это не АСУ. На этом тезисе хотелось и закончить статью. Применение вероятностно-статистических методов управления [8] ещё во второй половине 20-го века стало основой современного менеджмента [7]. Даже в медицине появилось понятие «Доказательная медицина», основанное на статистической обработке данных об испытание лекарств, методик и др. Если в 60-е годы Э. Демингу приходилось доказывать необходимость вариабельных подходов, то сейчас это уже не обсуждается.

Многочисленные используемые методы [9] имеют в основе статистику, но первое же знакомство с математикой показывает трудность их практического применения в силу недостаточных знаний, неуверенности в своих действиях. Вот ту и приходит на помощь инкапсуляция математических и логических апробированных методов: предоставление наглядного интерфейса при достаточно сложных расчётах, скрытых от пользователя.

Пример. В 2013-м году было определено, что в СЛД «Тында-Северная» средний простой тепловозов на ТОиР составляет 111 суток. При проверке оказалось, что ни один не локомотив не стоял 111 суток. Часть локомотивов были на ТОиР нормативное время, часть – месяцами стояли «под забором» из-за отсутствия запасных частей (в т.ч. коленвалов). Эффект не правильного применения статистики в Интернет часто называют эффектом «средней температуры по больнице». На практике надо проверять данные на унимодальность с использованием, например, критерия согласия Пирсона, Колмогорова-Смирнова и др. Опыт автора статьи и его учеников показывает недопустимость брать средние показатели надёжности по сети: унимодальность имеет место при выборе данных по одной серии в одном депо (в отдельных случаях – полигоне) по одному виду движения: магистральные, вывозные и хозяйственные, пассажирские и пригородные поезда. Предлагается инкапсулированными методами проверять используемую в отчётах информацию и выделять её цветом в зависимости от степени унимодальности – вероятности соответствия одному из законов распределения случайной величины: нормальному, логнормальному, экспоненциальному и др.

Примеров необходимости в инкапсуляции математических методов много. Например, автоматическое выявление опасных трендов, сравнение параллельных

процессов и выявление необоснованных отличий (по стоимости и времени, числу отказов и др.) – сравнение двух средних, планирование складских запасов, планирование постановки на ТОиР, прогнозирование времени выдачи локомотива после ТОиР, прогнозирование расхода электроэнергии и топлива и др.

На уровне научно-исследовательских работ, в т.ч. учёных вузов, многие задачи проработаны, но из-за отсутствия инкапсуляции, а раньше и самих АСУ, не внедрены. Подключение учёных вузов могло бы существенно повысить научную наполненность АСУ через инкапсуляцию математических методов.

Таким образом, при внедрении АСУ необходимо не только соблюдать правила создания АСУ и информационных технологий в целом, использовать передовые методы управления и аппаратно-программные средства, но и следить за отсутствием типовых ошибок, описанных в настоящей статье. При анализе зрелости той или иной АСУ предлагается использовать предложенные методический подход.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лакин, И. К. История создания систем менеджмента качества (СМК) и особенности их внедрения на железнодорожном транспорте / И. К. Лакин, В. Н. Супрун. – Красноярск: КФ ИрГУПС, 2006. – 92 с. – Текст : непосредственный.
2. Винер, Н. Кибернетика или управление и связь в животном и машине / Норберт Винер. – Пер. с англ. – 2-е издание. – Москва : Наука, 1983. – 344 с. – Текст : непосредственный.
3. Глушков, В. М. Макроэкономические модели и принципы построения ОГАС. – М.: Статистика, 1975, 160 с.
4. Лакин, И. К., Автоматизированная система управления эксплуатационным жизненным циклом локомотивов / Лакин И.К., Пустовой И.В., Аболмасов А.А. Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава: труды Всероссийской научно-практической конференции с международным участием – Красноярск: ДЦВ Красноярской ж.д., 2020, с. 223 – 242.
5. Toyota Production System. Производственная система Тойота. Сайт Forstor – официального дилера Toyota Material Handling. – URL: https://toyota-bt.com/materials/toyota-production-system (дата обращения: 25.01.2021). – Текст : электронный.
6. Джонс, Дэниэл Бережливое производство. Как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании / Дэниел Джонс, Джеймс Вумек – Москва : Альпина Паблишер, 2020, 472 с. – Текст : непосредственный.
7. Деминг, Э. Выход из кризиса: Новая парадигма управления людьми, системами и процессами / Э. Деминг. – Пер. с англ. – Москва : Альпина Бизнес Букс, 2007. – 370 с. – Текст : непосредственный.
8. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров // 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Академия, 2003. – 464 с. – Текст : непосредственный.
9. Исикава, К. Японские методы управления качеством / Пер. с англ. / Науч. ред. и предисл. А. В. Гличева. – Москва : Экономика, 1988. – 215 с. – Текст : непосредственный.

АО «Трансмашхолдинг» (ТМХ), г. Москва.

Лакин Игорь Капитонович: д.т.н., профессор, начальник ситуационно-аналитического центра мониторинга и реагирования

УДК: 621.33 ГРНТИ: 73.29.41

И. О. Лобыцин, С. О. Литвинцев, Е. Ю. Дульский, Т. В. Волчек, В. С. Томилов

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕМЕНТА КРЕПЛЕНИЯ ЩЕТОЧНОГО АППАРАТА ТЭД С ПРИМЕНЕНИЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ КОНВЕЙЕРНЫХ ЛИНИЙ

Аннотация. *С увеличением объемов эксплуатируемого парка тягового подвижного состава возникла потребность в повышение скорости выполнения деповских и заводских ремонтов с сохранением высокого качества. Целью работы является оптимизация технологического процесса восстановления изоляционных пальцев с применением автоматизированных конвейерных линий, соответствующих современным требованиям производительности. Основные научно-технические решения, полученные при выполнении работы, определены в ходе глубокого исследования терморадиационного влияния на пропиточные электроизоляционные составы.*

Ключевые слова: *изоляционные пальцы, ремонт локомотива, автоматизация, конвейерная линия, терморадиационный нагрев.*

Ежедневно специалисты железнодорожного транспорта выполняют колоссальную работу по повышению эффективности производства, внедрению современных технических решения и передовых технологий на железнодорожные предприятия, что способствует оптимизации существующих производственных процессов. В обеспечении эффективной, надежной и четкой работы железных дорог большая роль принадлежит локомотиворемонтным предприятиям. Они должны работать ритмично и слаженно, обеспечивая безотказное использование тягового подвижного состава при наименьших затратах на их ремонт и техническое обслуживание [1].

Главной задачей организации производства на локомотиворемонтном предприятии является обеспечение непрерывности и ритмичности общего производственного процесса, основанного на расчленении его на элементарные операции и максимально возможном параллельном осуществлении этих операций с целью сокращения общего времени производства и своевременного выполнения плана предприятия.

С увеличением эксплуатируемого парка локомотивов многократно увеличилась потребность в ремонте отдельных узлов и деталей, в связи с чем, для выполнения поставленных производственных задач стали активно внедряться автоматизированные системы, которые при должной научно-технической проработке можно использовать для создания конвейерных линий не только изготовления, ни и ремонта локомотивов [2].

Каждый технологический процесс ремонта отдельной детали тягового подвижного состава в определенной степени можно разложить на полноценно автоматизированные этапы. В качестве примера, рассмотрим предлагаемую автоматизацию технологического процесса восстановления электроизоляционного лакового слоя изоляционных пальцев

ТЭД, которые являются единственным элементом крепления щёткодержателя на поворотной траверсе.

На рис. 1 схематично представлен существующий процесс восстановления электроизоляционного лакового слоя изоляционных пальцев ТЭД при деповском ремонте.

Рис.1 – Этапы восстановления изоляционных пальцев при деповском ремонте

Автоматизация данного процесса возможна с применением технологии терморадиационного нагрева, разработанной научным коллективом Иркутского государственного университета путей сообщения. Данная технология позволяет произвести наиболее оптимальную сушку пропиточных изоляционных составов с непрерванным контролем и регулировкой теплового поля, получая высококачественную электроизоляционное покрытие [3,4].

Благодаря разработанному устройству для сушки изоляционных пальцев ТЭД камерного типа, рис. 2, появилась возможность создания конвейерной линии по их ремонту. Оснащение данного устройства программируемыми логическими контроллерами (ПЛК) обеспечит: регистрацию и изменение температурных показателей при сушке; контроль состояния поверхности детали с возможностью очистки боковых поверхностей при подготовке; оптимальное нанесение пропиточного изоляционного состава; контроль качества диэлектрического покрытия на этапе окончательной проверки перед выпуском.

Рис.2 – Установка для сушки изоляционных пальцев ТЭД камерного типа

Технологический процесс восстановления изоляционных пальцев с применением предлагаемой автоматизированной конвейерной линии представлен на рис.3, которая имеет функциональное зонирование, включая в себя пост предварительного контроля, камеру терморадиационного нагрева и пост выходного контроля. Стоит отметить, что в данной установке могут быть применены современные научно-технические решения, которые значительно степени позволят сократить технологический процесс [5].

Пост предварительного контроля предназначен для оценки состояния поступивших на ремонт деталей. С применением оптических датчиков происходит измерение геометрических параметров изоляционных пальцев и выявление критических зон нарушения целостности изоляции.

Рис.3 – Установка для сушки изоляционных пальцев ТЭД камерного типа

На следующем этапе происходит очистка изоляционных пальцев с применением механизмов обработки вращающихся поверхностей. С равномерно вращающихся деталей методом точения снимается отвержденный слой изоляционного лака до достижения пресс материала.

После подготовки поверхности деталей, выполняется их перемещение в камеру терморадиационного нагрева, в которой осуществляется предварительный нагрев. Инфракрасные излучатели локально передают тепловую энергию деталям, при этом работа излучателей на максимальной мощности значительно сокращает процесса. Нанесение пропиточного состава выполняется методом окунания после перемещения деталей из камеры нагрева. Наиболее эффективным методом окунания является вибро-осциляционный метод, который позволяет снизить объем воздушных масс между изоляционным составом и подготовленной поверхностью изоляционного пальца [6].

Далее выполняется сушка, которая является основным и наиболее трудоемким этапом всего технологического процесса. Благодаря программно-аппаратному комплексу контроля и управления тепловым полем выполняется осцилляционная сушка пропиточного материала.

По окончанию сушки изоляционные пальцы перемещаются в зону выходного контроля, где выполняется их охлаждение при комнатной температуре (нормализация) с последующем выполнением выходного контроля. При выходном контроле

осуществляется проверка электрической прочности каждой детали на пробивной установке высокого напряжения, а также с применением косвенного метода оценки электрической прочности по твердости лакового слоя [7].

Оптимизация рассматриваемого технологического процесса с применением автоматизированной конвейерной линии обеспечивает непрерывность выполнения ремонтных работ с пятикратным увеличением производительности, позволяет снизить нагрузку с персонала, а также повысить качество выпускаемой продукции.

Список использованных источников

1. Волчек, Т. В. Повышение производительности пунктов экипировки локомотивов песком / Т. В. Волчек, В. С. Томилов, И. О. Лобыцин // Инновационные технологии на железнодорожном транспорте : Труды XXVII Всероссийской научно-практической конференции КрИЖТ ИрГУПС, Красноярск, 03 ноября 2023 года. – Красноярск: Иркутский государственный университет путей сообщения, 2023. – С. 167-170.
2. Худоногов, А. М. Инновационная технология повышения надёжности и продления ресурса электрических машин тягового подвижного состава / А.М. Худоногов, Е.М. Лыткина, Е.Ю. Дульский // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование 4 (36), 2012. - 261 с. - С. 102-108.
3. Дульский, Е. Ю. Влияние химических свойств полимеров и режимов ИК-энергоподвода на прочность и пластичность изоляции в локальных технологиях продления ресурса электрических машин тягового подвижного состава / Е.Ю. Дульский., А.М. Худоногов, Е.М. Лыткина // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2015. № 1 (21). С. 6-11
4. Лобыцин, И. О. Использование инфракрасного излучения при упрочнении изоляционных конструкций электрооборудования тягового подвижного состава / И. О. Лобыцин // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2020. – Т. 17, № 1. – С. 108-116.
5. Лобыцин, И. О. Восстановление лакового слоя изоляционных пальцев ТЭД с применением установки инфракрасного нагрева камерного типа / И. О. Лобыцин, Е. Ю. Дульский, Н. А. Баранов, В. А. Кручек // Бюллетень результатов научных исследований. – 2024. – № 3. – С. 142-153.
6. Патент № 2708070 C1 Российская Федерация, МПК H01B 19/02, H02K 5/12. Вибро-осцилляционный способ пропитки изоляции электрических машин с периодичным изменением давления и устройство для его реализации: № 2018139244: заявл. 06.11.2018: опубл. 04.12.2019 / Е. Ю. Дульский, П. Ю. Иванов, И. О. Лобыцин [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Иркутский государственный университет путей сообщения (ФГБОУ ВО ИрГУПС).
7. Лобыцин, И. О. Исследование твердости лакового слоя изоляционных пальцев тягового электродвигателя локомотива при конвективном и терморадиационном способах сушки / И. О. Лобыцин, И. А. Панков, А. М. Худоногов // Известия Транссиба. – 2021. – № 1(45). – С. 11-22.

Лобыцин Игорь Олегович: ведущий инженер НЦ «ЦМПЭ», АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (ВНИИЖТ).

Литвинцев Сергей Олегович: технический эксперт НЦ «ЦМПЭ», ВНИИЖТ.

Дульский Евгений Юрьевич: д.т.н., доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» ИрГУПС.

Волчек Татьяна Витальевна: к.т.н., старший преподаватель кафедры «Эксплуатация железных дорог», КрИЖТ ИрГУПС.

Томилов Вячеслав Станиславович: к.т.н., и.о. заведующего кафедрой «Эксплуатация железных дорог», КрИЖТ ИрГУПС.

УДК 629.423.1:621.314.2:681.518.5 ГРНТИ 73.29.41

О. А. Малышева, Синьюй Ян, В. А. Ковалев, Л. В. Бузмакова

ДИАГНОСТИКА НЕИСПРАВНОСТЕЙ СИЛОВОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Аннотация. *В статье представлены результаты исследования, направленные на повышение точности диагностики неисправностей силового электронного преобразователя CRH3 EMU электропоезда Fuxing с применением метода машинного обучения. Моделирование неисправностей преобразователя выполнено в MATLAB Simulink путем включения и отключения IGBT-транзисторов таким образом, чтобы имитировать рабочий режим преобразователя при возникновении одиночной неисправности. Для диагностирования неисправностей и выявления их специфики использовались в сочетании вейвлет-анализ и повышающий алгоритм ансамблевого метода машинного обучения. Рассмотрены преимущества, недостатки алгоритма машинного обучения, возможность осуществлять поиск неисправностей преобразователя CRH3 EMU на основе интеграции вейвлет-анализа и методов машинного обучения, которые могут заменить традиционные методы технического обслуживания и диагностирования неисправностей тяговых преобразователей подвижного состава.*

Ключевые слова: *диагностика, электронный преобразователь, CRH3 EMU, вейвлет-анализ, машинное обучение, метод ансамблевого обучения.*

Стремительное развитие железнодорожной отрасли Китая позволило к 2025 году высокоскоростному поезду EMU «Фусин» (Fuxing) развить скорость до 450 км/ч. Развитие высокоскоростного движения является перспективным направлением повышения объемов перевозок грузов и пассажиров. Эксплуатация высокоскоростных железных дорог предъявляет высокие требования к надежности, безопасности и стабильности работы электрооборудования электроподвижного состава.

Отличительной особенностью электротяговой нагрузки является ее непостоянство, связанное с изменением скорости, координаты поезда, профиля пути и других факторов, влияющих на величину потребляемой поездом электроэнергии и напряжение на токоприемнике. Силовое оборудование электропоезда функционирует в условиях резких изменений напряжения и тока, что является одной из причин его отказов. Разработка мероприятий, направленных на предотвращение отказов электрооборудования электровозов является актуальной технико-экономической задачей железнодорожного транспорта Китая.

Одним из основных узлов системы электроснабжения электропоезда CRH3 является электронный преобразователь, который обеспечивает электропитание оборудования поезда (тяговые двигатели, вспомогательные машины и др.).

Традиционные методы и подходы [1, 2], применяемые при анализе неисправностей электрооборудования электропоезда не позволяют с достаточной точностью получить информацию о состоянии преобразователя при возникновении отдельных неисправностей. Решение задачи повышения достоверности определения неисправностей преобразователя требует применения современных технологий интеллектуальной диагностики, которые предусматривают извлечение полезной информации о неисправностях из сигналов сложной формы и принятия на основе этого решений.

На рисунке 1 представлена структурная схема силовых цепей электропитания оборудования электропоезда «Фусин». Система тягового электроснабжения (блок 1) электрифицированной железной дороги (далее – СТЭ) выполнена по системе однофазного переменного тока напряжением 25 кВ. СТЭ содержит тяговые подстанции, предназначенные для преобразования электроэнергии по напряжению и тяговую сеть, которая обеспечивает передачу электроэнергии от тяговых подстанций до пантографа электровоза (блок 2).

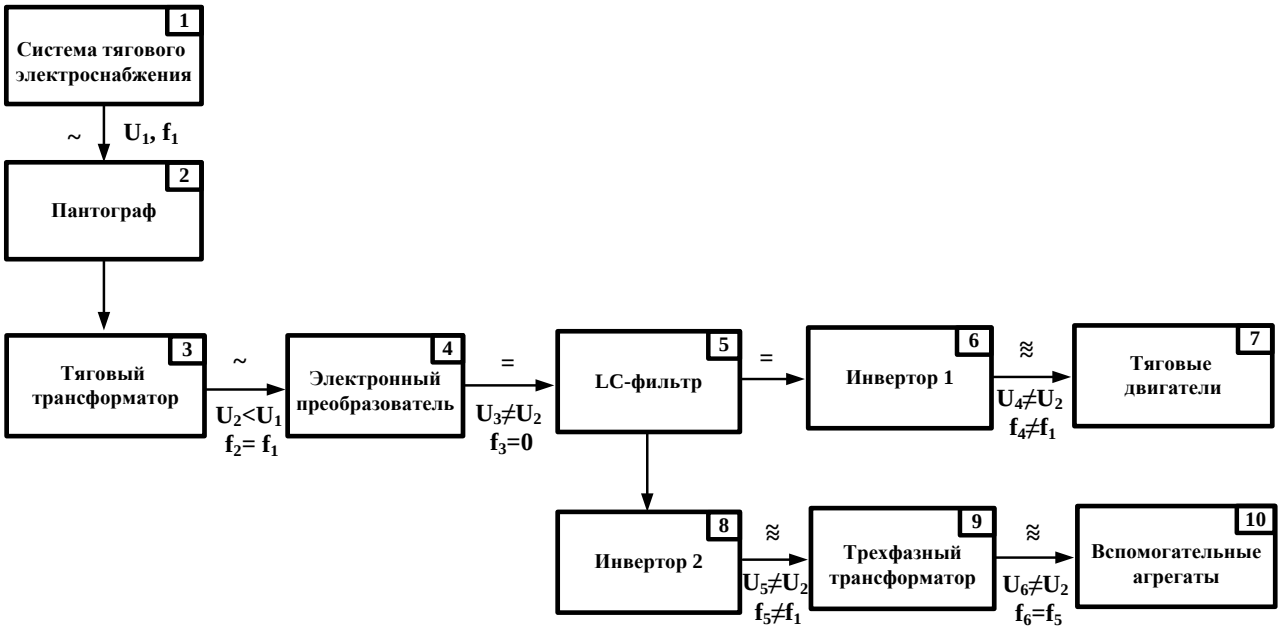


Рисунок 1 – Схема электрическая структурная силовых цепей электропитания оборудования электропоезда «Фусин» (Fuxing)

Тяговый трансформатор (блок 3) размещен в высоковольтной камере локомотива и обеспечивает преобразование напряжения в тяговой сети U_1 (на пантографе электровоза) в напряжение U_2, соответствующее паспортным данным тягового преобразователя (блок 4). Преобразователь обеспечивает выпрямление напряжения и, схемотехнически, представляет собой управляемый однофазный двухполупериодный выпрямитель, выполненный на биполярных транзисторах с изолированным затвором (далее – IGBT). Индуктивно-емкостный фильтр (блок 5) содержит сглаживающий реактор и емкостные цепи и обеспечивает сглаживание пульсаций выпрямленного тока и напряжения, подаваемого на инверторы 1 и 2 (блоки 6 и 8).

Инвертор 1 (блок 6) предназначен для преобразования постоянного напряжения в трехфазное переменное для питания тяговых двигателей (блок 7) и выполнен на IGBT транзисторах, включенных по мостовой схеме. Применение трехфазного мостового управляемого инвертора обеспечивает возможность регулирования частоты и амплитуды подаваемого на двигатели напряжения и, соответственно их скорости вращения.

Инвертор 2 (блок 8) выполнен аналогично инвертору 1 и обеспечивает преобразование выпрямленного напряжения в трехфазное переменное для электропитания вспомогательного оборудования электровоза (компрессоры, вентиляторы, освещение и др.). Трансформатор (блок 9) предназначен для преобразования напряжения на выходе инвертора 2 по амплитуде до требуемого по условиям нормальной работы электрооборудования уровня.

Для моделирования возможных отказов преобразователя электропоезда в работе создана схема преобразователя CRH3 EMU в MATLAB Simulink (рисунок 2) [3], с использованием которой выполнен ряд исследований, при моделировании включения-отключения IGBT. В результате моделирования были получены кривые выходного тока преобразователя в различных рабочих условиях, которые были использованы в качестве основы для диагностики неисправностей.

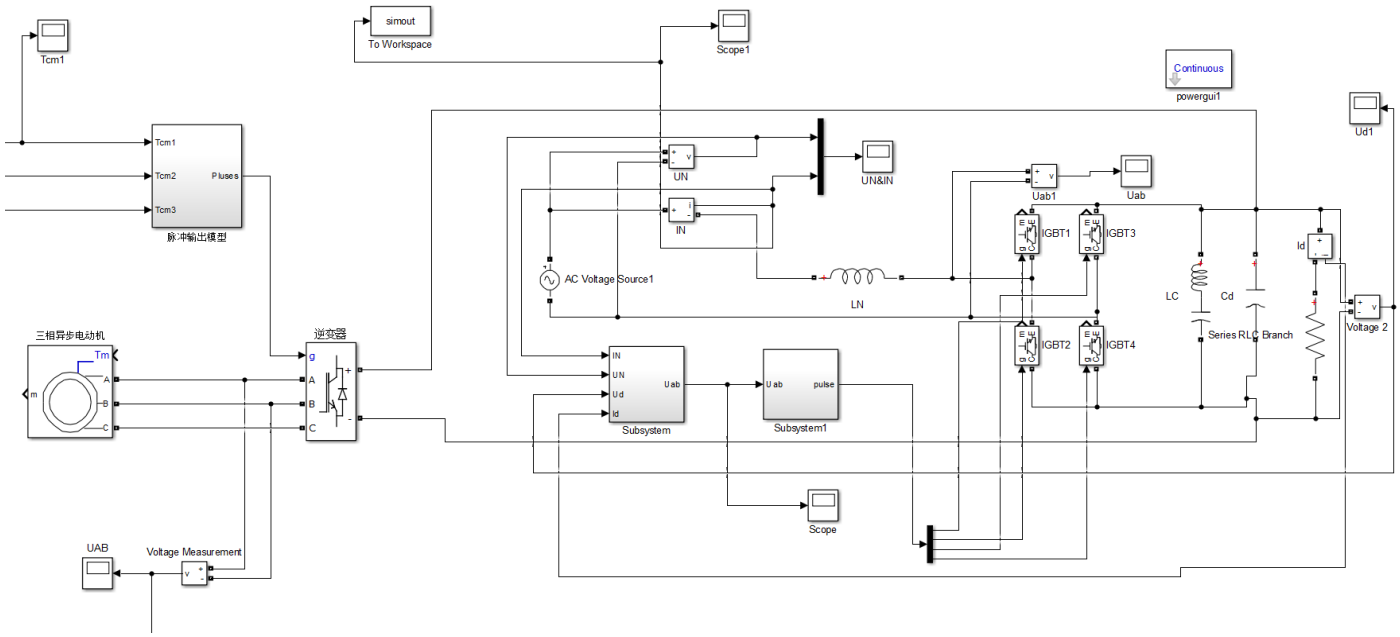


Рисунок 2 – Схема преобразователя CRH3 EMU для проведения моделирования в MATLAB Simulink

Для создания системы поддержки принятия решений по определению вида неисправности необходимо решить следующие задачи:

1) извлечение значимых признаков (распознавание образов);

2) создание модели машинного обучения;

3) реализация интерпретации результатов.

Извлечение значимых признаков (распознавание образов) неисправностей из сложной формы гармонического сигнала выполнено с использованием вейвлет-анализа.

Вейвлет-анализ предусматривает анализ частотных компонентов данных с учетом локальных особенностей сигнала, что повышает достоверность анализа по сравнению с преобразованием Фурье.

Когда преобразователь находится в нормальных рабочих условиях, форма выходного тока представляет собой трехфазную синусоидальную волну. При возникновении отказов в преобразователе часть текущего сигнала будет потеряна в неисправной части, в результате чего форма выходного тока перестанет быть симметричной и появится множество искаженных сигналов. При возникновении различных неисправностей в преобразователе полученные выходные сигналы различны, и существует множество детальных отличий, которые явно отличаются от форм сигналов в нормальных условиях эксплуатации.

Суть вейвлет-анализа заключается в разделении анализируемого сигнала по разным диапазонам частот. Когда преобразователь находится в разных рабочих условиях, состав каждой полосы частот также различен, поэтому необходимо выполнить анализ неисправностей на основе извлеченной информации из разных полос частот. Отличительным признаком сигнала о неисправности является то, что при возникновении неисправности в преобразователе форма сигнала тока будет иметь пиковое значение (скачок), которое отличается от нормального сигнала или «шума». Таким образом, применение вейвлет-анализа является возможным для диагностирования отдельных неисправностей электронного преобразователя.

На основании вышеизложенного можно установить, что, в дополнение к выводу о выходе из строя электронного преобразователя по выходному току, применение вейвлет-анализа позволяет определить, какая часть тягового преобразователя вышла из строя или имеет неисправность. Это можно понять, если выполнять анализ непосредственно во временной области, однако, для такого исследования необходимо извлечь информацию по многим параметрам, которые для других сигналов будут являться помехами.

С использованием технологии вейвлет-анализа в работе были проанализированы и очищены от шума 100 групп неисправностей. На основании полученных данных определены значения функций, использованные при создании модели машинного обучения [4], которая заменит традиционную ручную диагностику применением технологии искусственного интеллекта. Для этого могут быть использованы различные виды композиционных методов машинного обучения, например, ансамблевое обучение. Ансамблевое обучение представляет собой метод машинного обучения, в котором несколько моделей обучаются для решения одной и той же проблемы и объединяются в систему для получения лучших результатов, объединяя их в единое целое. При использовании данного метода машина проходит процесс обучения, преобразуя результаты вейвлет-анализа при возникновении различных неисправностей в характеристические значения, а затем сохраняет их в среде AdaBoost для дальнейшего

обучения системы обеспечения функционирования электропоезда. При возникновении известной для системы неисправности алгоритм предусматривает реакцию на ее появление в виде поиска возможного решения для минимизации последствий [5].

Одной из наиболее важных идей в интегрированном обучении является классификация, позволяющая машине продолжать обучение, прежде чем она адаптируется к классификации различных неисправностей. Фактически используется разное количество слабых классификаторов в наборе инструментов, а далее они соединяются вместе в различных комбинациях. Таким образом используются результаты классификации ансамблевого обучения нескольких слабых классификаторов, что является более точным, чем один классификатор. В процессе программирования операторов, изменяется количество слабых классификаторов для непрерывного обучения и тестирования. Использование слабых классификаторов, позволяет сбалансировать ошибки, так как, если использовать сильный классификатор, то он окажет серьезное влияние и такое отклонение приведет к тому, что другие классификаторы не смогут выполнять операции классификации, так что ансамблевое обучение потеряет свой смысл.

В исследовании для создания модели машинного обучения использован набор инструментов AdaBoost, который является алгоритмом повышения [6]. Алгоритм повышения – это алгоритм, который используется для построения функции прогнозирования различных возможностей получения ложных результатов, главной ролью которого является повышение точности слабых алгоритмов классификации. Использование слабых классификаторов ограничивает точность оценки результатов. Однако, если объединить для работы определенное количество слабых классификаторов, узнаваемость результатов будет значительно улучшена, и результаты будут определены с заданной точностью.

Построение базового классификатора происходит в процессе обучения данными, наблюдением за частотой появления неисправностей, а далее изменяя количество слабых классификаторов и переходя на следующий этап обучения, пока точность не достигнет заданного значения. Разъяснение процесса построения модели машинного обучения через ансамблевое обучение AdaBoost и алгоритм его работы приведены на рис. 3 и 4.

AdaBoost предусматривает следующий порядок выбора параметров и формул расчета, который можно корректировать [7]:

1. Выбор слабых классификаторов.
2. Получение необходимого количества слабых классификаторов за счет ошибок.
3. Расчет веса выборки обучающих данных.
4. Объединение слабых классификаторов.
5. Определение количества итераций.
6. Определение порога выбора для формирования функции потерь.

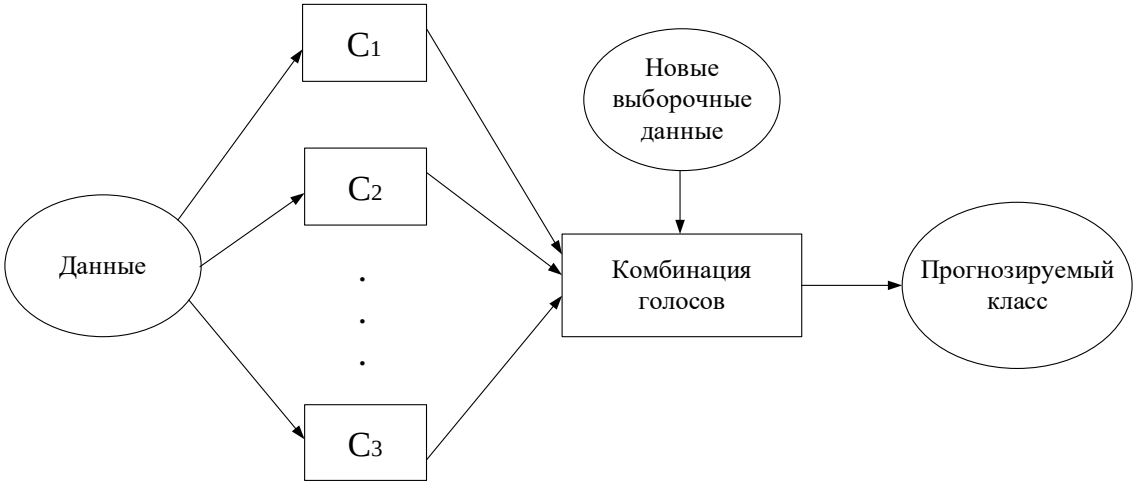


Рисунок 3 – Схема классификации ансамблевого обучения AdaBoost

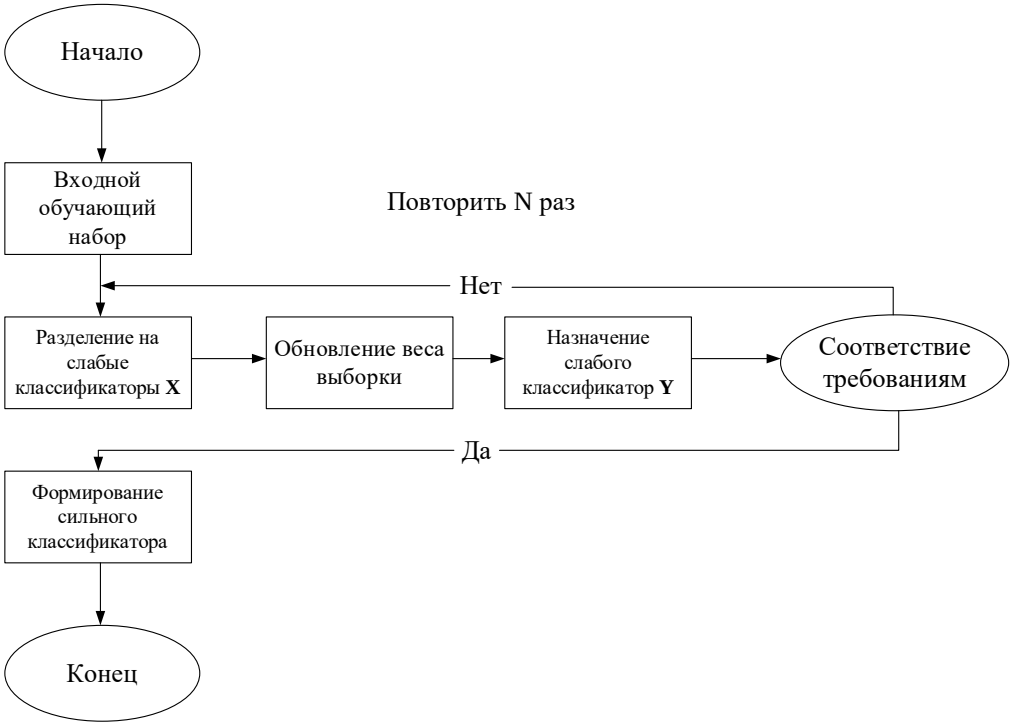


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма AdaBoost

Таким образом, создается новый сценарий и программирование продолжается в нем по той же схеме, а далее происходит извлечение значений функций. Затем вносятся 70 из 100 наборов данных в модуль интегрированного алгоритма обучения. Остальные 30 наборов данных переносятся в интегрированный обучающий модуль для тестирования, при достижении необходимой точности определения неисправности происходит их анализ и реализация интерпретации результатов [8].

В работе выполнен анализ точности выявления ошибок алгоритма ансамблевого обучения в зависимости от количества слабых классификаторов. Результаты анализа приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты анализа ошибок алгоритма ансамблевого обучения

Количество слабых классификаторов	10	20	50	70	100	500	**1000**	2000
Точность диагностики неисправностей, %	70	86,7	90	90	90	90	**93,3**	93,3

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Наиболее высокий уровень точности диагностики соответствует является большему количеству слабых классификаторов (1000 и более).
2. Снижение количества классификаторов понижает точность диагностирования, что вызывает риск невыявления неисправности.
3. Повышение количества классификаторов сверх определенного значения не оказывает существенного влияния на точность диагностирования. При этом снижается скорость вычислений. Оптимальное количество слабых классификаторов следует устанавливать таким образом, чтобы функционирование разработанной модели машинного обучения соответствовало критериям достаточной точности и быстродействия.

Список использованных источников

1. Бузмакова Л.В., Власьевский С.В., Овсейчик С.З. Методика диагностирования выпрямительно-инверторных преобразователей электровозов переменного тока // Электротехника. 2016. № 2. С. 24-27.
2. Бузмакова Л.В., Буняева Е.В., Усенко Е.В. Алгоритм обработки признаков неисправности для автоматизированной системы диагностирования силовых преобразователей электровозов переменного тока // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2017. Т. 2. С. 350-352.
3. Gou, B., Ge, X., Wang, S., Feng, X., Kuo, J. B., & Habetler, T. G. An open-switch fault diagnosis method for single-phase PWM rectifier using a model-based approach in high-speed railway electrical traction drive system // IEEE Trans. Power Electronics, 31, 2016. P. 3816–3826.
4. Huang, G., & Huang, G. B. Trends in extreme learning machine: A review // Neural Netw, 61, 2015. P. 32–48.
5. Xia, Y., Gou, B. & Xu, Y. A new ensemble-based classifier for IGBT open-circuit fault diagnosis in three-phase PWM converter // Prot Control Mod Power Syst 3, 2018. P. 33.
6. Ke G., et al. LightGBM: A Highly Efficient Gradient Boosting Decision Tree // Advances in Neural Information Processing Systems 30 (NIPS 2017), 2017.
7. Raschka S., Mirjalili V. Python machine learning: Machine learning and deep learning with Python, scikit-learn, and TensorFlow 2 // Packt Publishing Ltd., 2019, P. 770.
8. Ян С., Малышева О.А. Исследование неисправностей преобразователя электровоза на основе ансамблевого обучения // Наука настоящего и будущего. 2024. Т. 3. С. 257-259.

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС., г. Хабаровск), кафедра «Электротехника, электроника и электромеханика»

Малышева Ольга Александровна: к.т.н., доцент.
Синьюй Ян : магистрант.
Ковалев Владимир Александрович: к.т.н., доцент.
Бузмакова Лилия Витальевна: к.т.н., доцент.

УДК:629.423.1 ГРНТИ 73.29.41

О. В. Мельниченко, А. В. Коновалов, А. О. Линьков, А. Ю. Портной

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ IGBT-МОДУЛЕЙ ТЕХНОЛОГИИ PRESS-PACK ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Аннотация. *В условиях постоянного увеличения грузооборота и соответствующего роста нагрузки на железнодорожную инфраструктуру и подвижной состав актуальна разработка энергоэффективного выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП) для электровозов переменного тока на базе IGBT-транзисторах. В данной статье рассматривается моделирование механических напряжений, возникающих при установке IGBT-модуля в охладители, с использованием двух подходов к зажиму: первый — создание нагрузки сверху и снизу с помощью «конусов», второй — соединение с помощью четырёх шпилек по периметру для сжатия конструкции до заданного усилия. Проведенное моделирование позволяет вычислить механические напряжения для каждого из способов. Особое внимание уделено неравномерному зажиму, который может привести к концентрации механических напряжений и, как следствие, к повреждению модуля. Механические повреждения модулей зачастую возникают в результате нарушения технологии монтажа, что как правило повлечёт за собой трещины, необратимые разрушения в полупроводниковых кристаллах из-за значительного механического воздействия.*

Ключевые слова: *IGBT-транзистор, моделирование, метод конечных элементов, электровозы, преобразователь*

Актуальность проблемы. В настоящее время электровозы переменного тока обеспечивают высокие показатели грузооборота. По железнодорожным магистралям Восточного полигона в 2021 году его величина составляла 144 млн т [1], уже в 2022 году он находился на отметке 158 млн т [2], и, согласно долгосрочной программе развития ОАО «РЖД», уже в 2025 году грузооборот должен достигнуть показателя 180 млн т [3]. Для повышения провозных способностей выполняются различные мероприятия, например: наращивают тяжеловесное движение, повышая массу поездов до 6300 и 7100 т [4]; увеличивают пропускные способности, организовывая движение соединённых поездов или по технологии «Виртуальная сцепка» [5]. Однако наряду с комплексом проводимых мероприятий для увеличения грузооборота остаётся актуальной проблема Восточного полигона – ограниченная пропускная способность железнодорожной инфраструктуры. Современные требования к надежности и безопасности конструкций в области локомотивостроения подчеркивают актуальность моделирования статических и динамических характеристик различных элементов тягового подвижного состава.

Новыми элементами, требующими моделирование, являются IGBT-модули, которые могут применятся как в коллекторном электроприводе [7], так и в асинхронном [8]. Одной из задач, которые возникают при конструировании преобразователей, является система зажима модулей в охладителе, которая должна обеспечивать равномерность и хороший контакт.

IGBT-модуль имеет паяные соединения между полупроводниковыми кристаллами, платами и основанием. В связи с этим значительное механическое воздействие на корпус или основание модуля может привести к появлению трещин в кристаллах транзисторов

и диодов. Особенно опасны концентрированные удары по основанию модуля и по охладителю с закрепленными на нем модулями. Ударная волна передается от охладителя на основание, в результате чего создаются условия для появления трещин в кристаллах и платах модуля. [6]. Характер разрушения IGBT-модулей представлен на рисунке 1.

Рисунок 1 – Разрушения IGBT-модулей

На рисунке 2 представлены различные радиаторы охлаждения для IGBT-модулей.

Рисунок 2 – Радиаторы охлаждения для IGBT-модулей

Целью работы является моделирование механических напряжений с целью обеспечения их равномерности внутри Press Pack IGBT-модуля.

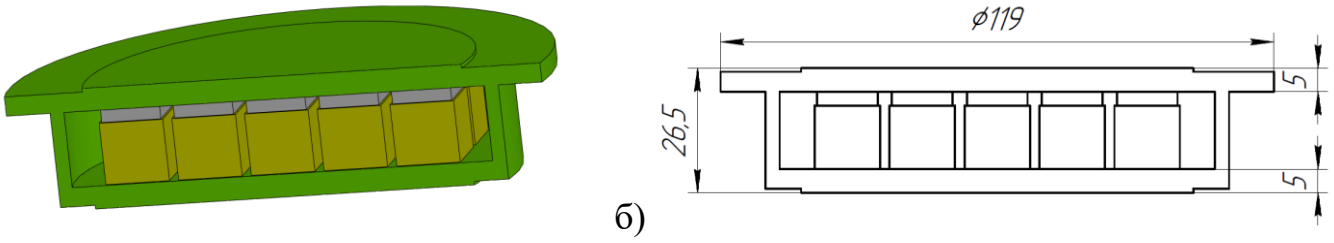
Одна из конструкций IGBT-модуля широко используется в тяжелых условиях, например, на железнодорожном транспорте, является Press Pack конструкция. На рисунке 3 представлена упрощенная модель Press Pack IGBT-модуля.

Для исследования механических напряжений внутри такого модуля используется метод конечных элементов, конечно-элементный анализ, представляющий собой численный метод приближенного решения краевых (граничных) задач, имеющих место в технике и математической физике [9-12].

Метод конечных элементов широко применяется сегодня при моделировании внутренних процессов, включающих процессы механических напряжений. Этот метод позволяет детально анализировать поведение конструкций под воздействием различных внешних факторов и физических процессов, возникающих в реальных условиях эксплуатации. В сочетании с современными вычислительными мощностями и программным обеспечением, метод конечных элементов открывает возможности для оптимизации конструкций при их проектировании, увеличивая их работоспособность, надежность и долговечность.

Моделирование проводилось в программной среде «Femap». Для дискретизации трехмерного пространства могут использоваться различные типы конечных элементов, наиболее простым из которых является четырехузловой тетраэдрический элемент [13-15]. При моделировании использовалась тетраэдэрная сетка с изменяемым шагом, для оценки точности моделирования.

На рисунке 4 и 5 приведены габаритные размеры, задаваемая нагрузка и места закрепления к земле IGBT-модуля.



а) б)

Рисунок 3 – Упрощенная модель Press Pack IGBT-модуля: а. IGBT-модуль в разрезе, б. габариты IGBT-модуля

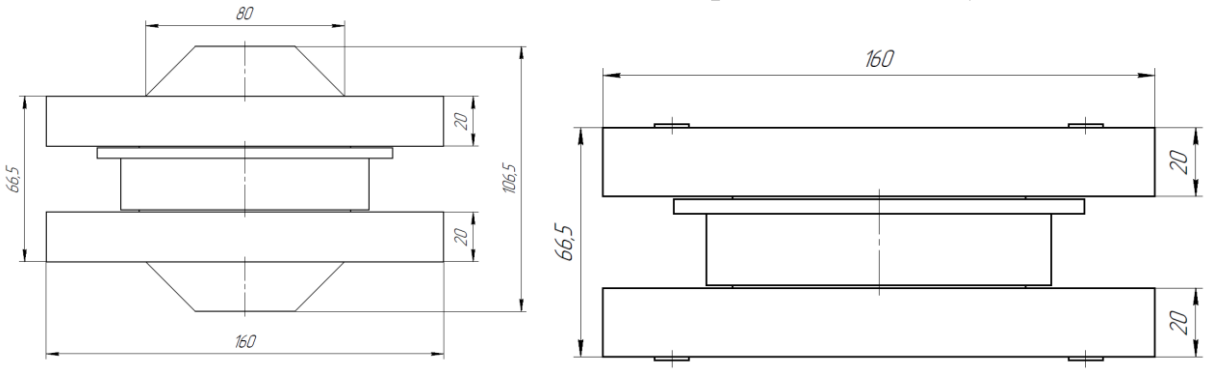


Рисунок 4 – Габаритные размеры IGBT-модуля

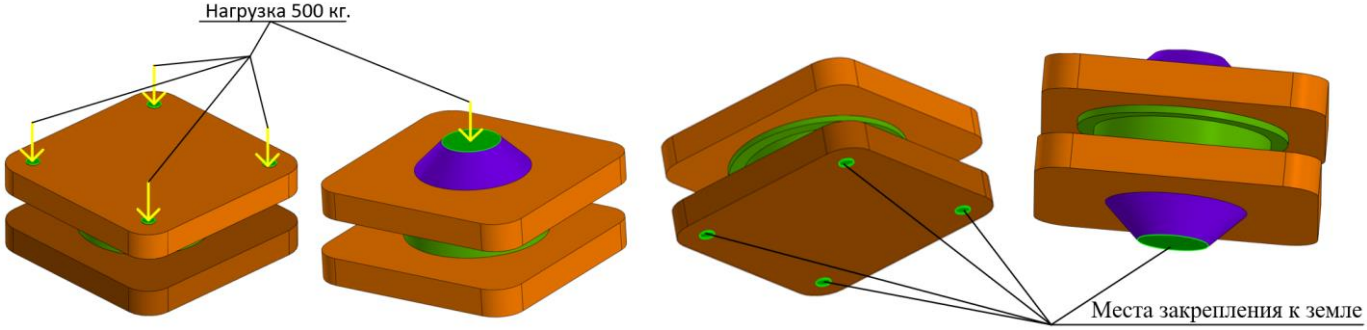


Рисунок 5 – Задаваемая нагрузка и места закрепления к земле IGBT-модуля

Закрепление объекта математической модели в пространстве выполнено с помощью функции «Constraints» (ограничения). Эта функция позволяет установить фиксированные точки или границы, которые не подвержены перемещению, что обеспечивает стабильность и надежность результатов моделирования. Используя функцию «Constraints», задаются жесткие связи для определенных узлов или элементов модели, фиксируя их в заданных координатах.

Сложные узлы и элементы на расчетной модели приводят к несоответствиям в наложении сетки, что, в свою очередь, вызывает концентрацию напряжений и деформаций в переходных сопряжениях. Это отрицательно сказывается на точности расчетов. Упрощение геометрии модели позволяет решить данную проблему, позволяя эффективно разбить модель на элементы с одинаковыми размерами и формой, что минимизирует погрешности вычислений и обеспечивает точность расчетов.

Сеточный шаг играет важную роль в точности и качестве модели. При проведении моделирования была выбрана величина сеточного шага, равная 2 мм. Пространство, в котором происходит моделирование, разбито на небольшие ячейки размером 2 мм.

Когда шаг сетки меньше, например, 1 мм, повышается детализация модели, но одновременно увеличивается вычислительная нагрузка. С другой стороны, сеточный шаг больше, чем 2 мм, может привести к потере достоверности результатов. Такой подход обеспечивает достаточную детализацию, чтобы точно отразить физические процессы, происходящие в модели, и в то же время позволяет эффективно использовать вычислительные мощности.

В процессе моделирования была проведена оценка двух различных способов прижатия IGBT-модуля. В первом варианте, где используется прижим, основанный на четырех шпильках (рисунок 6), удалось добиться максимально-равномерного распределения давления на модуль, при этом погрешность составила не более 23%. Это означает, что все его компоненты, благодаря такому зажиму, прижимаются к IGBT-модулю с одинаковой силой. В результате этого создаются оптимальные условия для работы модуля, что положительно сказывается на его эффективности и долговечности.

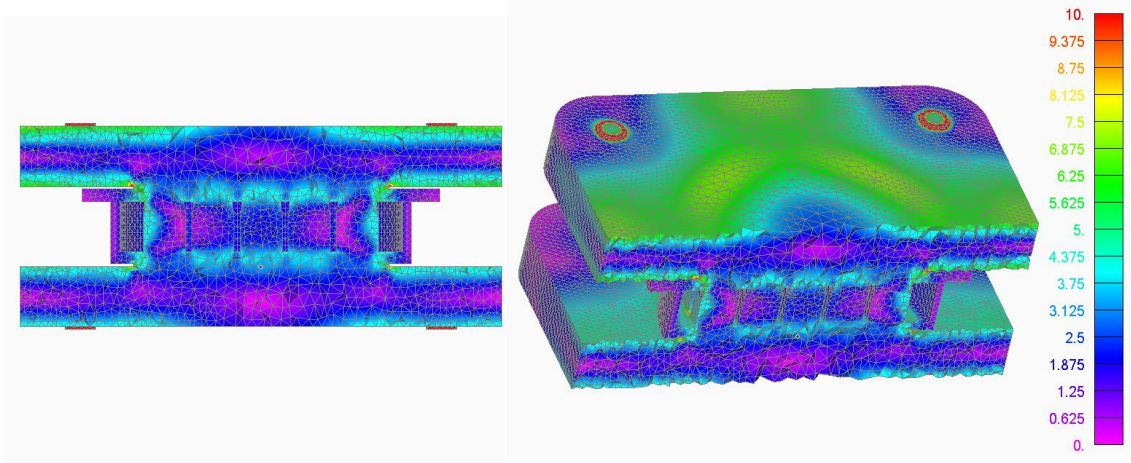


Рисунок 6 – Первый вариант прижима с помощью четырёх шпилек

Во втором варианте, при использовании конусного прижима (рисунок 7), наблюдается, что нагрузка на IGBT-модуль распределяется неравномерно. В результате этого наблюдается значительная погрешность, которая составляет 48%. Это может привести к тому, что некоторые участки модуля будут подвергаться большему давлению, чем другие, что в конечном итоге может негативно сказаться на его работе и надёжности.

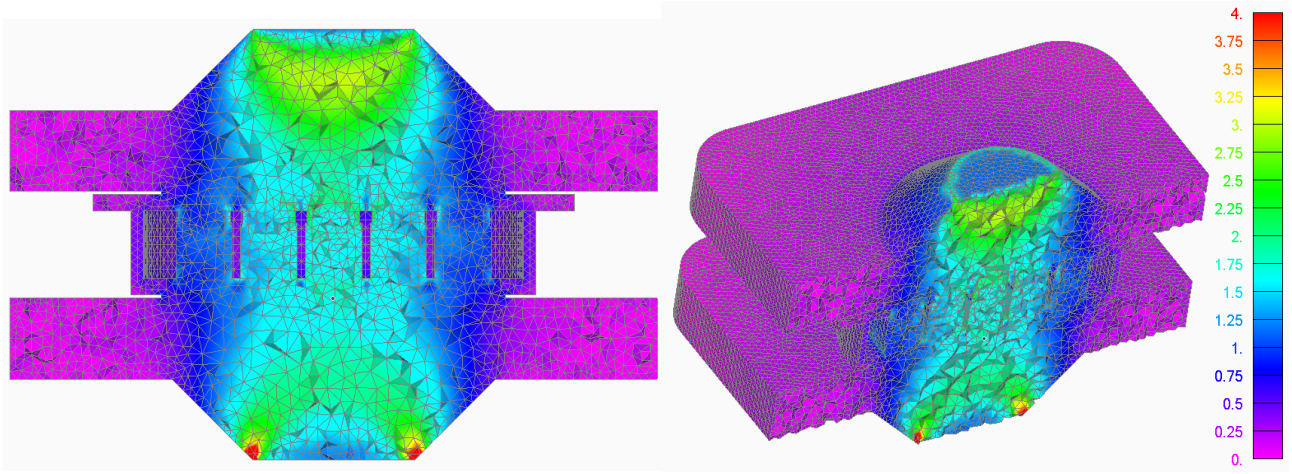


Рисунок 7 – Второй вариант прижима с помощью конуса

Таким образом, результаты моделирования подчеркивают преимущества первого способа прижима, который обеспечивает равномерное прижатие IGBT-модуля.

Заключение. В данной работе было проведено моделирование механических напряжений на IGBT-модули. Исследование подчеркнуло критическую важность методов прижима модуля, так как качество этого процесса напрямую влияет на его надежную работу и долговечность. Результаты анализа показали, что для достижения высоконадежных результатов моделирования необходимо обеспечить максимально равномерный прижим. Неравномерный прижим способен привести к концентрации механических напряжений, что может вызвать повреждение модуля и снизить его эффективность.

Работа вносит вклад в разработку современных и инновационных подходов к исследованию, проектированию и повышению надежности электрооборудования электровозов.

Библиографический список

1. Якушева, А. Рационализировать перевозки / А. Якушева // Гудок: [сайт]. – 2022. – № 168. – 17 сент. –URL: https://www.gudok.ru/newspaper/?ID=1614134 (дата обращения: 12.10.2023). – Текст: электронный.

2. Восточный полигон – Транссиб и БАМ. Итоги развития в 2013-2022 гг. // ОАО «РЖД»: официальный сайт, 2023. – URL: https://cargo.rzd.ru/ru/9787/page/103290?id=19721 (дата обращения: 12.10.2023). – Текст: электронный.

3. Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги»: Утв. Указом Президента Российской Федерации № 466р от 07 мая 2018 г. / Правительство Российской Федерации. – Москва, 2019. – 135 с. – Текст: непосредственный.

4. Якушева, А. Вектор развития / А. Якушева. // Гудок: [сайт]. – 2022. – № 238. – 22 дек. – URL: https://www.gudok.ru/newspaper/?ID=1622858 (дата обращения: 12.10.2023). – Текст: электронный.

5. Оценка энергетической эффективности электровозов 3ЭС5К при использовании технологии интервального регулирования движения по типу «виртуальная сцепка» / С. В. Власьевский [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. – 2020. – Т. 79. – № 1. – С. 17-25. 6. Алексей Бормотов, Валентин Мартыненко, Вячеслав Мускатиньев «Некоторые вопросы эксплуатации IGBT-модулей»; Компоненты и технологии, №5 2005 г.

6. Алексей Бормотов, Валентин Мартыненко, Вячеслав Мускатиньев «Некоторые вопросы эксплуатации IGBT-модулей»; Компоненты и технологии, №5 2005 г.

7. Власьевский С. В., Малышева О. А., Грибенюк Д. В. Сравнительные возможности применения на электровозах переменного тока коллекторного и асинхронного привода // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2017. № 1. С 9-20. ISSN 2227-1384. EDN: ZQXRHB

8. Электровоз грузовой постоянного тока 2ЭС10 с асинхронными тяговыми электродвигателями. Руководство по эксплуатации. [Текст] - 2011.

9. Каменев, С.В. Основы метода конечных элементов в инженерных приложениях. Учебное пособие. – Оренбург: ОГУ, 2019. – 110 с.

10. Зенкевич, О.К. Метод конечных элементов в технике: Пер. с англ. / О.К. Зенкевич; под ред. Б.Е. Победри. — М.: Мир, 1975. — 541 с.: ил.; 22 см. — Библиогр.: с. 7–25, 28–29.

11. Метод конечных элементов / М. Секулович; Перевод с серб. Ю. Н. Зуева; Под ред. В. Ш. Барбакадзе. – М.: Стройиздат, 1993. – 660 с

12. Ашейчик, А. А. Расчет деталей машин методом конечных элементов / А. А. Ашейчик, В. Л. Полонский. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2016. – 243 с.

13. Рычков, С.П. Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran. — М.: ДМК Пресс, 2013. — 784 с.: ил. ISBN 978-5-94074-638-6.

14. Рычков С.П. MSC.visual NASTRAN для Windows / Рычков С.П. – М.: НТ Пресс, 2004. – 552 с.: ил. (Проектирование и моделирование).

15. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC NASTRAN for Windows / ДМК Пресс, 2003. – 448 с.: ил. (ISBN 5-94074-028-6).

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

Мельниченко Олег Валерьевич: д.т.н., заведующий каф. "ЭПС".

Коновалов Алексей Владимирович: аспирант каф. «ЭПС» **.**

Линьков Алексей Олегович: к.т.н., доцент, доцент каф. «ЭПС».

Портной Александр Юрьевич: д.ф-м.н, профессор каф. «ФМиП.

УДК **62-791.2**

К. В. Менакер

ПРИБОР ДЛЯ ПРОЗВОНКИ ЖИЛ СИГНАЛЬНЫХ КАБЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВОЗОВ НА ОСНОВЕ ОДНОПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ КОНТРОЛЬНОГО СИГНАЛА

Аннотация: *В процессе эксплуатации на электровозах состояние сигнальных кабелей постепенно ухудшается, что зачастую приводит к отказам отдельных подсистем. Поиск подобного рода отказов осложняется сложной конфигурацией прокладки кабельных сетей и подключенным состоянием проводников. Разработанный прибор на основе однопроводной передачи контрольного сигнала позволяет в короткие сроки локализовать повреждения жил сигнальных кабелей, связанные с их обрывом и коротким замыканием.*

Ключевые слова: *прибор, кабель, проводник, жила, сигнал, обрыв, короткое замыкание, отказ, электровоз*

Однопроводной способ передачи электрической энергии обосновал и реализовал Никола Тесла в 1902 году (Заявка на патент «Устройство для передачи электрической энергии»). В нашей стране исследования в данной области были начаты в 1956 году профессором В.К. Щербаковым и продолжены во Всероссийском НИИ электрификации сельского хозяйства (ВИЭСХ) [1]. Значительный вклад в развитие однопроводных систем электропередачи внесли российские ученые С. В. Авраменко и С. А. Герасимов [2-3].

На основе модифицированной диодной вилки Авраменко автором был предложен прибор по идентификации целостности жил нагруженного кабеля, который, в том числе, может быть успешно применен для поиска отказов в электроподвижном составе.

Упрощенная схема предлагаемого прибора представлена на рис. 1 и состоит:

- из генератора синусоидального сигнала регулируемой частоты, подключенного через разделительный трансформатор Т1 к измеряемому проводнику с произвольным омическим сопротивлением и индуктивностью;
- приемника гармонического сигнала, выполненного в виде модифицированной вилки Авраменко [4] с подключением на выходе гальванического трансформатора Т2 вместо конденсатора.

Анализ работы схемы с классической вилкой Авраменко показал, что при действии как положительной так и отрицательной полуволны гармонического сигнала происходит открытие одного из диодов D1 или D2. На втором диоде при этом действует обратное напряжение и небольшой обратный ток (выражение 1 и 2). Из-за разности токов на обкладках конденсатора возникает разность потенциалов и он заряжается по возрастающей ступенчато от каждой полуволны (рис. 2).

При наличии в схеме вместо конденсатора индуктивности первичной обмотки гальванического трансформатора Т2 на обмотке действует напряжение в форме двухполупериодного сигнала (рис. 3). По частоте и амплитуде этого сигнала и осуществляется идентификация прозваниваемого проводника и вида неисправности.

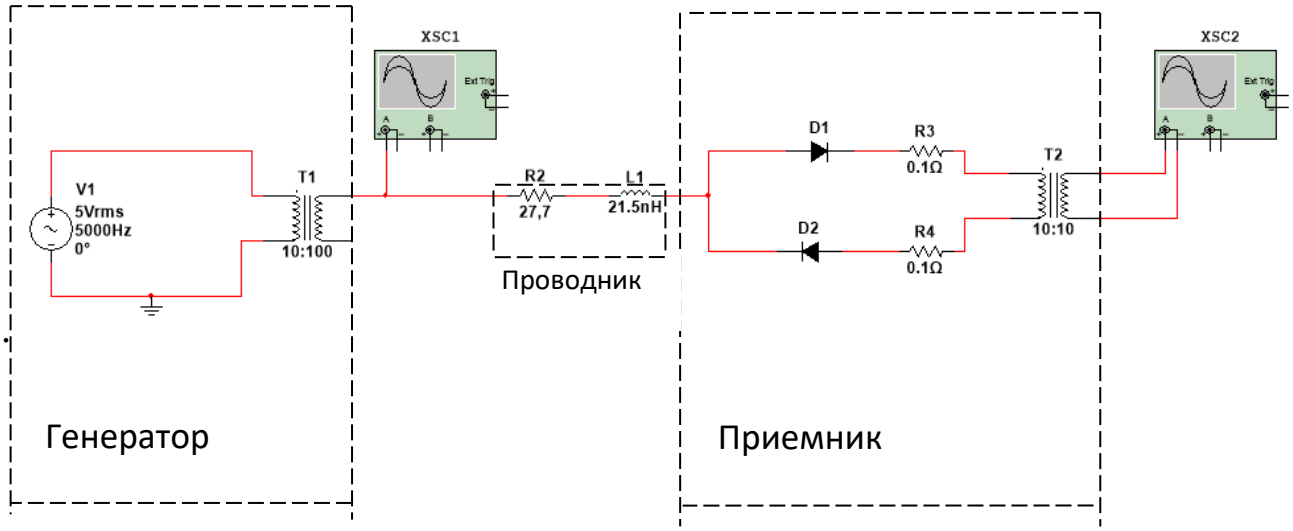


Рис. 1. Упрощенная схема прибора для прозвонки жил сигнальных кабелей

Следует отметить, что автоподстройкой частоты контрольного сигнала генератора удается оптимизировать режим прозвонки проводника в зависимости от его длины.

$$u_{c11} = \frac{1}{C_1}\int_{-T/4}^{T/4}\left[i_{dp1}(t) - i_{dp2}(t)\right]dt = \frac{1}{C_1}\int_{-T/4}^{T/4} i_{dp1}(t)dt - \frac{1}{C_1}\int_{-T/4}^{T/4} i_{dp2}(t)dt =$$

$$= \frac{1}{C_1}\int_{-T/4}^{T/4}\left[\frac{2}{\pi}\cdot I_{d1pm}\cdot\left(\frac{1}{2} + \frac{\pi}{4}\cdot\cos(\omega t) + \frac{1}{3}\cdot\cos(2\omega t) - \frac{1}{15}\cdot\cos(4\omega t)\right)\right]\cdot dt - (1)$$

$$-\frac{1}{C_1}\int_{-T/4}^{T/4}\left[\frac{2}{\pi}\cdot I_{d2pm}\cdot\left(\frac{1}{2} + \frac{\pi}{4}\cdot\cos(\omega t) + \frac{1}{3}\cdot\cos(2\omega t) - \frac{1}{15}\cdot\cos(4\omega t)\right)\right]\cdot dt$$

$$u_{c12} = u_{c11} + \frac{1}{C_1}\int_{-T/4}^{T/4}\left[i_{do2}(t) - i_{do1}(t)\right]dt =$$

$$= u_{c11} + \frac{1}{C_1}\int_{-T/4}^{T/4} i_{do2}(t)dt - \frac{1}{C_1}\int_{-T/4}^{T/4} i_{do1}(t)dt = u_{c11} +$$

$$+ \frac{1}{C_1}\int_{-T/4}^{T/4}\left[\frac{2}{\pi}\cdot I_{d2om}\cdot\left(\frac{1}{2} + \frac{\pi}{4}\cdot\cos(\omega t) + \frac{1}{3}\cdot\cos(2\omega t) - \frac{1}{15}\cdot\cos(4\omega t)\right)\right]\cdot dt - (2)$$

$$-\frac{1}{C_1}\int_{-\frac{T}{4}}^{\frac{T}{4}}\left[\frac{2}{\pi}\cdot I_{d1om}\cdot\left(\frac{1}{2} + \frac{\pi}{4}\cdot\cos(\omega t) + \frac{1}{3}\cdot\cos(2\omega t) - \frac{1}{15}\cdot\cos(4\omega t)\right)\right]\cdot dt$$

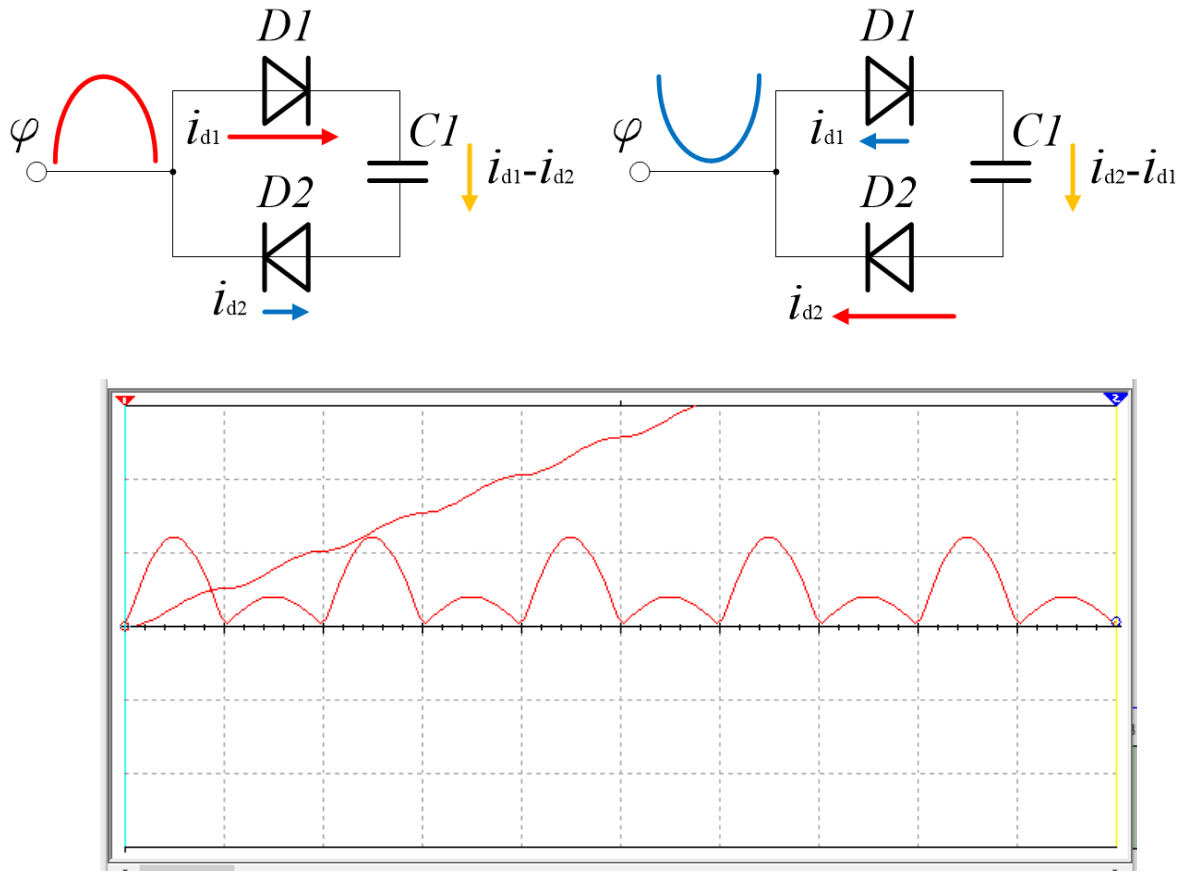


Рис. 2. Направления токов на диодах вилки Авраменко в зависимости от полярности напряжения. Осциллограмма изменения напряжения на емкости C1

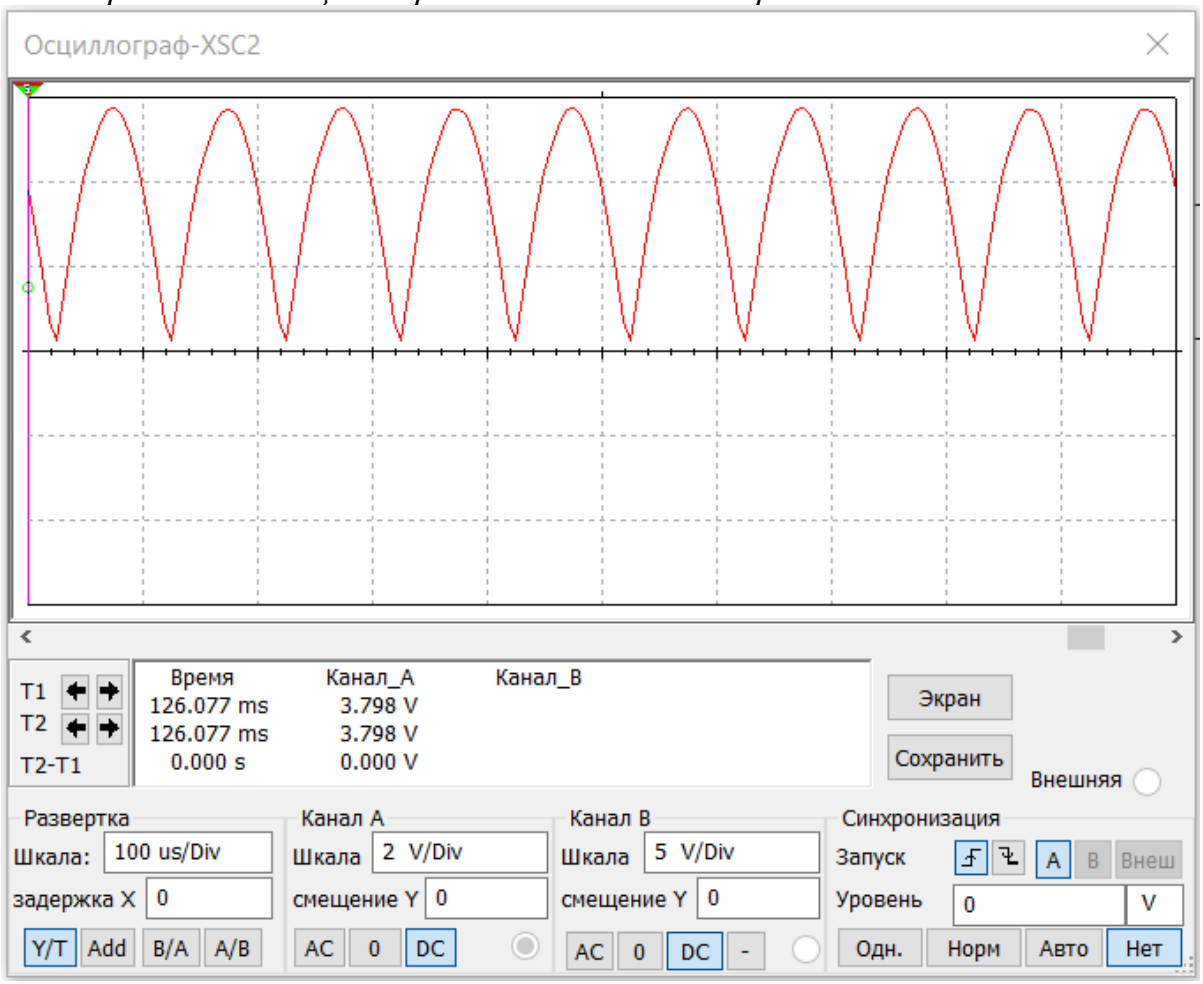


Рис. 3 Осциллограмма напряжения на первичной обмотке трансформатора T2

Измерительный прибор был изготовлен в виде опытного образца, прошел предварительные испытания, ведется его доработка. Предложенная схема показала отличные результаты как при поиске отказов в устройствах автоматики и связи, так и электроподвижного состава.

Список использованных источников

1. Алиев, И. И. Резонансная однопроводниковая линия электропередачи / И. И. Алиев, Д. С. Стребков // Электричество. – 2011. – № 10. – С. 56-60. – EDN OEYNVX.
2. Авраменко С.В. Способ питания электротехнических устройств и устройство для его осуществления // Патент 2108649 C1 RU. Бюлл. изобр. 1998. № 10. С. 319.
3. Герасимов, С. А. Однопроводная передача электрической энергии: расчет и эксперимент / С. А. Герасимов // Современные наукоемкие технологии. – 2011. – № 4. – С. 28-31. – EDN NXPXZF.
4. Менакер, К. В. Разработка устройства бесконтактной идентификации жил нагруженного кабеля / К. В. Менакер, А. Ю. Данилова, Д. Д. Спирин // Образование - наука - производство : Материалы VIII Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции, Чита, 22 ноября 2024 года. – Чита: Иркутский государственный университет путей сообщения, 2024. – С. 314-320. – EDN ABMKCV.

Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал ИрГУПС, г. Чита

Менакер Константин Владимирович: к.т.н., доцент кафедры «Электроснабжение»

УДК [62-192+692.488+681.518.5] ГРНТИ 73.29.41

А. К. Пляскин, А. А. Потапов

К ВОПРОСУ ОБ ОЦЕНКЕ СОВОКУПНОГО (ИНТЕГРАЛЬНОГО) СОСТОЯНИЯ ЛОКОМОТИВА

Аннотация. *В эксплуатации локомотивов участвует большое количество персонала, в их числе поездные и локомотивные диспетчеры. В отличие от других участников процесса эксплуатации (машинисты, персонал ТОиР) они не пользуются специальными средствами (матаппарат, оборудование) для оценки состояния локомотивов, хотя именно от решения диспетчеров зависит постановка локомотива в состав того или иного поезда. Рассмотрены несколько видов математических моделей для интегральной (совокупной) оценки состояния отдельного локомотива, уже применяемые или пригодные для данной цели. Сделан вывод о возможности развития применения отдельных моделей, или их синтеза, или применения агрегированного подхода к их использованию для интегральной оценки технического состояния локомотива.*

Ключевые слова: *техническое состояние, интегральная оценка, надёжность, безотказная работа, локомотив, поездной диспетчер, математическая модель.*

Эксплуатация локомотива и их парка требует участия большого количества персонала. Их краткая характеристика представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Участники процесса эксплуатации локомотива

Участник	Цель
Диспетчерский аппарат	Управление движением, обеспечение безопасности перевозок
Дирекция тяги	Управление парком в целом, обеспечение заявок на тягу
Эксплуатационные локомотивные депо	Управление, обслуживание и контроль работоспособности локомотива непосредственно в движении
Службы ТОиР (сервис)	Повышение коэффициента готовности локомотива

В зависимости от стороны отличаются методы, используемые ими для управления парком и для влияния на техническое состояние локомотива. Если для сервиса, эксплуатации и управленческого персонала дирекций применяется множество инструментов (в т. ч. математический аппарат), то диспетчерский аппарат Дорожных центров управления перевозками (ДЦУП) в своей работе преимущественно полагается на экспертность и доклады нижестоящих участников процесса управления (машинисты, ДСП, дежурные по депо и т.д.).

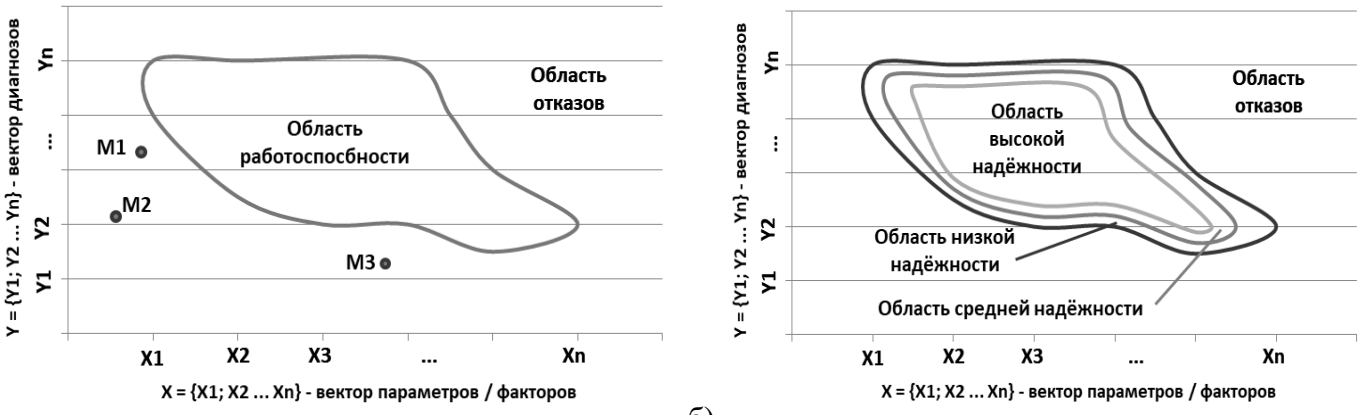
Очевидно, что методы и средства оценки состояния локомотивов, в т.ч. на базе бортовых микропроцессорных систем (диагностические и тревожные сообщения для машинистов) или автоматизированных рабочих мест (АРМ) диагностов в депо, имеют ограниченную применимость для диспетчеров ввиду разного характера работы, в том числе из-за необходимости непрерывного и оперативного принятия решений со стороны диспетчеров о возможности постановки того или иного локомотива под поезд.

Диспетчеров интересует состояние отдельного локомотива, а не их парка или отдельных узлов. Приведем уровни определения состояния локомотива в таблице 2.

Таблица 2 – Уровни определения и оценки технического состояния локомотива

Уровень	Методы оценки состояния	Участники процесса
Отдельный узел, система локомотива	Экспертные методы оценки (визуальный, инструментальный контроль), статистическая оценка, испытания, контроль данных со стороны МСУ	Ремонтный персонал депо, мастера станций реостатных испытаний, ТЧД, ТЧМ
Отдельный локомотив	Экспертные методы оценки, статистическая оценка, испытания, контроль данных со стороны МСУ или АСУ	Ремонтный персонал депо, мастера станций реостатных испытаний, ТЧМ, ТЧД, ДСП, ТНЦ, ДНЦ, ТЧЭ, ТЧР, Т, Д
Парк локомотивов	Статистические методы (оценка срока эксплуатации, пробега, числа отказов по парку и т.д.), контроль со стороны АСУ	ДНЦ, ТНЦ, ТЧД, ТЧЭ, ТЧР, Т, Д

На рисунке 1а представлены области работоспособности и области отказов технической системы относительно пространства параметров и соответствующих им диагнозов. Точками М1, М2, М3 представлен пример отказных состояний отдельных категорий оборудования, характеризуемого неким набором параметров. В настоящее время имеется большой массив данных о параметрах, характеризующих нахождение отдельных видов узлов и деталей в областях работоспособности и отказов (множество точек $M_1 \div M_N$). В то же время возникают вопросы о способах разделения области работоспособности на условные зоны различной надёжности (рисунок 2б) и об оперативных способах такой оценки, применимых, например, со стороны диспетчерского аппарата. Основная цель такой оценки со стороны диспетчера – поставить под поезд критической массы надёжный локомотив и тем самым минимизировать вероятность отказа локомотива в пути следования в данной поездке.



а) б)

Рисунок 1 – а) Области работоспособности и отказов;
б) Разделение области работоспособности по степени надёжности

Какие методы и средства оценки состояния локомотивов применимы именно для диспетчерского аппарата для достижения данной цели? Уровень повреждаемости локомотива – интегральный параметр, отражающий действие всей совокупности различных эксплуатационно-ремонтных условий и факторов: серийной структуры парка,

параметров участков его обращения, спектра масс поездов, соотношения объёмов грузовой, пассажирской работы и т.д. [1].

Всё возрастающий объём информации о состоянии локомотива затрудняет оценку его общего состояния и принятия решения на основе этого объёма. Часто приходится пользоваться только качественной оценкой технического состояния. Поэтому важное значение приобретает постановка и развитие методов автоматизированного решения задач качественной теории сложных систем [2].

Представляется возможным применить методы интегральной или совокупной, обобщённой оценки технического состояния [3].

Преимущества и недостатки таких методов приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Преимущества и недостатки методов интегральной оценки [3, 4]

Преимущества	Недостатки
Минимизация ошибок I и II родов	Сложность разработки модели
Обобщение имеющихся данных по состоянию технического объекта	Отсутствие учёта отдельных значимых данных вне модели
Сокращение времени на принятие управленческого решения за счёт упрощения оценки	Потеря точности в оценке
Ранжирование технических объектов по состоянию	

Отметим, что применение методов интегральной оценки не исключает уже используемых методов оценки технического состояния, а только дополняет их.

Общий подход к оценке ресурса (состояния) технических систем железнодорожного транспорта изложен в стандарте ГОСТ Р 57445-2017 и состоит из следующих этапов: общий анализ состояния технической системы, категорирование и декомпозиция объекта, выбор метода определения ресурса, анализ повреждающих факторов и механизмов повреждения, расчётно-экспериментальное определение ресурса, принятие решения [5].

Рассмотрим возможные методы интегральной оценки [1].

1. Для оценки состояния локомотива (или их парка) традиционно используются показатели надёжности, такие как средний пробег до отказа, интенсивность отказов, коэффициент готовности, коэффициент оперативной готовности, определяемые по формулам (1-4):

$$L_1 = \frac{\sum_{i=1}^{N} l_i}{\sum_{i=1}^{N} r_i}, \text{км}, \quad (1)$$

$$\lambda(\Delta l) = \frac{r(\Delta l)}{N_{\text{ср}} \cdot \Delta l}, \frac{1}{\text{км}}, \quad (2)$$

$$K_{\Gamma} = \frac{T_1}{T_1 + T_2}, \quad (3)$$

$$K_{\text{ОГ}} = K_{\Gamma} \cdot p(t_{\text{ОГ}}), \quad (4)$$

где l_i – наработка до отказа за i-й период, км;

r_i – число отказов за i-й период;

$r(\Delta l)$ – число отказов за пробег Δl;

$N_{\text{ср}} = \frac{N(l)+N(l+\Delta l)}{2}$ – число исправно работавших локомотивов за пробег Δl;

T_1 – время работы локомотива, ч;

T_2 – время нахождения локомотива на ТОиР, ч [6];

$p(t_{0\text{Г}})$ – вероятность безотказной работы объекта в произвольно заданный момент времени $t_{0\text{Г}}$.

Данные показатели являются простыми в расчёте и обработке, универсальными для тепловозов и электровозов; в то же время они часто усредняют картину фактического положения дел по всему парку.

2. Вероятность отказа локомотива зависит от многих факторов, в числе которых его конструктивное исполнение, качество выполнения ТОиР, характер эксплуатации, величина пробега, качества регулирования и т.д.

Влияние каждого из факторов в отдельности на величину параметра потоков отказов ω невелико и для его выявления целесообразно использовать метод факторного анализа, результаты которого в общем случае представляются в следующем виде (5)

$$Y = k_1 X_1^a + k_2 X_1^b + \ldots + k_i X_i^o + \ldots + k_n X_n^z + C, \quad (5)$$

где a, b, o, z – показатели степени для параметров типа X_i;

C – свободный член уравнения;

k_i – коэффициент эластичности, характеризующий степень влияния каждого из факторных показателей на Y.

Пример формул для нескольких факторов приведём ниже. Фактор серийности, фактор длительности эксплуатации парка, фактор квалификации локомотивных бригад находятся по формулам (6 – 8):

$$x_{\text{серийность}} = \sum_1^I \omega_i \alpha_i, \quad (6)$$

$$x_{\text{срок эксплуатации}} = \left(\sum_1^N T_n\right)/N, \quad (7)$$

$$x_{\text{квалификации бригад}} = \left(\sum_1^E C_e\right)/E, \quad (8)$$

где ω_i – среднесетевое значение удельного числа отказов локомотивов i-й серии;

α_i – доля суммарного пробега локомотивов всех серий (I) на этой дороге;

T_n – длительность эксплуатации n-го локомотива, лет;

N – численность локомотивов по дороге;

C_e – стаж e-го машиниста;

E – число машинистов в штате дороги [1].

Итоговый показатель Y позволяет сравнивать между собой состояние отдельных локомотивов или парков на основе обобщённой оценки факторов.

Отметим, что метод факторного анализа близок по своему содержанию к методам индексной оценки технического состояния, который также базируется на определении

интегральной оценки с учётом влияния частных параметров с помощью весовых коэффициентов [4].

3. Метод Монте-Карло заключается в применении вместо аналитической модели, описывающей систему или процесс, вероятностной модели, достоверность которой аналогична или близка аналитической. При этом вероятностная модель может быть как проще (применяется для облегчения расчёта и использования вместо аналитической), так и сложнее аналитической (применяется для проверки её результатов).

Основные этапы метода – выбор математической модели, связывающей входные и выходные параметры; выбор распределения вероятностей для ключевых параметров модели; проведение имитации значений ключевых параметров модели; расчёт основных характеристик распределения исходных и выходных показателей.

4. Одним из наиболее популярных статистических методов является метод Байеса. Он заключается в определении вероятности диагноза D_i при наличии признака k_j или совокупности признаков $K^*(k_1^*, \dots, k_n^*)$. Для случая с определением вероятности диагноза D_i с простыми признаками k_j формула Байеса примет вид (9)

$$P\left(\frac{D_i}{k_j}\right) = P(D_i)\frac{P\left(\frac{k_j}{D_i}\right)}{P(k_j)}, \quad (9)$$

где $P(D_i) = \frac{N_i}{N}$ – вероятность проявления диагноза D_i;

N_i – число объектов с диагнозом D_i, N – число всех объектов;

$P(k_j) = \frac{N_j}{N}$ – вероятность проявления признака k_j;

N_j – число объектов с признаком k_j;

$P(k_j/D_i) = \frac{N_{ij}}{N_i}$ – вероятность проявления признака k_j у объектов с диагнозом D_i.

В большинстве задач принимают условие независимости признаков [7].

Решающим правилом является $P(D_i/k_j) \geq P_i$; при условии, что P_i – заранее выбранный уровень распознавания для диагноза D_i. Обычно $P_i \geq 0{,}9$. Также в качестве решающего правила может выступать $P(D_i/k_j) > P(D_c/k_j)$, где вероятность диагноза D_i больше вероятности диагноза D_c при параметре k_j.

Метод Байеса эффективно применяется для оценки технического состояния тех или иных систем, кроме того, часто используется бинарный признак – «нет неисправности» или «есть неисправность» (0 или 1 соответственно для простоты анализа) и их комбинации по различным узлам и подсистемам. При выборе определённого набора критических параметров возможно с заданной степенью точности определять состояние отдельных узлов и систем локомотива.

Частным случаем байесовских методов определения надёжности является метод Вальда – последовательная проверка соответствия параметров локомотива и его оборудования тому или иному состоянию. Его преимуществом является проверка только

части параметров и только ограниченное число раз – проверки выполняются до момента подтверждения того или иного состояния объекта [7].

5. Вероятность безотказной работы сложной технической системы может быть определена как произведение вероятностей безотказной работы отдельных подсистем (10)

$$P_{\text{с}} = P_{\text{пс1}} \cdot P_{\text{пс2}} \cdot \ldots \cdot P_{\text{пс}N}, \quad (10)$$

где $P_{\text{пс1}}$, $P_{\text{пс2}}$, … , $P_{\text{пс}N}$ – вероятность безотказной работы подсистем 1, 2, ..., N [3].

В данном случае определение вероятностей безотказной работы подсистем, агрегатов и т.д. является отдельной задачей. Отдельно отметим стандарт ГОСТ Р 27.013-2019, в котором приведен перечень возможных методов расчёта безотказности [8].

6. Весьма популярным инструментом для целей технической диагностики являются нейронные сети. Обычно применяют рекуррентные или последовательные нейронные сети. Последние используют одно- или многослойные; число нейронов во входном слое обычно определяют числом контролируемых показателей технического объекта, число нейронов в скрытом слое – по теореме Колмогорова в количестве до $(2n + 1)$,

где n – число показателей функционирования технического объекта, число нейронов выходного слоя – размерностью вектора ответа о состоянии объекта [9].

7. Марковские процессы характеризуют конечное число состояний технической системы, связанных друг с другом возможными переходами из одного в другое с заданной вероятностью. Марковские цепи используют для управления техническими системами, например, с целью корректировки ТОиР. Часто выделяют три состояния системы: исправное (P_1); неисправное, но работоспособное (P_2); неисправное и неработоспособное (P_3). Схему перехода из одного состояния в другое представим на рисунке 2. Каждый переход из одного состояния в другое характеризуется вероятностью перехода p_{ij}.

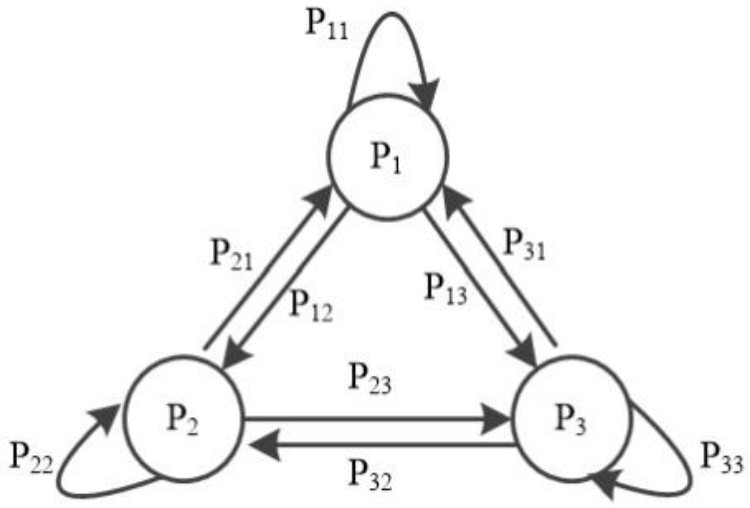


Рисунок 2 – Марковская цепь для трёх состояний (P_1, P_2, P_3) с переходами между ними (P_{11}, P_{12}, P_{13}, P_{21}, P_{22}, P_{23}, P_{31}, P_{32}, P_{33})

Для стационарного Марковского процесса (с неизменной вероятностью перехода между состояниями) матрица вероятностей перехода такова (11)

$$P(n) = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где n – число переходов между состояниями.

Для Марковских цепей первого порядка текущее состояние системы и вероятности перехода не зависят от предыдущих. При нестационарном Марковском процессе вероятность перехода вместо $p_{ij} = \text{const}$ представляется в виде $P(n) = p_{ij}(n)$ [10]. В работе [11] с помощью Марковской цепи предлагается оценивать вероятность перехода между исправным и неисправным состояниями оборудования локомотива на основе характеризующих его комбинации параметров $X = \{X_1; \ldots; X_n\}$. При изменении комбинации параметров изменяется вероятность перехода между состояниями.

8. Методы оценки энергоэффективности позволяют комплексно оценить реализацию локомотивом своего назначения и функционирование его оборудования в целом. Существует большое число методов, в том числе оценка по КПД, по производительности, по экологичности, на основе реостатных испытаний и т.д. В статье [12] авторы на основе существующих методик оценки энергоэффективности предлагают суперкритерий для оценки эффективности тепловозов с точки зрения производительности, КПД, экологичности, затрат на ТОиР и неплановые ремонты по формуле (12)

9.

$$W = \frac{A^2}{BH_{\text{и}}T} \cdot \frac{P_{\text{вы}}^{\text{эталон}}}{P_{\text{вы}}^{\text{факт}}} \cdot \frac{1}{P_{\text{ут}}^{\text{факт}}} \cdot \frac{1}{c_{\text{т}} + c_{\text{то,тр}} + c_{\text{нр}}}, \quad (12)$$

где A – работа тепловоза, МДж;

B – фактический расход топлива, кг;

$H_{\text{и}}$ – низшая теплотворная способность топлива, кДж/кг;

$P_{\text{вы}}^{\text{эталон}}$ – вред выхлопных газов, эталонный;

$P_{\text{вы}}^{\text{факт}}$ – вред выхлопных газов, фактический;

$P_{\text{ут}}^{\text{факт}}$ – вред утечек ГСМ на путь, фактический;

$c_{\text{т}}$ – стоимость топлива, потраченного за время T, руб.;

$c_{\text{то,тр}}$ – стоимость ТОиР за время T, руб.;

$c_{\text{нр}}$ – стоимость неплановых ремонтов, руб.

Для оценки интегрального технического состояния локомотива с целью постановки диспетчером в состав поезда с минимальной вероятностью отказа в движении могут быть использованы как одна из рассматриваемых математических моделей (таблица 4), так и иной вариант на базе их синтеза, применения разработанных на их базе суперкритериев (аналогично примеру в работе [12]), комбинации Марковских цепей с байесовскими методами (аналогично [11]), применении агрегированных классификаторов [9] или иных способов. Выбор предпочтительной модели является целью дальнейшей работы по данному направлению.

Таблица 4 – Краткий анализ математических моделей оценки тех. состояния

Тип модели	Требования к реализации	Недостатки
Факторный анализ	Определение ключевых параметров, весовых коэффициентов	Большая зависимость от выбора корректных факторов
Метод Монте-Карло	Выбор модели, соответствующей фактическому распределению	Точность
Байесовские методы	Выбор критических параметров и анализ всех их возможных комбинаций параметров	Трудоёмкость корректировки созданной модели при учёте новых данных; Недоучёт отдельных маловероятных событий
Вероятностно-статистические модели	Определение безотказной работы отдельных подсистем, узлов, деталей, выбор распределения, сбор статистики	Усредненность показателя применительно к отдельному локомотиву
Нейросетевые модели	Выбор достаточного количества параметров, проектирование сети, обучение сети	Необходима достаточная выборка обучающих данных
Марковские цепи	Разработка перечня состояний, условий перехода	Ограниченность исходными условиями
Оценка энергоэффективности	Сбор реальных эксплуатационных данных по конкретному локомотиву	Укрупнённость оценки без детализации

Список использованных источников

1. Обеспечение эксплуатационной надёжности локомотивов на этапах жизненного цикла. Сб. науч. тр. / под ред. А.Т. Осяева, А.Б. Подшивалова. М.: Интекст, 2006. – 159 с.

2. Бусленко Н.П. Лекции по теории сложных систем. М.: «Советское радио», 1973. – 440 с.

3. Астафьева, Т. Р. Интегральная оценка при контроле технического состояния объекта / Т. Р. Астафьева, Г. Я. Зверев // Автометрия. – 1968. - №4. – С. 24-28.

4. Богомолова, Ю. И. Интегральная оценка технического состояния трансформаторов. Ожидания и реальность / Ю. И. Богомолова, В. М. Левин // Борисовские чтения : Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Красноярск, 25–26 октября 2023 года. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2024. – С. 35-41. – EDN VPXRLP.

5. ГОСТ Р 57445-2017. Железнодорожные технические средства. Общие требования к методам определения ресурса [Электронный ресурс]. Техэксперт / URL: https://docs.cntd.ru/document/1200145087 (дата обращения: 16.02.2025 г.)

6. Кочерга, В.Г. Надежность тепловозов : учеб. пособие. Хабаровск: ДВГУПС, 2012. – 66 с.

7. Коньков, А. Ю. Теоретические основы технической диагностики : курс лекций. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2021. – 116 с. : ил.

8. ГОСТ Р 27.013-2019. «Надежность в технике. Методы оценки показателей безотказности» [Электронный ресурс]. База ГОСТ/СП/СНиП / URL: https://files.stroyinf.ru/Data/724/72402.pdf (дата обращения: 26.02.2025)

9. Жуков, Д. А. Разработка моделей, алгоритмов и программ диагностики функционирования технических объектов с использованием агрегированных классификаторов [Текст] : Дис. … канд. тех. наук: 05.13.18 / Д. А. Жуков – М., 2020. – 133 с.

10. Ховард, Р.А. Динамическое программирование и марковские процессы / Пер. с англ. В.В. Рыкова, под ред. Н.П. Бусленко. М.: Советское радио, 1964. – 189 с.

11. Буйносов, А. П. Развитие функциональных возможностей системы диагностики локомотивов / А. П. Буйносов, Д. Л. Худояров, И. А. Тюшев // Железнодорожный транспорт. – 2021. – № 2. – С. 60-63. – EDN ANAWBQ.

12. Кунат, Р. М. Современные подходы к оценке энергетической эффективности автономных локомотивов / Р. М. Кунат, А. Г. Силюта // Локомотивы. Электрический транспорт - XXI век : материалы IX Международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 15–17 мая 2024 года. – Санкт-Петербург: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2024. – 446 с.

ФГБОУ ВО ДВГУПС, г. Хабаровск

Пляскин Артём Константинович: к.т.н., доцент, проректор по учебной работе

Потапов А. А.: аспирант кафедры «Транспорт железных дорог».

УДК 629.423.3 ГРНТИ 73.29.41

В. А. Поморцев, В. С. Томилов, Т. В. Волчек

ФОРМИРОВАНИЕ БАЗИСА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УДАЛЕННОЙ ДИАГНОСТИКИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВОЗОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Аннотация. *В текущих реалиях существующие системы диагностики тягового подвижного состава нуждаются в применении совершенно новых подходах с учетом инновационных методов в области информационных технологий. Такими методами могут являться применение нейронных сетей и машинного обучения на основе большого объема различных структурированных и неструктурированных данных. В настоящей работе изложены промежуточные результаты исследования в области применения нейронных сетей, а также некоторые положения разработки интеллектуальной системы диагностики тяговых электродвигателей (ТЭД) электровозов переменного тока.*

Ключевые слова: *тяговый электродвигатель (ТЭД), электровоз переменного тока, нейронные сети, большие данные, интеллектуальные системы диагностики.*

Одним из главных факторов, вызывающих снижение надежности работы электровозов с течением времени, является износ, которому в процессе эксплуатации подвергаются механизмы и оборудование. Эксплуатация электровозов с длительным износом приводит к отказам технических средств. При проведении технического обслуживания зачастую возникает риск возникновения человеческого фактора при определении неисправностей. Учитывая, что ОАО «РЖД» постоянно повышает интенсивность эксплуатации тягового подвижного состава (ТПС), актуальной является задача совершенствования методов и средств фиксации отклонений от нормальной работы оборудования ТПС как при приемке/сдаче, так и в пути следования.

На сегодняшний день основным оперативным инструментом фиксации технического состояния ТПС является бортовой журнал технического состояния формы ТУ-152. Постепенно появляются бортовые, стационарные и переносные системы диагностики технического состояния оборудования ТПС.

В условиях развития цифровой экономики Российской Федерации и всеобщей информатизации настоящий метод и соответствующая ему технология фиксации замечаний технического состояния ТС не в полной мере соответствует современным требованиям, предъявляемым к диагностике электровозов [1].

При существующей организации технологического процесса отсутствует возможность предиктивно оценить техническое состояние оборудования ТПС и предотвратить риски возникновения незапланированных видов ТОиР, которые приводят к существенной потери времени и простою. Зачастую, работники узнают о неисправностях или каких-либо несоответствиях только при приемке или эксплуатации ТПС. Таким образом, на сегодняшний день, задача предиктивной диагностики является

наиболее актуальной и востребованной для снижения рисков возникновения отказов технических средств.

Исследование основных технических параметров ТЭД электровозов переменного тока проводилось ранее в [3]. Рассматриваемые ранее параметры ТЭД, влияющие на техническое состояние, не дают возможность осуществить предиктивную аналитику [2]. Ввиду этого, для реализации предлагаемого способа предиктивной диагностики оборудования необходимо исследовать «критические» параметры, влияющие на определение отказа технического средства. С целью определения возможности предиктивной диагностики и мониторинга отказов технических средств ТПС с использованием нейросетевых инструментов выявлены «критические» параметры тяговых электродвигателей электровозов.

Исследования в [2] показывают, что отказ технических средств электрических машин, в большей части, настает из-за пробоя изоляции по причине ее старения. По степени старения изоляции можно судить о техническом состоянии всей электрической машины.

Известно, что при нагревании изоляции обмоток ТЭД происходит выделение эмманирующих газов. Для определения предотказного состояния ТЭД была выдвинута гипотеза, что по спектру эмманирующих газов можно сделать оценку технического состояния ТЭД и соответственно вывод о текущем техническом состоянии при помощи предиктивного анализа нейросетевыми инструментами.

Для решения задачи определения состава эмманирующих газов от нагретых частей изоляции применен метод колебательного спектроскопии инфракрасного поглощения (ИК-спектроскопия). Характеристичность ИК спектров появляется в том, что они чувствительны как к структурным изменениям в молекуле, таким как конформационные переходы и поворотная изомерия, так и к проявлениям «внешних» факторов – межмолекулярных взаимодействий. Сведения, получаемые при анализе ИК спектров, позволяют сделать заключение о строении и динамике молекул. Большое количество различных правил и закономерностей позволяет достаточно быстро делать достоверные прогнозы [2].

Результаты исследования методом ИК-спектроскопией показывают, что выброс углекислого газа последовательно растет в силу запуска процесса окисления органических соединений (рисунок 1).

При построении этих зависимостей сделаны следующие упрощения:

а) средний суточный пробег составляет 700 км;

б) превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды постоянно в течение всего пробега.

В рамках исследования разработана функциональная архитектура предлагаемой интеллектуальной системы диагностики, представленная на рисунке 2.

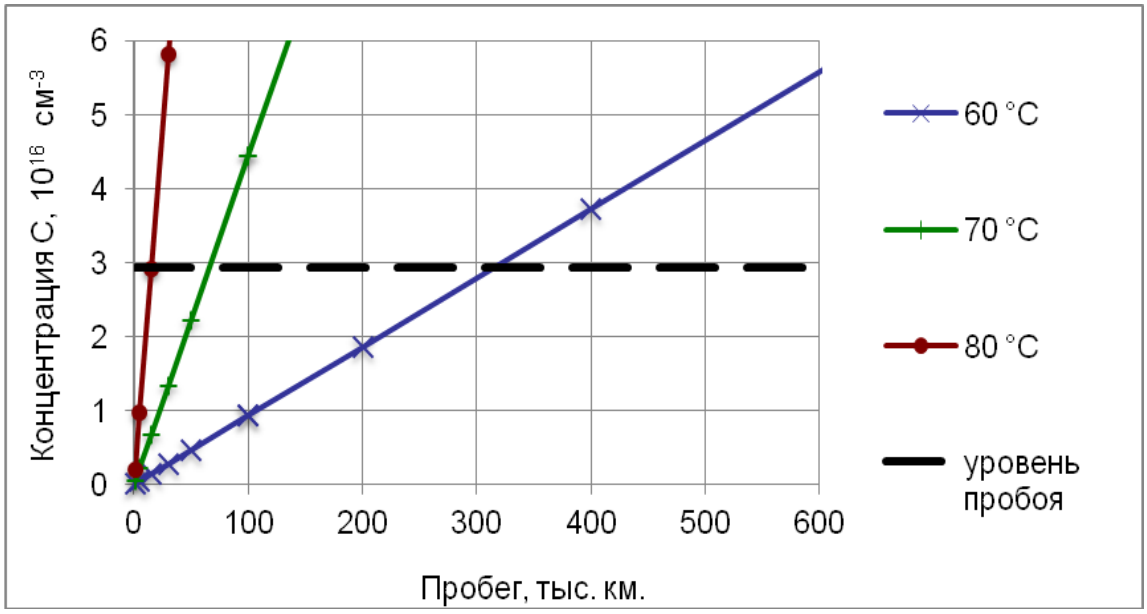


Рисунок 1 – Зависимость концентрации продуктов распада в ПЭТ от пробега при разных превышениях температуры двигателя
Температура окружающей среды принята равной 15 ºС.
Пунктирной линией указана предполагаемая концентрация продуктов распада, при которой наступает пробой изоляции

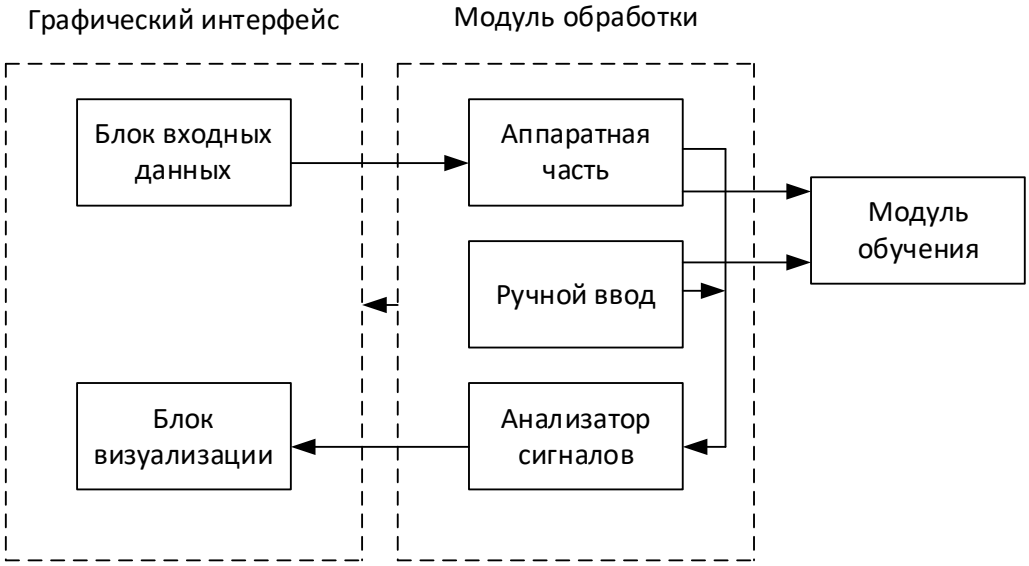


Рисунок 2 – Общая архитектура предлагаемой системы

В соответствии с рисунком 2 предлагаемая система состоит из интерфейса пользователя (графического интерфейса), специализированного нейросетевого ядра обработки информации (модуль обработки) и модуля обучения.

С целью обработки предоставленных данных в системе используется несколько типов искусственных нейронных сетей: сеть Кохонена, прямого распространения и вероятностная ИНС.

В рамках выполнения данной работы были **получены следующие результаты**:

– исследованы основные технические параметры. Анализ технических параметров ТЭД показывает, что важнейшие факторы, оказывающие влияние на отказы технических средств, распределились равномерно: расчетная скорость локомотива и напряжение ТЭД

– 28 %; напряжение контактной сети – 23 %; продольно-динамические усилия в сечении автосцепки – 21 %; ток ТЭД и сила тяги – 20 % [3];

– исследованы спектры эманирующих газов. В ходе анализа выявлено, что в 80 % случаев отказов технических средств ТЭД невозможно сформировать вероятность события на стандартных параметрах (ток, напряжение, скорость, температура и т.д.) и соответственно обучить нейронную сеть. В этом случае были исследованы другие параметры, п которым возможно оценить техническое состояние ТЭД. Одним из таких параметром является – эманирующий газ изоляции обмотки. При проведении лабораторных испытаний определено, что в 91 % случаев пробоя изоляции обмотки ТЭД, можно было предотвратить отказ путем диагностирования спектра данных газов. В ходе работы были получены более 200 различных спектров газа, при которых возможен отказ ТЭД. Данная база была определена для обучения нейронной сети в предлагаемой системе [2];

– разработаны общие функциональная и техническая архитектуры. Система состоит из интерфейса пользователя (графического интерфейса), специализированного нейросетевого ядра обработки информации (модуль обработки) и модуля обучения. С целью обработки предоставленных данных в системе используется несколько типов искусственных нейронных сетей: сеть Кохонена, прямого распространения и вероятностная ИНС.

Список используемых литературных источников

1 Поморцев, В.А., Информатизация локомотивного комплекса в рамках концепции «Цифровая железная дорога», Вестник СамГУПС, 2019.

2 Орленко, А.И. Комплексная диагностика тягового двигателя электровоза: монография / А.И. Орленко, М.Н. Петров, О.А. Терегулов ; под ред. Проф. М.Н. Петрова ; КрИЖТ ИрГУПС. – Красноярск: КрИЖТ ИрГУПС, 2016. – 218 с.

3 Поморцев, В. А. Оценка сдерживающих эксплуатационных факторов при развитии тяжеловесного движения на Восточном полигоне / В. А. Поморцев, А. И. Орленко, Е. М. Лыткина // Вестник транспорта Поволжья. – 2022. – № 1(91). – С. 60-65. – EDN JMADQS.

КрИЖТ ИрГУПС, г. Красноярск

Поморцев Вячеслав Александрович: начальник регионального центра инновационного развития.
Томилов Вячеслав Станиславович: к.т.н., доцент кафедры «Эксплуатация ж.д.».
Волчек Татьяна Витальевна: к.т.н., доцент кафедры «Эксплуатация ж.д.».

УДК 629.423.25 ГРНТИ 73.29.41

И. В. Пустовой, А. А. Аболмасов, И. К. Лакин

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ СЕРВИСНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Аннотация. *В статье представлена разработанная для группы компаний «ЛокоТех», внедрённая во всех сервисных локомотивных депо, участках и отделениях (более 200 объектов) компании «ЛокоТех-Сервис» и продолжающая развиваться автоматизированная система управления производственными процессами технического обслуживания и ремонта локомотивов АСУ «Сетевой график» (АСУ СГ). АСУ СГ комплексно автоматизирует все ключевые процессы сервисного обслуживания: мониторинг технического состояния и режимов эксплуатации, планирование и постановка на ремонт, определение технического состояния и объема ремонтных работ, управление ремонтом, расчет заработной платы, управление складом и другие производственные операции. Уникальность системы определяется как объемом, так и комплексностью решаемых задач.*

Ключевые слова. *Локомотивы, сервисное обслуживание, техническое обслуживание и ремонт, автоматизация производственных процессов, бизнес-процессы, встроенное качество.*

В настоящее время в ООО «ЛокоТех-Сервис» внедрена и развивается автоматизированная система управления производственными процессами сервисных предприятий – АСУ «Сетевой график» (далее – АСУ СГ). Данная система реализована на базе отечественной платформы 1С. В основе АСУ СГ разработана модель управления жизненным циклом локомотивов на этапе их эксплуатации (рис. 1).

Рисунок 1 *– Базовые функциональные блоки АСУ СГ*

Блок 1 - Организация мониторинга эксплуатации и технического состояния локомотивов: сбор информации о работе локомотива A, режимах эксплуатации локомотивов и техническом состоянии Q с бортовых МСУ, а также (в случае недостатка

информации) со стационарных и переносных автоматизированных систем технического диагностирования, используемых в сервисных локомотивных депо. На этом этапе работы модели определяется фактически выполненный локомотивом объём работы *A* (пробег, тонно-километровая работа, расход топлива и электроэнергии, кВт-ч). Одновременно определяется фактическое состояние локомотива *Q* как набор параметров, характеризующих правильность функционирования оборудования и работоспособность локомотива, исправность его узлов и оборудования.

Блок 2 - Организация постановки локомотивов на ремонт, формирование графиков постановки локомотивов на ремонт: оперативное, декадное, месячное, квартальное и годовое планирование с учётом параметров эксплуатации локомотива *A* и его фактического технического состояния *Q*. На этом этапе работы модели по данным о выполненной локомотивом *i* работе A_i, его техническом состоянии Q_i и нормативному межремонтному пробегу $A_{норм}$ определяется дата D_{Li} постановки *i*-го локомотива L_i на техническое обслуживание или ремонт (ТОиР). В результате формируется график постановки локомотивов на ремонт *D* как совокупность дат постановки на ТОиР каждого из локомотивов.

Блок 3 - Внутрипроизводственное планирование: ресурсы *Z* для выполнения ремонтов *R* включают в себя трудовые, инструментальные, инфраструктурные (канавы, пути и др.) ресурсы, технологическое оборудование (обточные станки, скатоподъёмники, краны, домкраты и др.), запасные части (товарно-материальные ценности (далее – ТМЦ)) и материалы повторного использования (МПИ), электроэнергию, топливо, другие виды ресурсов. Внутрипроизводственное планирование ресурсов *Z* осуществляется согласно прогнозным (годовым, квартальным, месячным) и оперативным (декадным, трёхсуточным, суточным) графикам ремонта *D*. Ресурсы *Z* для выполнения ремонтов *R* формируются по данным об объёме выполненной работы *A* и данным о фактическом состоянии локомотивов *Q*. При этом учитываются нормативы потребления ресурсов $Z_{норм}$ и статистика их потребления $Z_{стат}$.

Блок 4 - Организация управления производственными процессами (техническое обслуживание и ремонт локомотива (ТОиР) плановое или неплановое). На этом этапе работы модели согласно графику постановки локомотивов *D*, выделенным ресурсам *Z* и фактическому состоянию локомотива *Q* организуются технологические производственные процессы ТОиР *R* локомотивов *L* в условиях сервисных депо *R*. Технологические процессы ремонта локомотивов *R* организуются с учётом требований международных стандартов в области систем менеджмента качества (СМК), бережливого производства и других международных стандартов.

Блок 5 - Факторный анализ (принятие корректирующих мер по принципу постоянного улучшения (цикл PDCA)) – оперативный и периодический анализ всей совокупности информации с применением математических и логических методов с целью улучшения ключевых показателей качества сервисного обслуживания локомотивов (KPIs – Key Performance Indicators) с последующим планированием корректирующих мероприятий по их устранению).

Предложенная модель позволяет комплексно управлять надёжностью локомотива на этапе его эксплуатации. Этап мониторинга определяет фактическое техническое состояние локомотива, что позволяет по объективным данным обеспечить планирование объёма предстоящего сервисного обслуживания, под который выделяются соответствующие ресурсы, все эти этапы фиксируются в АСУ СГ. Факторный анализ позволяет выполнять корректирующие мероприятия по изменению существующих бизнес-процессов сервисного обслуживания и параллельно адаптировать под них информационную систему.

На рисунке 2 представлены базовые модули АСУ СГ и их взаимодействие со смежными информационными системами, разработанные в рамках вышеописанной концепции. Смежные функциональные блоки с белым фоном не входят в состав модели.

В ОАО «РЖД» совместно Дирекцией управления движением поездов (ЦД) и Дирекцией тяги (ЦТ) для тяги поездов планируются тяговые ресурсы (блок *1*). Исходные данные о работе локомотивов *A* в ОАО «РЖД» формируются в процессе их эксплуатации при тяге поездов (блок *2*), осуществляемой Дирекцией движения поездов ЦД, для чего созданы региональные центры управления тяговыми ресурсами (ЦУТР). По пробегу локомотивов (работе *A*) или в случае возникновения отказа планируется постановка локомотива в сервисное локомотивное депо на планово-предупредительный или неплановый ремонт (блок *3*). Постановка локомотива осуществляется совместно представителями эксплуатационных (ТЧЭ) и сервисных (СЛД) локомотивных депо (блоки *4* и *9*). Аналогично осуществляется приёмка из ремонта (блоки *5* и *12*).

По данным о работе локомотивов (блок *6)* выполняется прогнозное планирование ТОиР локомотивов для технологической подготовки производства (блок *15*), на год, квартал и месяц для планирования обеспечения производства ресурсами (блоки *16, 17* и *18*). Прогнозное планирование осуществляется по статистическим данным о работе локомотива, времени простоя на ТОиР и статистике потребления ресурсов, на основании которых осуществляется прогнозное моделирование.

Основа оперативного управления ТОиР - мониторинг эксплуатации и технического состояния локомотивов (блок *7*) по данным АСУЖТ, бортовых микропроцессорных систем управления (МСУ) и деповских автоматизированных систем технического диагностирования (АСТД).

По данным мониторинга (блок *7*) работы локомотива и его технического состояния осуществляется оперативное планирование постановки локомотивов на ремонт (блок *8*). Окончательно техническое состояние локомотива определяется в процессе приёмки его на ремонт (блок *9*).

По завершении планирования и подготовки производства, включая выделение ресурсов (блоки 6-10) выполняется собственно техническое обслуживание и ремонт (блок 11). При этом реализуются инкапсулированные логические и математические методы управления качеством технологических процессов, бережливого производства. В основе лежат статистические методы, принятые в теории вариабельности.

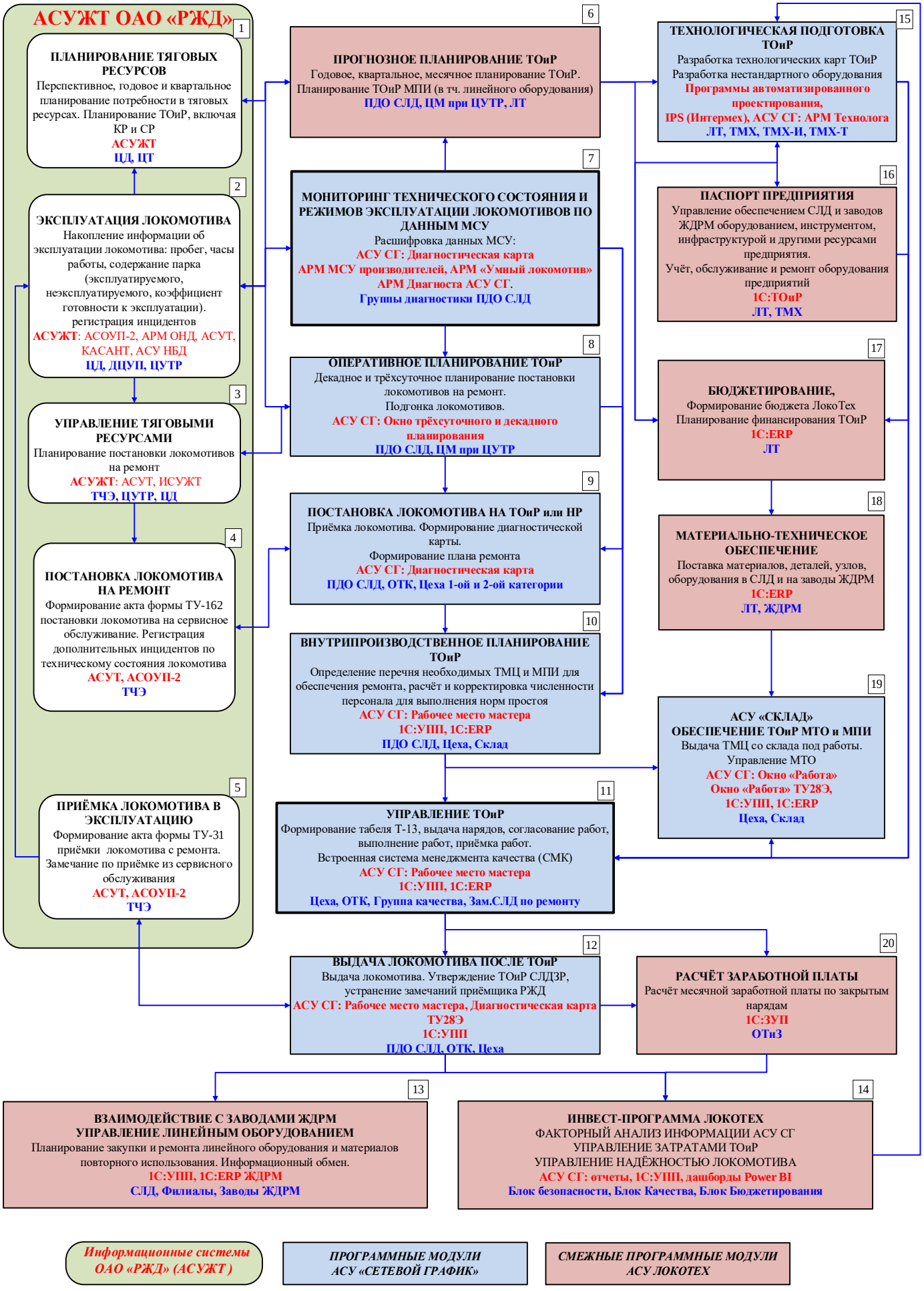


Рисунок 2 *– Базовые функциональные блоки АСУ СГ и их взаимодействие со смежными*

Для мотивации работников сервисного локомотивного депо на качественный и эффективный труд необходима организация сдельной оплаты труда, зависящей от объёма и качества выполненного ТОиР (блок *20*).

Локомотив из ремонта сдается в эксплуатацию (блок *12*) совместно с работниками эксплуатационного депо (блок *5*). При этом используется инструментальный контроль технического состояния локомотива - автоматизированные системы технического диагностирования (АСТД), включая диагностическую функциональность бортовых МСУ.

Сервисные локомотивные депо ориентируются на крупноблочный модульный принцип ремонта, при котором снятое с локомотива оборудование (блок, узел, деталь) при наличии сложных технологических операций отправляется на ремонтный завод, как правило, в ЖДРМ (блок *13*). На этом цикл обслуживания завершается.

Одним из ключевых элементов данной модели является проведение многофакторного анализа всех параметров жизненного цикла обслуживания и ремонта локомотивов (блок 14), который направлен на выявление приоритетных направлений повышения эффективности техобслуживания и ремонта (ТОиР) на основе специально разработанных показателей эффективности (KPIs). По своей сути, этот процесс представляет собой цикл обратной связи PDCA применительно к ТОиР.

Первая группа функций по техническому обслуживанию и ремонту локомотивов (ТОиР), реализуемая через автоматизированную систему управления (АСУ), связана с планированием ТОиР и распределением ресурсов сервисных локомотивных депо (СЛД). Эти функции осуществляются через специально созданные производственно-диспетчерские отделы (ПДО) в СЛД, где задействованы инженерно-технические специалисты, выполняющие следующие задачи:

- мониторинг технического состояния локомотивов в эксплуатации;
- техническое диагностирование локомотивов при заходе в депо;
- планирование постановки локомотивов на ТОиР;
- подгонка локомотивов на ТОиР;
- приёмка локомотива;
- формирование диагностической карты локомотива;
- обеспечение производства необходимыми ресурсами;
- контроль производственных процессов ТОиР;
- выдача локомотива на линию.

Важная задача – управление логистическими операциями депо, включая оптимизацию размещения локомотивов на путевых позициях и учет причин простоя. В рамках решения этой задачи было разработано специальное информационное окно «Статус», представляющее собой визуализированное отображение текущих позиций локомотивов в депо, а также указывающее причину их нахождения там и ответственную сторону. Для каждого депо создана индивидуальная упрощённая схема расположения основных позиций (путей, канав, стойл), отражающая текущее состояние локомотивов – выполняемые в данный момент операции или причины простоя (скриншот на рис. 3).

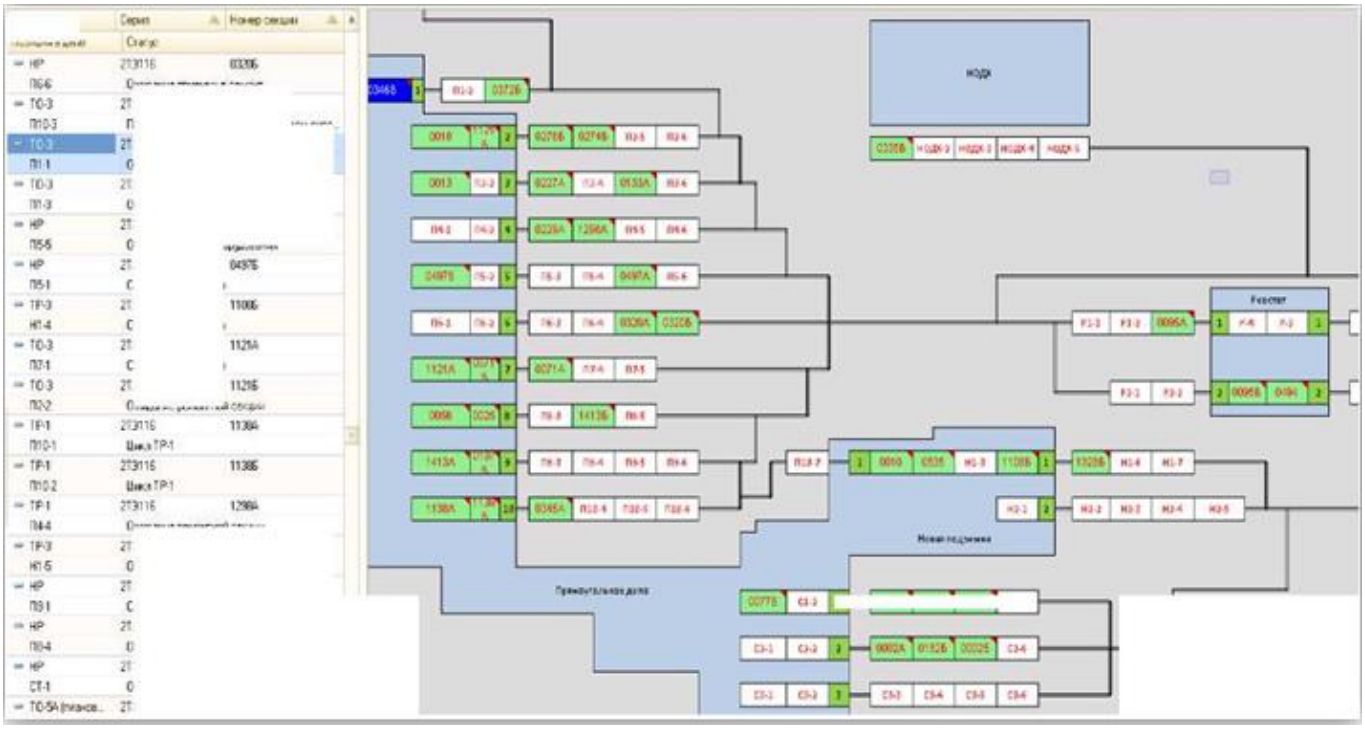


Рисунок 3 *– Скриншот экранной формы рабочего места «Карта депо» АСУ СГ*

Информационным окном управляет диспетчер ПДО, что позволяет в режиме реального времени отслеживать наличие и местоположение локомотивов в пределах депо, а также фиксировать ответственность за любые задержки. Система отчетов, интегрированная в данное окно, обеспечивает возможность анализа причин превышения сроков простоя локомотивов на плановых и внеплановых ремонтных работах, что способствует принятию корректирующих мер в соответствии с принципом непрерывного совершенствования (цикл PDCA). Окно «Статус» становится ключевым инструментом для контроля по минимизации простоев локомотивов в процессе ТОиР в СЛД.

Помимо анализа причин задержек, управление логистикой позволяет оперативно выявлять нарушения технологического процесса путем выделения цветовыми маркерами локомотивов, выходящих за рамки установленных норм простоя на ТОиР. Основными причинами простоя зачастую становятся перегруженные рабочие зоны (например, канавы для выполнения обточки бандажных колес или подъемники для замены колёсно-моторных блоков), нехватка запчастей, отсутствие маневровых локомотивов, задержки приемки локомотивов на ремонт и их выпуска после завершения работ. Главной проблемой в работе с окном «Статус» является ограничение по времени на ввод данных (информация должна обновляться сразу после смены статуса или перемещения локомотива) и необходимость строгого соблюдения исполнительской дисциплины диспетчерами.

В итоге окно логистического управления ТОиР в СЛД обладают наибольшей информативностью и должны быть доступны внешним пользователям — для контроля со стороны управленческих структур различного уровня (от локального депо до всей железнодорожной сети). Это позволит обеспечить единообразие подходов к управлению процессом ТОиР и повысить общую управляемость системы технического обслуживания и ремонта локомотивов.

Планирование постановки на ремонт может быть прогнозным и оперативным. При прогнозном планировании (на год, квартал и месяц) используется математическое моделирование работы локомотива по статистике среднесуточных пробегов и простоя локомотивов в депо. При оперативном планировании (декада, три дня, день) берутся фактические пробеги локомотивов от последних видов ТОиР. Обе функции планирования реализованы в АСУ СГ.

В результате прогнозного планирования определяются потребные ресурсы (заявки), формирование которых может занять много времени. Прогнозное планирование до появления АСУ трудоёмко, выполняется единожды. В результате сходимость прогноза с фактической постановкой на ремонт была низкой. АСУ позволяет регулярно пересчитывать прогноз (раз в месяц или квартал), что в результате делает сходимость прогноза максимальной.

При оперативном планировании наряду с определением ресурсов важной задачей является обеспечение производственного процесса депо локомотивами L за счёт их своевременной подгонки и приёмки. Работа с окнами планирования в СЛД не вызывает трудностей.

Опыт внедрения показал недостаточную сходимость результатов декадного и трёхсуточного пономерного планирования с фактически поставленными локомотивами в депо. Необходимо усиливать роль центров управления тяговыми ресурсами (ЦУТР), созданными Центральной дирекцией по управлению движением поездов (ЦД) ОАО «РЖД» на каждом полигоне. Для взаимодействия с ЦУТР сервисными компаниями созданы при них центры мониторинга эксплуатации локомотивов (ЦМ), которые по данным СЛД должны отслеживать подгонку локомотивов на ТОиР. Пока это направление работ нуждается в дальнейшем совершенствовании.

Одним из главных элементов работы СЛД является формирование диагностической карты (ДК), содержащей все объективные и субъективные данные о техническом состоянии локомотива Q. ДК – это один из важнейших документов АСУ СГ, обеспечивающий управление ресурсами депо Z и надёжностью локомотивов.

Диагностическая карта состоит из закладок, на каждой из которых находится определённая информация о локомотиве:

- основная (время заходы/выхода, расход топлива и электроэнергии);
- план выдачи (планируемая дата выдачи локомотива с указанием ответственного за выдачу исполнителя и руководителя);
- диагностика (совокупность данных со всех доступных систем технического диагностирования (таблица 1));
- замечания по техническому состоянию локомотива, которые должны быть устранены в процессе ремонта;
- МПИ (перечень линейного оборудования (узлов, агрегатов, деталей), демонтируемого и установленного на локомотив в процессе прохождения ТОиР);
- акты сервисного обслуживания, формируемые в процессе ТОиР;
- история (передислокации локомотива в процессе ТОиР, предыдущие ТОиР локомотивов);

- файлы (акты по ТОиР локомотива от сторонних подрядных организаций).

Закладка «Диагностика» является основным результатом реализации функции «Мониторинг технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов», реализуемой, прежде всего по данным бортовых микропроцессорных систем управления (МСУ) и деповских переносных и стационарных автоматизированных систем технического диагностирования (АСТД). Также источниками информации служат ручные переносные и стационарные измерительные системы, данные которых заносятся вручную или прикладываются файлы.

Таким образом, в АСУ СГ впервые создано единое хранилище диагностической информации, которое используется как в оперативном управлении ТОиР мастерами цехов, так и при управлении надёжностью локомотивов в целом на уровне аналитического аппарата сервисной компании.

Главная проблема закладки «Диагностика» - отсутствие автоматической передачи данных от автоматизированных систем технического диагностирования - большинство данных прикладываются в виде файлов или вводятся вручную. Наличие расшифрованных данных важно для анализа тренда показателей, прогнозирования работоспособности оборудования, его остаточного ресурса. АСУ СГ позволяет комплексно анализировать расшифрованные данные систем диагностирования.

УЧЁТ ЗАМЕЧАНИЙ ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ ЛОКОМОТИВА

Главный итог всей работы производственно-диспетчерского отдела (ПДО) — это формирование плана работ на текущий ремонт зашедшего на ТОиР локомотива. Планово-предупредительные работы известны заранее и загружаются в систему автоматизировано с помощью специально созданных шаблонов работ. Дополнительные сверхцикловые работы по устранению выявленных отказов и предотказных состояний формируются по данным закладки «Замечания», которые по существовавшей до АСУ бумажной технологии фиксировались в бумажном рукописном журнале формы ТУ-28, который представлен на рисунке 4(а). По такой форме контроль качества устранения замечаний и, тем более, их последующий анализ были крайне затруднены, а фактически невозможны.

При внедрении АСУ «Сетевой график» появилась возможность формирования полного объема информации об «истории болезни» локомотива (на протяжении всего срока эксплуатации) - при заходе локомотива в депо в системе уже есть информация о проблемных узлах, требующих проведения дополнительной диагностики, либо сверхцикловых работ. Значит, есть возможность заранее планировать ресурсы (трудовые, материальные и др.) под дополнительный объем работ.

Вся информация аккумулируется в диагностической карте локомотива в закладке «Замечания» и представляет собой задание на выполнение сверхцикловых работ мастерам цехов. Наряду с объективными источниками информации, используются субъективные источники информации: бортовой журнал локомотива (форма ТУ-152), результаты визуального осмотра при приёмке локомотива на ТОиР (группа приемки локомотива, мастера цехов, приемщики ОТК, замечания по комплектности локомотива)

и др.

Вторая группа рабочих мест в АСУ СГ — это рабочие места мастеров участков. Всё депо разбивается на систему взаимосвязанных участков, за каждым из которых закрепляется своя ремонтная функциональность. Условно все виды участков можно разбить на основные цеха (в которые заходит локомотив для выполнения определённого вида ТОиР: ТО-2, ТО-3, ТР-1 и др.), вспомогательные по видам оборудования (топливный, аппаратный, автоматный, электромашинный и др.) и заготовительные (слесарный, токарный, фрезерный, кузнечный и др.).

Цеха также подразделяются на три категории: категория 1 выполняет непосредственно ТОиР на локомотиве, категория 2 осуществляет ТОиР узлам и агрегатам локомотива, так называемым МПИ во вспомогательных участках, категория 3 занимается поддержанием работоспособности депо в целом (проведение планово-предупредительного ремонта станочного оборудования, содержание зданий и сооружений в работоспособном состоянии), как правило, работники цехов 3-ей категории находятся на повременной оплате труда (при этом сменно-суточное задание формируется на все категории без исключений).

На основании диагностической карты АСУ СГ (прежде всего закладок «Диагностика» и «Замечания») мастер передела планирует цикловые и дополнительные работы. Весь процесс отображается на экране компьютера мастера с использованием удобного графического интерфейса.

Окно мастера, наряду с окном «Диагностическая карта», является ключевым в системе. Во многом качество ремонта определяется правильностью действий мастера (выбор дополнительных работ, выбор и расстановка исполнителей (слесарей), контроль их действий и качества выполненных работ, приёмка работ). Работа мастера в АСУ СГ происходит в условиях дефицита времени. Как ни в одном другом месте здесь нужен максимально дружественный интерфейс и система поддержки принятия решений.

Работа мастеров начинается с формирования табеля сотрудников, где мастер подтверждает явку сотрудников на работу (первичную явку фиксирует сам исполнитель путем отметки смарт-картой на любом рабочем терминале, расположенном в цехе). После формирования табеля мастер комплектует индивидуальное сменно-суточное задание каждому сотруднику бригады. В процессе выполнения ТОиР локомотива и МПИ мастер осуществляет оперативный контроль выполнения работ с фиксацией данных в информационной системе.

Помимо формирования объема работ и сменно-суточных заданий, мастера переделов для ТОиР локомотива заказывают на складе товарно-материальные ценности (ТМЦ) и МПИ. Система подсказывает мастеру, какие материалы и ТМЦ необходимы для той или иной работы (на основании привязки ТМЦ из ресурсной спецификации к работам). После определения мастером потребности, заявка попадает сотруднику склада, где комплектуются «корзины» ТМЦ и МПИ. По готовности заявки мастер получает сообщение, что ТМЦ готовы к выдаче.

Работа исполнителей (слесарей, электромехаников и др.) в АСУ СГ максимально

упрощена: слесарь с использованием индивидуальных смарт-карт работает с информационными «киосками» (терминалами), установленными в цехах, отмечает свой приход на работу, просматривает порученные ему работы и последовательно отмечает их исполнение. Закончив работу, слесарь отмечает это в режиме online. При возникновении проблем слесарь переводит работу в состояние «Пауза» с указанием причины (отсутствие запасных частей, отвлечение на другую работу, недоступность оборудования и др.). Так формируется график исполнения работ.

Опыт внедрения показал, то с развитием корпоративной культуры дорогостоящие терминалы могут быть заменены на альтернативные компьютеризированные дисплеи. Тем не менее, применение виртуальных клавиатур продемонстрировало низкую эргономичность, что привело к решению установки стационарных клавиатурных блоков. Непосредственное взаимодействие операторов с автоматизированной системой управления эксплуатационной готовностью (АСУ СГ) является ключевым элементом комплекса, обеспечивающим полноту и точность передаваемой информации.

Работа вспомогательных подразделений депо (бухгалтерии, экономистов, кадров и др.) автоматизируется стандартными программными продуктами на базе 1С: ERP. При внедрении АСУ СГ исключается ручной ввод информации, автоматизируется поступление первичной информации о производственных процессах (так называемые первички), в результате чего ускоряется ввод информации, повышается достоверность и полнота информации, сокращаются трудозатраты. Внедрение АСУ СГ позволяет значительно уменьшить расходы на непроизводственный персонал депо.

После завершения технологических этапов планирования операций в производственном отделе, распределения заданий мастерами, выполнения работ слесарями, проверки выполненных работ мастером, представителями отдела технического контроля (ОТК) и руководством депо (заместитель начальника депо по ремонту), в базе данных АСУ СГ аккумулируется информация для передачи и расчета заработной платы в программный модуль 1С: Зарплата и Управление Персоналом (ЗУП). По завершении ремонтных работ данные о выполненных операциях поступают в электронный формат в отдел труда и зарплаты (ОТиЗ), где проводится проверка правильности закрытия нарядов, после чего они интегрируются в модуль расчета заработной платы 1С: ЗУП. Таким образом, весь цикл управления операциями и расчетом заработной платы осуществляется в цифровом формате.

Принципиально новое качество управления, которое даёт АСУ СГ – это учёт всех видов материалов повторного использования, причём не только входящих в ограниченное понятие «линейное оборудование». В результате формируется база данных не только о жизненном цикле локомотива в целом, но и о каждом конкретном МПИ всех выбранных типов. Решение задачи управления жизненным циклом МПИ поднимает эффективность работы сервисного локомотивного депо на принципиально новый уровень, создавая предпосылки для значительного увеличения номенклатурного ряда отслеживаемого оборудования до полного охвата всех видов МПИ. Несмотря на отсутствие маркировки у МПИ, сервисная компания активно реализует ряд пилотных

проектов по внедрению различных методов идентификации (NFC, RFID, лазерные QR-кодов и др.). Эти подходы позволят существенно снизить трудоемкость подготовки управленческой и бухгалтерской документации, обеспечить контроль правильности документооборота и повысить качество учета материалов повторного использования.

Ключевой проблемой качества техобслуживания и ремонта (ТОиР) являются дополнительные работы, не предусмотренные системой планово-предупредительных ремонтов. Анализ причин появления внеплановых работ ("управление инцидентами") и ликвидация корневых факторов их возникновения являются важной функцией АСУ СГ.

Работа по повышению качества ремонта начинается с анализа причин возникновения дополнительных работ, оперативно проводимого мастером. После назначения и выполнения дополнительной работы перед приемкой мастер обязан провести экспресс-анализ. Только после заполнения необходимых полей программное обеспечение разрешит завершение процесса.

Сейчас АСУ СГ охватывает свыше 200 ремонтных предприятий (СЛД, СО, СУ), более 20 тысяч секций локомотивов, различные типы сервисного обслуживания от ТО-2 до среднего ремонта (более 700 обслуживаний ежедневно), зарегистрированы свыше 30 тысяч пользователей, система функционирует круглосуточно в режиме 24/7/365 во всех часовых поясах нашей страны. Также система интегрирована с бухгалтерским и зарплатным контуром и другими информационными системами.

Список используемых источников

1. Мониторинг технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов. Теория и практика [Текст] / К.В.Липа, А.А.Белинский, В.Н.Пустовой, С.Л.Лянгасов, И.К.Лакин, А.А.Аболмасов, И.В.Пустовой и др.– М.: ООО «Локомотивные Технологии», 2015. – 212 с.
2. Лакин И.И. Мониторинг технического состояния локомотивов по данным бортовых аппаратно-программных комплексов: Диссертация на соискание степени к.т.н. – М., МИИТ, 2016 – 195 с.
3. Аболмасов А.А. Управление техническим состоянием тягового подвижного состава в условиях сервисного обслуживания. Диссертация на соискание степени к.т.н. – М.: МИИТ, 2017 г. – 180 с.
4. Пустовой И.В. Разработка информационно-динамической модели управления сервисным техническим обслуживанием и ремонтом локомотивов. Диссертация на соискание степени к.т.н. – Омск: ОмГУПС, 2018 г. – 183 с.
5. Лакин И.К., Пустовой И.В., Аболмасов А.А. Автоматизированная система управления эксплуатационным жизненным циклом локомотивов// Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава». – Красноярск: АО «ДЦВ Красноярской железной дороги», 2020 г. – С. 223 – 242.

ООО «Программный инжиниринг и технологии»
ПИИТ, Москва.

Пустовой Илья Владимирович,
к.т.н., заместитель генерального директора.
Аболмасов Алексей Александрович:
к.т.н., начальник отделения.
Лакин Игорь Капитонович: д.т.н., профессор, начальник ситуационно-аналитического центра мониторинга и реагирования ТМХ.

УДК 629.488: 629.471 РНТИ 73.29.41

Н. С. Русаков

ОСОБЕННОСТИ СРЕДНЕГО И КАПИТАЛЬНОГО РЕМОНТА АСИНХРОННЫХ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Аннотация. *Анализируются вопросы организации и технологии среднего и капитального ремонта асинхронных тяговых электродвигателей в сравнении с ремонтом коллекторных машин. Отмечены преимущества использования асинхронных тяговых двигателей на подвижном составе, а также возникающие в связи с их использованием сложности.*

Ключевые слова: *электрический подвижной состав, ремонт асинхронных тяговых двигателей, технологические процессы электромашинного производства.*

В настоящее время асинхронные тяговые двигатели на подвижном составе железных дорог в Российской Федерации получают всё большее распространение. Это обусловлено некоторыми преимуществами асинхронных двигателей перед коллекторными.

В первую очередь одним из преимуществ асинхронных тяговых двигателей (АТЭД), из которого вытекают и другие, является более простая конструкция: отсутствие коллектора, который является механическим преобразователем электрической энергии. Механическая коммутация накладывает ограничения по частоте вращения и параметрам протекающего через него тока. Поэтому максимальная частота вращения коллекторных тяговых двигателей (КТЭД) ограничена не только характеристиками подшипников и конструкцией якоря, но и коммутацией на коллекторе. Также коллектор необходимо осматривать, заменять щётки, протачивать на некоторых видах ремонта.

Также, невозможно управлять АТЭД простым увеличением подаваемого на него напряжения, что обязует использовать электронные преобразователи (автономные инверторы напряжения), управляемые цифровой электроникой. Благодаря этому в любой тяговый подвижной состав (ТПС) с АТЭД достаточно просто установить цифровую систему автоведения, предотвращения боксования и юза, поддержания заданной силы тяги, скорости или тока, что существенно облегчает эксплуатацию, увеличивает участковые скорости движения и обеспечивает защиту от превышения предельно-допустимых параметров в тяговом приводе ТПС.

АТЭД представляет собой трехфазную электрическую машину с короткозамкнутой обмоткой ротора. Конструктивно тяговый двигатель состоит из следующих основных узлов: статора, ротора, подшипниковых щитов 1. Особенностью АТЭД электропоездов семейства «Ласточка» и «Финист» является наличие лишь одного подшипникового щита, а роль второго подшипникового щита выполняет корпус тягового двигателя, что представлено на рисунке 1 [1]. Статор состоит из корпуса 2, сердечника статора 3, обмотки статора 4. Ротор, в свою очередь, состоит из вала 5, пакета железа 6 и короткозамкнутой обмотки (на рисунке не видна). Также АТЭД имеет крышки

подшипников, лабиринты и подшипники, ремонт которых практически не отличается от аналогичных деталей КТЭД.

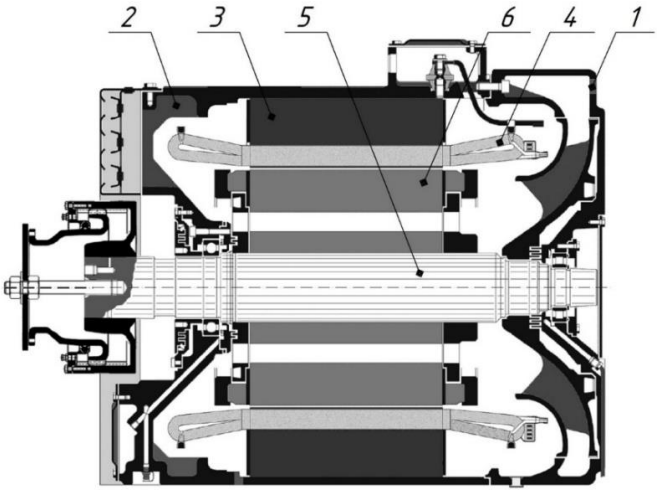


Рисунок 1 – Продольное сечение асинхронного тягового электродвигателя электропоезда «Ласточка»

В отличие от электрических машин постоянного тока обмотка статора не имеет явных полюсов, а состоит из катушек статора, уложенных в пазах сердечника, который запрессован в корпус АТЭД. Ротор не имеет коллектора, который является ответственным и сложным узлом. Обмотка ротора состоит из медных стержней, соединенных по торцам с медными короткозамыкающими кольцами [2].

Средний ремонт (СР)

При среднем ремонте асинхронных тяговых двигателей происходит его разборка, обдувка и обмывка. Далее выполняются следующие операции:

– дефектовка корпуса статора и подшипниковых щитов, устранение дефектов,

– визуальная проверка сердечника статора и изоляции обмотки статора,

– пропитка сердечника статора в компаунде,

– визуальный осмотр ротора, очистка вентиляционных каналов,

– устраняются (при наличии) дефекты пайки стержней ротора к короткозамыкающим кольцам,

– устраняются все дефекты, видимые без разборки ротора. При невозможности устранения дефектов без разборки ротор переводится в более сложный вид ремонта,

– балансировка ротора,

– ревизия или замена роторных подшипников,

– окраска поверхностей согласно ремонтным чертежам.

Упрощённый алгоритм проведения среднего и капитального ремонта АТЭД представлен на рисунке 2. Путями 1 и 2 указаны варианты алгоритма, соответствующие среднему ремонту. Как правило при СР статор и ротор АТЭД не разбираются, в отличие от КТЭД, в которых отсоединяются от остова и проверяются главные и добавочные полюса, траверса и компенсационная обмотка (при наличии), щёткодержатели, выводные провода, проверяется и протачивается коллектор, особо осматривается обмотка якоря, её соединения и изоляция, а также целостность бандажей, что значительно усложняет процесс ремонта коллекторной машины.

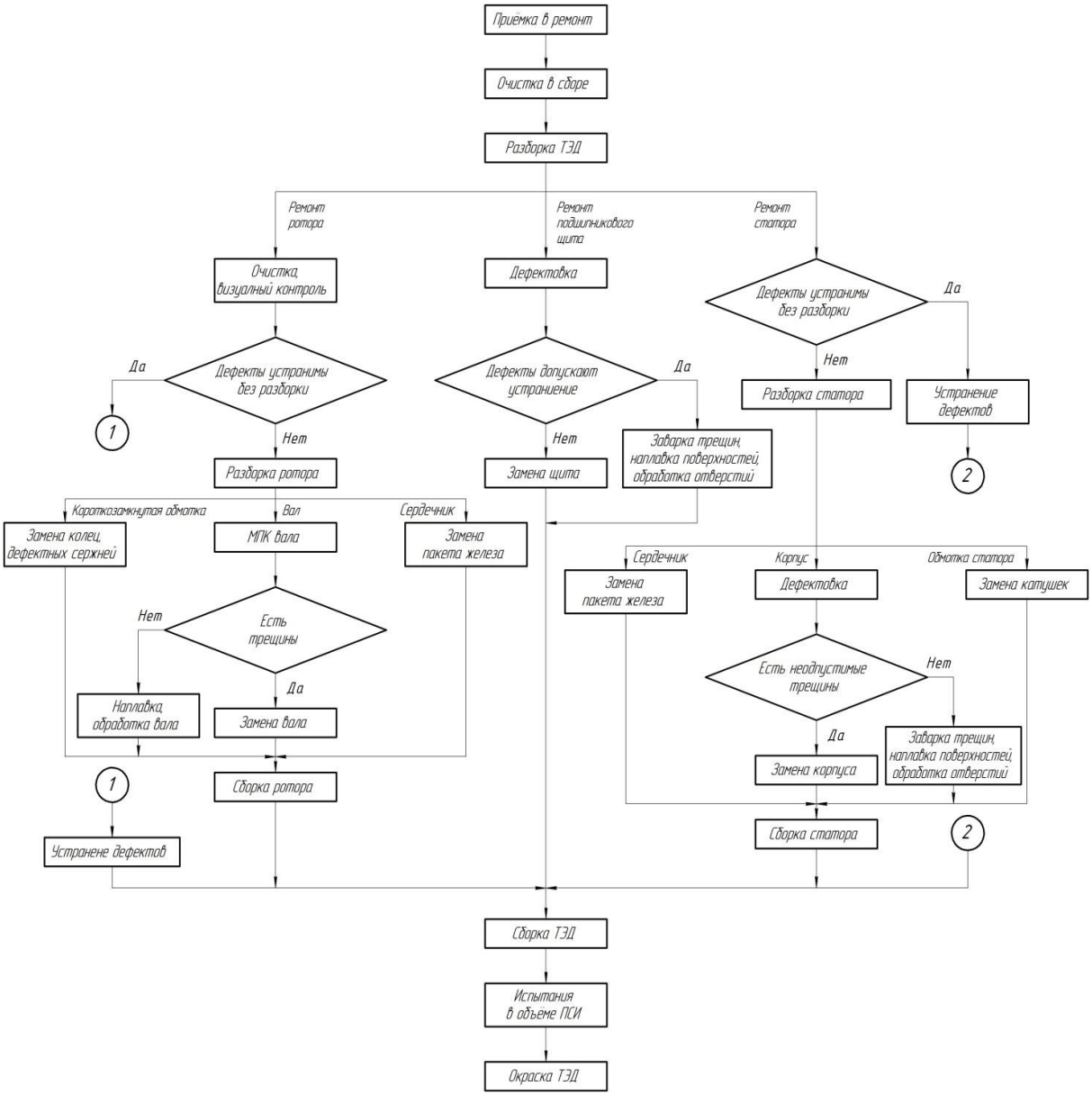


Рисунок 2 – Укрупненный технологический процесс проведения среднего и капитального ремонта асинхронных тяговых электродвигателей

Капитальный ремонт (КР)

При капитальном ремонте асинхронных тяговых двигателей дополнительно к операциям, выполняемым при СР добавляются следующие [3]:

– обязательная выпрессовка сердечника статора из корпуса,

– удаление обмотки статора,

– разборка и ремонт сердечника статора,

– замена катушек обмотки статора, токовыводов и шин,

– обязательная замена подшипников,

– разборка ротора,

– ремонт пакета железа ротора и короткозамкнутой обмотки, нажимных шайб, дефектовка и магнитопорошковый контроль (МПК) ротора по всей его длине,

– при необходимости пропитка и балансировка ротора.

Как и при СН, КР асинхронного тягового двигателя легче. Так, при капитальном ремонте коллекторной машины происходит разборка коллектора, замена его платин и

прокладок, сборка и формовка коллектора, пайка или сварка выводов катушек якоря к петушкам коллекторных пластин. Также заменяется обмотка якоря, происходит изолировка, пропитка, сушка и окраска якоря.

При сборке асинхронной машины следует значительно увеличить точность в процессе установки ротора в статор, поскольку воздушный зазор между статором и ротором в асинхронном тяговом электродвигателе составляет порядка 1,0 – 2,0 мм [2], в то время как у коллекторных машин воздушный зазор между якорем и полюсами составляет порядка 6 – 8 мм [4].

Испытания после ремонта

После ремонта каждая электрическая машина подвергается приёмо-сдаточным испытаниям. У асинхронных тяговых двигателей не требуется проверка коммутации, измерение сопротивления изоляции ротора, биения коллектора, что упрощает испытания. С другой стороны, чтобы испытать асинхронную машину методом взаимной нагрузки необходима более сложная испытательная станция с двумя автономными инверторами для питания АТЭД, а также постоянный контроль частоты вращения асинхронных машин для регулировки выходных параметров тока для каждого АТЭД [5].

Таким образом, при рассмотрении особенностей ремонта асинхронных тяговых двигателей можно заметить, что капитальный ремонт АТЭД по сравнению с коллекторными машинами проще, а СР – значительно проще, что снижает время ремонта.

Также простота конструкции увеличивает межремонтные пробеги, снижая тем самым само количество ремонта за весь срок эксплуатации. Увеличение межремонтных пробегов и уменьшение времени ремонта АТЭД также позволяет снизить количество ТПС, необходимого для замены эксплуатируемого тягового подвижного состава на время его ремонта. Это снижает затраты эксплуатанта ТПС и уменьшает количество ремонтных депо при неизменной нагрузке железной дороги.

Список использованных источников

1. A5E46897895A РЭ. Электродвигатель тяговый типа 1TB2216-0GB03. Руководство по эксплуатации и техническое описание / ООО «Сименс ЭП»;
2. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями: учебное пособие / А. С. Курбасов [и др.]; ред. : Н. А. Ротанов. - М., 1991. – 334 с.
3. 104.03.00672-2009 КО. Электрические машины электропоездов. Общее руководство по ремонту / Утверждено распоряжением ОАО «РЖД» от 29 декабря 2009г. № 2731р;
4. Алексеев А.Е. Тяговые электрические машины и преобразователи. – 2-е изд. – Л.: «Энергия», 1977. – 444 с.
5. Синявский И. В., Жирков А. И., Курочка А. А. Стенд для испытаний асинхронных тяговых электродвигателей // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. 2014. № 1 (67). С. 3–12.

Российский университет транспорта

РУТ (МИИТ), Москва.

Кафедра «Электропоезда и локомотивы»

Русаков Николай Сергеевич: аспирант.

УДК 629.423.1 ГРНТИ 73.29.41

А. С. Самойлова, О. В. Мельниченко, П. В. Григоренко

УЛУЧШЕНИЕ РЕГУЛИРОВОЧНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫПРЯМИТЕЛЬНО-ИНВЕРТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОВОЗА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В РЕЖИМЕ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ

Аннотация. *В статье рассмотрены особенности реализации режима рекуперативного торможения на современных отечественных электровозах переменного тока серии 2ЭС5К. В процессе исследования выявлено, что работа данного режима осуществляется не в полной мере ввиду того, что регулировочная характеристика инвертора на высшей зоне ограничена по причине конструкционной специфики построения электрических силовых цепей электровоза. На основании этого, авторами определена возможность расширения области регулировочной характеристики инвертора, направленная на улучшение показателей эффективности работы электровоза в режиме рекуперативного торможения, что в целом может повысить пропускную и провозную способности участков железных дорог Восточного полигона.*

Ключевые слова: *энергоэффективность, ресурсосбережение, электровоз переменного тока, рекуперативное торможение, регулировочная характеристика, инвертор, выпрямительно-инверторный преобразователь.*

Энергоэффективность и ресурсосбережение выступают сопутствующими элементами каждого этапа развития железнодорожного транспорта и устанавливают вектор его прогресса и эволюции. Их учёт при создании и совершенствовании тягового подвижного состава отражается в повышении интенсивности перевозочного процесса и увеличении эффективности использования энергоресурсов [1]. На сегодняшний день в числе реализованных способов, применяемых на электроподвижном составе, соответствующих требованиям экологичности, энерго- и ресурсосбережения является режим рекуперативного торможения. Данный режим относится к одному из видов электрического торможения, при котором работа тягового электродвигателя (ТЭД) осуществляется в режиме генератора, т.е. происходит создание электрической энергии из механической в процессе формирования тормозного усилия, стремящегося задержать вращение колёсной пары для достижения эффекта торможения. В отношении электроподвижного состава переменного тока, вырабатываемая от ТЭД электрическая энергия преобразуется тяговым преобразователем, выступающим в качестве инвертора, из постоянного тока в переменный промышленной частоты 50 Гц и, таким образом, совершается возврат её в контактную сеть [2,3].

Рассмотрим принцип реализации режима рекуперативного торможения для раскрытия особенностей процессов, протекающих в электрической цепи электровоза. Для приведения в работу электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения, применительно к электровозу переменного тока серии 2ЭС5К [4], необходимо выполнить переход с тягового режима работы ТЭД в генераторный режим с независимым возбуждением. Это осуществляется за счёт отсоединения обмоток

возбуждения от якорей ТЭД и последовательным соединением их с выпрямительной установкой возбуждения (ВУВ), обеспечивая изменение полярности ЭДС ТЭД при соединении общего катода с минусовым зажимом, а нулевой вывод − с плюсовым (рис. 1). Следовательно, установленное согласное направление ЭДС $E_{\Г}$ и тока якоря $I_{\text{Я}}$ генератора обеспечивает возврат электрической энергии обратно в контактную сеть, а противоположное направление тока возбуждения $I_{\text{В}}$ и тока якоря генератора $I_{\text{Я}}$ образуют тормозной эффект электровоза, то есть снижение скорости движения поезда без воздействия механического торможения [5]. Регулирование скорости движения электровоза V в данном режиме, в соответствии с выражениями (1) и (2), осуществляется за счёт изменения тока возбуждения $I_{\text{В}}$ в обмотках возбуждения генератора при помощи ВУВ и зонно-фазным регулированием выпрямленного напряжения ВИП U_d, работающего в режиме инвертора и подключенного к сглаживающим реакторам, якорям генераторов, диодам и блокам балластных резисторов (ББР):

$$E_{\Г} = C_V\Ф \cdot V = U_d + I_{\text{Я}} \sum R, \qquad (1)$$

где $C_V\Ф$ – удельная ЭДС ТЭД в зависимости от величины тока возбуждения $I_{\text{В}}$, В/км/ч;

$\sum R$– сумма сопротивлений всех элементов цепи тока якоря генератора, Ом;

следовательно:

$$V = \frac{U_d + I_{\text{Я}}(r_{\text{я}} + R_{\text{ББР}})}{C_V\Ф}, \qquad (2)$$

где $r_{\text{я}}$ – сопротивление якорной обмотки ТЭД (с учетом обмоток добавочных полюсов и компенсационной обмотки), Ом;

$R_{\text{ББР}}$ – сопротивление ББР, Ом.

В зоне малых и средних скоростей регулирование происходит путём подачи управляющих импульсов $\alpha_{\text{р}}^{\text{вип}}$и β на тиристорные плечи ВИП, а в зонах высоких скоростей посредством ВУВ при подаче управляющего импульса $\alpha_{\text{р}}^{\text{вув}}$. Управляющие импульсы формируются в блоке управления микропроцессорной системы управления и диагностики (МСУД) электровоза в зависимости от значений заданных величин скорости $V_{\text{З}}$ и ограничения тока $I_{\text{З}}$ от контроллера машиниста электровоза (КМЭ) с учётом текущей скорости движения электровоза, определяемой относительно числа оборотов колёсной пары n от датчиков скорости (ДС) [6].

Имеется особенность в регулировании выпрямленного напряжения ВИП на четвёртой зоне в связи с наличием ББР в цепи якорей ТЭД. Роль ББР заключается в необходимости обеспечения электрической устойчивости цепей в данном режиме, а также для улучшения распределения тока по якорям ТЭД при расхождениях величины тока в отдельных группах ТЭД и колебаниях напряжения в контактной сети [7]. Ток якоря генератора протекая по ББР образует потери напряжения, в результате именно они ограничивают работу режима рекуперативного торможения. Это выражается в неполноценном задействовании регулировочной характеристики инвертора на четвёртой зоне регулирования, в которой диапазон изменения типового управляющего импульса $\alpha_{\text{р}}^{\text{тип}}$ не превышает границы 90 эл. град., что составляет 3,5 зоны регулирования ВИП по отношению к формируемой величине его выпрямленного напряжения U_d, согласно выражения (3) [8]:

$$U_d = \frac{U_{d4}}{2}\left((1+\varepsilon)\cos\delta + (1-\varepsilon)\cos\beta_{\text{р}}\right) - \left(2\varepsilon^2 + \varepsilon + {}^{\mu}/_{\varepsilon} - \mu + 1\right)\frac{\lambda X_{T4} I_d}{\pi}, \qquad (3)$$

где U_{d4} – действующее значение напряжения вторичной обмотки тягового трансформатора (ТТ) на четвёртой зоне регулирования, В;

ε – коэффициент, выражающий отношение амплитудного значения переменного напряжения предыдущей зоны ВИП к такому же напряжению последующей зоны;

μ – коэффициент, выражающий отношение приведенного эквивалентного значения индуктивного сопротивления цепи переменного тока ВИП предыдущей зоны к такому же сопротивлению последующей зоны;

λ – коэффициент, учитывающий влияния пульсаций выпрямленного тока;

X_{T4} – индуктивное сопротивление обмоток ТТ на четвёртой зоне регулирования (цепи переменного тока), Ом;

I_d – среднее значение выпрямленного тока инвертора, А;

δ – угол запаса инвертора, эл. град.;

$\beta_{\text{р}}$ – управляющий импульс, равный $\beta_{\text{р}} = \pi - \alpha_{\text{р}}$, эл. град.

На текущий момент наличие данной особенности реализации режима рекуперативного торможения на современных отечественных электровозах ограничивает их возможности в эксплуатации, такие как увеличение скорости движения поезда по спуску и возврат электрической энергии в контактную сеть. Преимущества данного режима играют существенную роль в уменьшении межпоездного интервала в целях обеспечения роста пропускной и провозной способностей российских железных дорог.

Максимально-возможную величину выпрямленного напряжения ВИП U_{dmax} предлагается реализовывать по слежению за величиной тока якоря ТЭД для учёта текущих потерь напряжения на ББР. Это напряжение определяется следующим образом по формуле (4):

$$U_{dmax} = U_d + U_{\text{доб}}^{I_{Я max}^{\text{тек}}} = U_d + \Delta U_{R_{\text{ББР}}}^{max} - \Delta U_{R_{\text{ББР}}}^{\text{тек}} = U_d + R_{\text{ББР}}\left(I_{Я max}^{\text{огр}} - I_{Я max}^{\text{тек}}\right), \quad (4)$$

где $U_{\text{доб}}^{I_{Я max}^{\text{тек}}}$ – добавочное напряжение относительно максимальных и текущих потерь напряжения на ББР, В;

$\Delta U_{R_{\text{ББР}}}^{max}$ – максимальные потери напряжения на ББР при максимальном ограничении значения тока якоря ТЭД $I_{Я max}^{\text{огр}}$, В;

$\Delta U_{R_{\text{ББР}}}^{\text{тек}}$ – текущие потери напряжения на ББР при текущей максимальной величине тока якоря ТЭД $I_{Я max}^{\text{тек}}$, В.

Следовательно, величина предлагаемого управляющего импульса $\alpha_{\text{р}}^{\text{предл}}$ (рис. 2 *а*) определяется в зависимости от максимально-возможной величины выпрямленного напряжения ВИП U_{dmax}, в результате регулировочная характеристика инвертора будет иметь больший угол с фазой $\alpha_{\text{р}}$ (рис. 2 *б*).

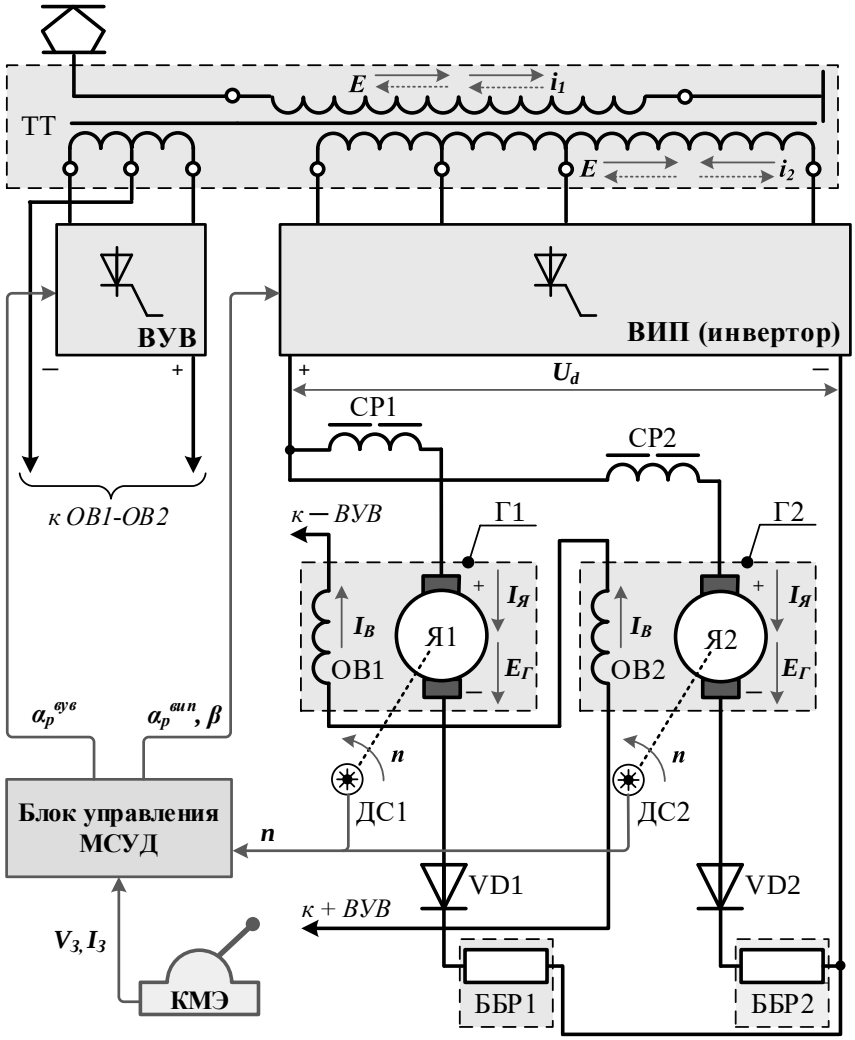
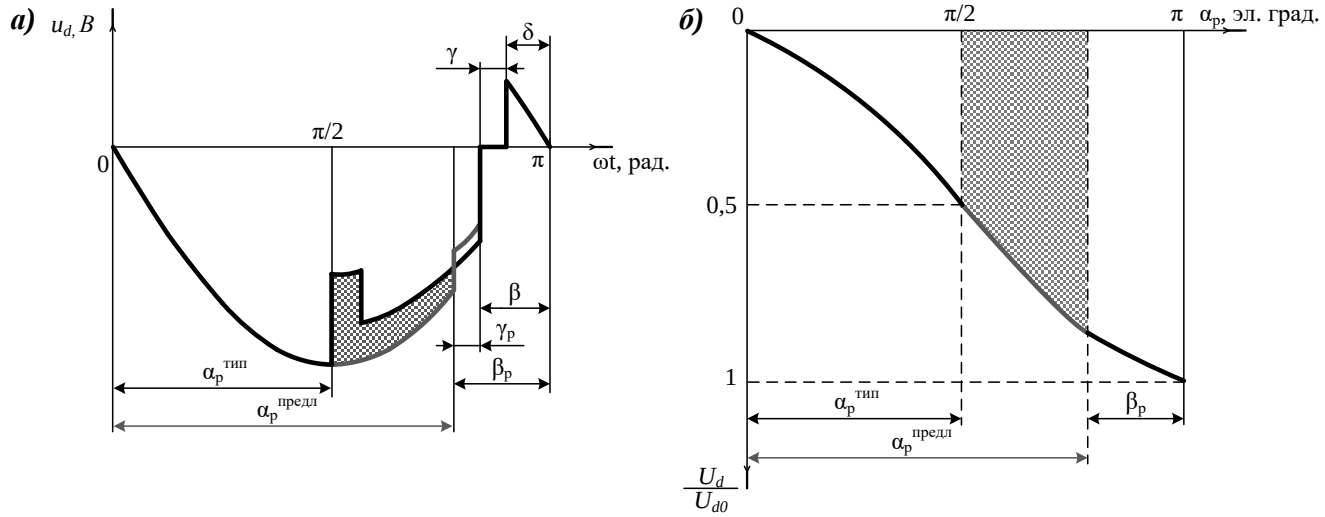


Рисунок 1 – Упрощённая принципиальная электрическая силовая схема электровоза переменного тока серии 2ЭС5К в режиме рекуперативного торможения на одну тележку: ТТ – тяговый трансформатор; ВУВ – выпрямительная установка возбуждения; ВИП (инвертор) – выпрямительно-инверторный преобразователь; СР1-СР2 – сглаживающий реактор; Г1-Г2 – генератор независимого возбуждения; Я1-Я2 – якорь генератора; ОВ1-ОВ2 – обмотка возбуждения генератора; VD1-VD2 – диод; ББР1-ББР2 – блок балластных резисторов; ДС1-ДС2 – датчик скорости; КМЭ – контроллер машиниста



– добавочная часть области регулирования выпрямленного напряжения ВИП на четвёртой зоне при предлагаемом управляющем импульсе $\alpha_р^{предл}$.

Рисунок 2 – Регулирование выпрямленного напряжения ВИП на четвёртой зоне управления в режиме рекуперативного торможения: а – диаграмма регулирования выпрямленного напряжения ВИП; б – регулировочная характеристика инвертора.

На основании вышеизложенного, авторами предлагается способ регулирования выпрямленного напряжения ВИП электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения, направленный на повышение эффективности его работы за счёт расширения области регулировочной характеристики инвертора. Предлагаемый способ будет выполнен в виде подпрограммы управления режимом рекуперативного торможения на четвёртой зоне регулирования ВИП для программного обеспечения МСУД. Его применение на электроподвижном составе в процессе эксплуатации позволит улучшить следующие показатели:

– повысить пропускную и провозную способности железных дорог Восточного полигона при увеличении скорости движения поезда по спускам;

– сократить время межпоездного интервала при использовании новой технологии «Виртуальная сцепка» в результате наращивания интенсивности движения поездов;

– обеспечить рост эффективности использования энергоресурсов при сокращении затрат электрической энергии на тягу поездов и снижении нагрузок на тяговых подстанциях за счёт увеличения возврата электрической энергии в контактную сеть;

– снизить расход тормозных колодок локомотива.

Список использованных источников

1. Устойчивое развитие // Компания ОАО «РЖД» [сайт] URL: https://company.rzd.ru/ru/9386/page/103290?id=17513 (дата обращения: 23.11.2024).
2. Засорин С. Н. Электронная и преобразовательная техника: Учебник для вузов ж.-д. трансп. Под ред. С.Н. Засорина / С.Н. Засорин, В.А. Мицкевич, К.Г. Кучма. − М.: Транспорт, 1981. – 319 с.
3. Трахтман, Л. М. Электрическое торможение электроподвижного состава [Текст] / Л. М. Трахтман. – М.: Транспорт, 1965. – 204 с.
4. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К). Руководство по эксплуатации. Книга 1. Описание и работа. Электрические схемы [Текст]: ИДМБ.661142.009РЭ1 (3ТС.001.012.РЭ1) / разработчик и изготовитель – НЭВЗ / Новочеркасск. – 2006. – 265 с.
5. Тихменев Б. Н., Трахтман Л. М. Подвижной состав электрифицированных железных дорог. Теория работы электрооборудования. Электрические схемы и аппараты. Учебник для вузов ж.-д. трансп. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.; Транспорт, 1980. – 471 с.
6. Микропроцессорная система управления и диагностики для электровоза переменного тока МСУД-015. Руководство по эксплуатации. [Текст]: – ЗАО «ЛЭС» / Новочеркасск. – 2014. – 188 с.
7. Повышение эффективности работы современных отечественных электровозов переменного тока в режиме рекуперативного торможения / А. С. Самойлова, П. В. Григоренко, С. А. Кахаев, О. В. Мельниченко // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2024. – Т. 1. – С. 108-112.
8. Мельниченко, О. В. Повышение энергетической эффективности тяговых электроприводов электровозов переменного тока: дис. … д-ра техн. наук: 05.09.03 / Мельниченко О. В.; [Место защиты: Комсомольск-на-Амуре гос. техн. ун-т]. – Хабаровск, 2015. – 392 с.

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), г. Иркутск.
Кафедра «Электроподвижной Состав» (ЭПС).

Самойлова Анастасия Сергеевна: аспирант.
Мельниченко Олег Валерьевич: д.т.н., профессор, заведующий кафедрой ЭПС.
Григоренко Павел Владимирович: аспирант.

УДК 629.423.25 ГРНТИ 73.29.41

А. П. Семенов, В. А. Смирнов

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛОКОМОТИВОРЕМОНТНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВ И ВНЕДРЕНИЯ ГИБКИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Аннотация. *В статье предлагаются перспективные автоматизированные стенды для диагностирования, испытания и ТОиР оборудования локомотивов в условиях локомотиворемонтных заводов и ремонтных локомотивных депо. Приведено описание и фотографии наиболее перспективных разработок компании ООО «НПЦ ПРОМТЕХ».*

Ключевые слова. *Локомотивы. ТОиР. Технологическое оборудование.*

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Содержание локомотивного парка связано со значительными затратами трудовых, энергетических и материальных ресурсов, которые, по данным технико-экономических исследований составляют до 10% стоимости жизненного цикла (ЖЦ) локомотивов, что соответствует превышению их начальной стоимости более чем в 2 раза. Особо остро вопрос экономической эффективности ремонта и технического обслуживания локомотивов стоит на предприятиях промышленного железнодорожного транспорта, где содержание локомотив – это не основной бизнес, а лишь средство, обеспечивающую его транспортную составляющую.

На сегодняшний день, назвать систему технического содержания локомотивов на промышленных предприятиях гибкой, управляемой, а тем более экономически-эффективной затруднительно. Технологический комплекс локомотиворемонтного производства характеризуется высокой инерционностью, сложно адаптируется под обновляющийся подвижной состав, изменяющиеся требования эксплуатации, отраслевой законодательной базы и экономики. Ключевые показатели надежности локомотивов, связанные с безотказностью в эксплуатации, ремонтопригодностью, восстанавливаемостью, долговечность, технической готовностью не достигают желаемых значений. Высокое количество отказов оборудования и внеплановых ремонтов, не только обуславливает повышенные эксплуатационные затраты, но и что самое важное, вызывает нестабильность транспортно-логистической системы в целом.

Отдельной статьей финансовых и временных потерь является капитальный ремонт локомотива, который, в силу дефицита ремонтных мощностей, зачастую проводится от 6 до 12 месяцев сопровождаемый перегонкой локомотивов за тысячи километров на локомотиворемонтный завод, а иногда и дополнительными таможенными процедурами, если дело касается международных отношений.

Всё это обуславливает необходимость поиска новых, более эффективных подходов к организации процессов технического обслуживания и ремонта локомотивов промышленного железнодорожного транспорта, с учетом отраслевых особенностей и проблем. Результаты технологического аудита производства локомотиворемонтных депо, проводимые на протяжении последних лет сотрудниками «НПЦ ПРОМТЕХ» по

заявкам предприятий в различных регионах России, позволяют выделить следующие основные проблемы, обуславливающие снижение эффективности производства:

- неоднородность эксплуатируемого парка по сериям локомотивов и срокам их службы, значительная «разноресурсность» даже однотипных деталей и узлов;
- количественный и качественный недостаток средств технологического оснащения по ключевым технологическим процессам и операциям, влияющим на производительность труда и качество ремонта;
- низкая технологическая гибкость оборудования и производственного комплекса в целом;
- значительный физический и моральный износ существующих средств механизации, моечного, измерительного, контрольно-испытательного оборудования и средств восстановления ресурса;
- продолжительные перепростои локомотивов на ремонте, связанные с проведением внецикловых работ, ожиданием комплектующих или материалов;
- низкая энергоэффективность технологических процессов из-за применения устаревших технологий и оборудования;
- неоправданно высокие расходы на проведение маневровых работ под депо;
- несовершенство логистических процессов в депо - неэффективный выбор мест размещения запасных частей, инструментов, оборудования, а также зон передвижения персонала и техники;
- нехватка ремонтного персонала и его недостаточная квалификация.

Перечисленные проблемы во многом обусловлены недостатками технологической подготовки ремонтного производства, отсутствием информационной «прозрачности» технологических процессов, а также состояния локомотивов при приемке, ремонте, выпуске из ремонта и в эксплуатации, нехваткой автоматизированных и «цифровых» технологий, позволяющих исключить человеческий фактор в принятии решений.

Важным фактором потерь является низкий уровень технологической оснащённости и недостаточная технологическая гибкость ремонтного производства, что значительно ограничивает возможности выполнения полного комплекса операций по обслуживанию и восстановлению ресурса максимально широкого спектра оборудования в едином месте без дополнительных перемещений на другие предприятия.

Недостаточная «прозрачность» фактического технического состояния узлов и агрегатов локомотивов, а также технологических процессов их ремонта и обслуживания, снижает эффективность системы управления качеством ремонта, не позволяет своевременно локализовать возникающие проблемы и выработать необходимые управляющие воздействия для их устранения.

Повысить эффективность содержания локомотивного парка промышленного железнодорожного транспорта в существующих условиях представляется возможным путем последовательного освоение силами депо не только текущих, но и средних и капитальных ремонтов на основе применения гибких технологических решений с интеграцией данных в единое информационное поле «Цифрового депо».

«ЦИФРОВОЕ ДЕПО» С ГИБКОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМОЙ

Практическое решение задачи построения эффективной и гибкой производственной системы ремонтного депо обеспечивается взаимодействием трех основных компонентов:

- универсальной технологической платформой, включающей контрольно-диагностическое и ремонтно-восстановительное оборудование с функциями самоконтроля и цифровыми интерфейсами;
- единой интеграционной программной платформой, обеспечивающей сбор и аналитику данных о фактическом техническом состоянии каждого локомотива и его оборудования на различных стадиях: в эксплуатации, при приемке в ремонт, ремонте и выходе из ремонта;
- вовлечением персонала в единый информационный взаимообмен данными с программной платформой в режиме on-line для оперативного уточнения объемов и видов работ, оценки имеющихся ресурсов, подменного фонда, запасных частей, показателей хода выполнения технологического процесса.

Конфигурация универсального проекта «Цифровое депо» с элементами комбинированных технологий, включает требуемое программой ремонта количество ремонтных позиций для разборки и сборки локомотивов, как для малых, так и для крупных видов ремонта. Ремонтные позиции оснащены необходимым оборудованием, обеспечивающим механизацию и автоматизацию технологических операций.

Для сокращения времени простоя локомотивов при ремонте предусматривается возможность параллельного выполнения различных видов и объемов контрольно-диагностических и ремонтно-восстановительных операций для широкой номенклатуры типов объектов ремонта.

Наглядным примером такой технологической адаптивности может служить «Автоматизированная моечная машина крупногабаритных деталей ПРТН.443136.002» позволяющая производить очистку как крупногабаритных узлов – дизелей, рам тележек локомотивов, так и среднегабаритных деталей – кожухов зубчатых передач КМБ, малых шестерен, элементов экипажной части.

Ключевым элементом «Цифрового депо» является обеспеченность универсальных ремонтных позиций контрольно-диагностическим, измерительным и стендовым оборудованием, обеспечивающим формирование достоверной картины о техническом состоянии того или иного элемента локомотива.

Информационные протоколы с такого оборудования, посредствам платформы «Цифрового депо» обеспечивают автоматизированное формирование протокола допуска локомотива на линию. Технологическое оснащение каждой позиции, составляющее в совокупности технологическую платформу обеспеченности ремонтных цехов и участков.

Размещение универсальных цифровых ремонтных позиций в цехе определяется исходя из стремления к улучшению логистики для персонала и машин, применяемых при транспортировке секций, узлов и агрегатов, максимально эффективного задействования производственных площадей и повышения энергоэффективности депо в целом.

Домкрат для подъема и опускания кузова

Технологический комплекс разборки-сборки КМБ

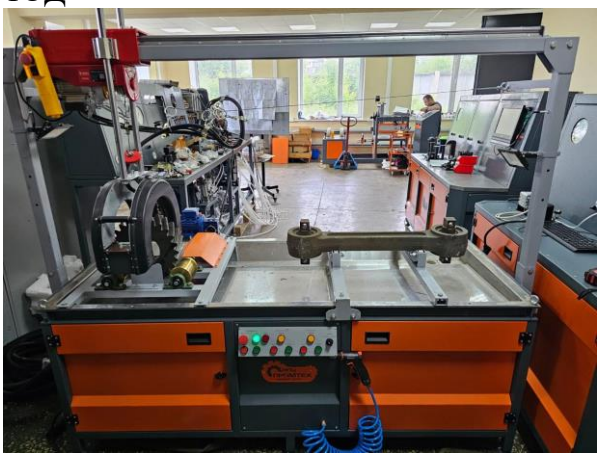
Универсальный стенд для ремонта блоков дизелей

Механизированный комплекс для разборки и сборки дизелей

Моечная машина деталей буксового узла

Комплексный стенд проверки асинхронных ТЭД

Пропиточно-сушильное отделение электромашинного цеха



Универсальный стенд магнитопорошкового контроля деталей ходовой группы

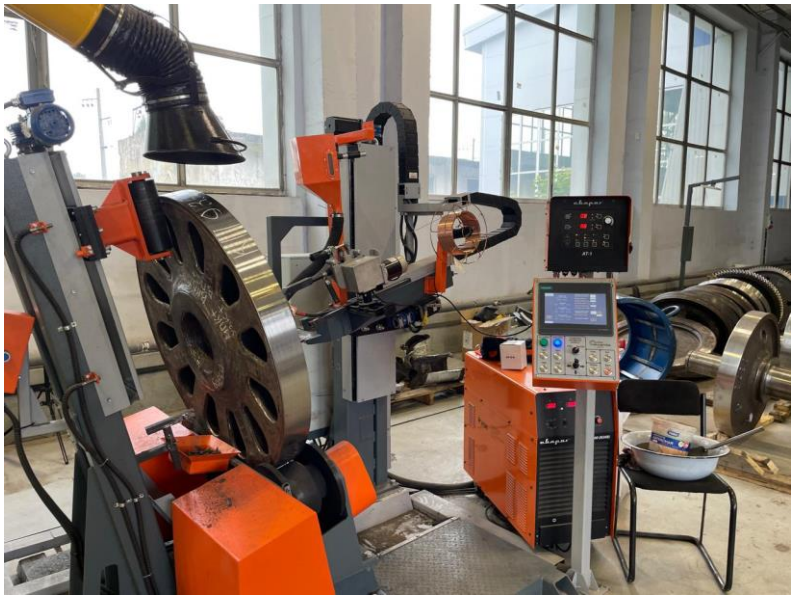
Стенд дефектоскопии колесных пар

Стенд входного и выходного контроля буксовых узлов колесных пар грузовых вагонов

Стенд испытания пружин

Нагрузочный модуль реостатных испытаний ДГУ

Автоматизированный стенд для испытания автотормозного оборудования



Универсальная установка для наплавки ступицы колесного центра

Информационная поддержка технологии обслуживания и ремонта локомотивов, ее взаимоувязка с технологической платформой и персоналом обеспечиваются цифровой аналитикой, формируемой средствами единой интеграционной программной платформы «Цифровое депо».

Технология работы «Цифрового депо» основана на способе управления обслуживанием и ремонтом сложных технических объектов, включающего сбор данных о техническом состоянии объектов, их обработку с комплексной оценкой технического состояния каждого объекта, формирование рекомендаций по ремонту и техническому обслуживанию объекта и перечня операций, подлежащих исполнению, с соответствующими инструкциями, передачу инструкций на портативные терминалы технических специалистов и прием от них ответной информации, обновление данных о техническом состоянии объекта в процессе его обслуживания и ремонта с уточнением перечня операций, и контроль их выполнения.

При этом контролируемые параметры включают не только параметры, характеризующие техническое состояние ремонтируемого (или диагностируемого) объекта, но и параметры самоконтроля технического состояния и положения самого оборудования, что позволяет судить о соблюдении технологического режима при выполнении операций. Автоматический сбор данных обеспечивает их высокую объективность.

Такое автоматическое отслеживание соблюдения технологии ремонта и обслуживания способствует информационной прозрачности работ, обеспечивает высокую объективность контроля, возможность оперативного выявления нарушений и недостатков технологического процесса и их оперативного устранения. В итоге достигается стабильно высокое качество ремонтных работ и работ по техническому обслуживанию.

Контроль выполнения операций включает отслеживание и анализ последовательности и времени выполнения операций, состава, состояния и перемещений оборудования и технических специалистов в процессе выполнения операций.

Логистика ввода локомотивов на ремонтные позиции реализуется с применением радиоуправляемого самоходного тягового агрегата – «Локоробота» с гибридной силовой установкой. Этот агрегат является импортозамещающей технологией высокоэффективного ресурсосберегающего способа производства маневровых работ – альтернативы традиционному выполнению их с помощью тепловозов.

Радиоуправляемый самоходный тяговый агрегат «Локоробот»

Эффективность самоходного тягового агрегата обуславливается возможностью работы в закрытых цеховых помещениях при реализации тягового усилия от аккумуляторных модулей. Агрегат имеет малые габариты, позволяющие маневрировать в цехе между ремонтными позициями на рельсовом и колесном ходу.

Дистанционное радиоуправление «Локороботом» дает возможность осуществлять маневры и четко позиционировать секции локомотивов на ремонтных позициях, работая в одно лицо. Этот же агрегат применяется для перемещения секций локомотивов в пределах ремонтных позиций при некоторых технологических операциях, например, при смене колесно-моторных блоков.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОЕКТА «УНИВЕРСАЛЬНОЕ ЦИФРОВОЕ ДЕПО»

Ожидаемыми эффектами от реализации проекта являются:

- расширение технологических возможностей локомотивных депо до уровня среднего и капитального ремонтов подвижного состава;
- повышение экономической эффективности ремонтного производства, сокращение затрат материальных и энергетических ресурсов;
- повышение «информационной прозрачности» технического состояния локомотивов, технологических процессов ремонта и обслуживания;
- повышение качества ремонта и надежности локомотивов в эксплуатации;
- повышение эффективности производственной логистики, сокращение запасов ремонтного фонда, комплектующих и материалов.

Пилотный проект «Универсальное цифровое депо», пилотно реализованный сегодня, уже в ближайшем будущем может обеспечить качественно новый уровень технического сервиса локомотивного парка промышленного железнодорожного транспорта в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1 Семенов, А.П. Направления повышения эффективности эксплуатации локомотивов [Текст] / А. П. Семенов, И.К. Лакин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – № 3 (63). – С. 89-98.

2 Семенов, А.П. Цифровое депо – технологическая основа цифровой трансформации локомотивного комплекса [Текст]/ А.П. Семенов, О.С. Валинский, А.М. Лубягов, А.Н. Маврин, Д.В. Казарин // Железнодорожный транспорт. –2020. № 3. С. 26-32.

3 Семенов, А. П. Цифровизация ремонтного производства тягового подвижного состава / А.П. Семенов, Д.В. Казарин // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 1 (45). – С. 93-103.

4 Семенов, А.П. Модель управления жизненным циклом локомотивов с использованием современных методов технического диагностирования. Научная монография / А.П.Семенов – Омск: ООО «Образование Информ», 2021. – 368 с. Ил.107, Табл. 58, библиогр. 367 назв. ISBN 978-5-98649-052- Семенов, А.П. Источники повышения эффективности использования бюджета времени локомотивов [Текст] / А.П. Семенов // Локомотив. – 2018. – №. 10. – С. 33-34.

5 Семенов, А.П. Роль цифровых двойников в управлении сервисным обслуживанием локомотивов [Текст] / А.П. Семенов, И.К. Лакин, И.Ю. Хромов // Локомотив. – 2019. – № 6. – С.41-42.

6 Семенов, А.П. Цифровая трансформация управления ремонтом локомотивов с использованием технологии цифрового двойника [Текст]/ А.П. Семенов, И.К. Лакин // Цифровизация транспорта и образования: материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 125-летию железнодорожного образования в Сибири. – Красноярск: КрИЖТ – ИрГУПС, 2019. – С. 367-380.

7 Семенов, А.П. «Цифровое депо» – инновационное решение для системы содержания парка локомотивов [Текст]/ А.П. Семенов, О.С. Валинский, А.М. Лубягов, А.Н. Маврин, Д.В. Казарин. // Локомотив. – 2020. – № 2. – С. 2-6

8 Семенов, А.П. Модель управления жизненным циклом локомотивов с использованием современных методов технического диагностирования. Научная монография / А.П.Семенов – Омск: ООО «Образование Информ», 2021. – 368 с. Ил.107, Табл. 58, библиогр. 367 назв. ISBN 978-5-98649-052-6.

НПЦ ПРОМТЕХ npcpt.com

д.т.н. **Семенов Александр Павлович**

генеральный директор ООО «НПЦ ПРОМТЕХ», член Союза машиностроителей России, член Экспертного совета по энергетическому машиностроению, электротехнической и кабельной промышленности при Комитете Государственной Думы РФ по промышленности и торговле

д.т.н. **Смирнов Виктор Александрович**

начальник департамента технологического проектирования ООО «НПЦ ПРОМТЕХ», профессор кафедры «Электропоезда и локомотивы» РУТ (МИИТ), профессор кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» ОмГУПС

УДК 629.423.25 ГРНТИ 73.29.41

В. В. Семченко

ПЕРСПЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ТОиР ДЦВ КРАСНОЯРСКОЙ Ж.Д.

Аннотация. *В статье описана история становления и суть модели управления техническим обслуживанием и ремонтом электронного и микропроцессорного оборудования электровозов, которая была разработана и внедрена на Восточном полигоне железных дорог ОАО «РЖД» Дорожным центром внедрения Красноярской железной дороги (ДЦВ Красноярской ж.д.). Предложено создавать хорошо оборудованные с высококвалифицированным персоналом опорные центры по диагностированию и восстановлению работоспособности электронного оборудования с формированием ремонтных комплектов, поставляемых в локомотивные депо и ПТОЛ на опорные пункты для ремонта локомотивов по крупно-агрегатному принципу. Опыт ДЦВ Красноярской ж.д. будет полезен не только для ТОиР электровозов переменного тока с выпрямительно-инверторными преобразователями (ВИП), но и для всех отечественных локомотивов.*

Ключевые слова*: локомотивы, электронное и микропроцессорное оборудование, техническое обслуживание и ремонт, модель сервиса.*

ИСТОРИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ КРАСНОЯРСКОЙ ШКОЛЫ ТОиР

Послевоенная после 1945 г. электрификация железных дорог СССР осуществлялась на переменном токе, 25 кВ, 50 Гц. Но при всех её преимуществах отсутствовала возможность реализовать рекуперацию, которая была особенно актуальна на горном профиле Восточного полигона МПС СССР. Ступенчатое регулирование переключением обмоток трансформатора на электровозах серий Ф (Франция), ВЛ60, ВЛ60К, ВЛ80К, а позже ВЛ80Т и ВЛ80С не позволяло реализовать электрическое торможение с рекуперацией электроэнергии. Только с появлением электровозов серии ВЛ80Р с электронными выпрямительно-инверторными преобразователями (ВИП) на базе тиристоров с плавным четырёх-зонным управлением напряжением на тяговых электродвигателях (ТЭД) рекуперация стала возможной. Но возникла необходимость в новой форме ТОиР электронного оборудования, которая и была создана на Красноярской железной дороге.

Опытный образец электровоза с ВИП был изготовлен в 1967-м году на базе электровоза ВЛ80К (рисунок 1). Тиристоры были рассчитаны только на 200 А, из-за чего в первых ВИП их было по 300 штук в каждом ВИП. После продолжительных испытаний в 1969-м году были изготовлены ещё два электровоза с уже с серийным ВИП-2200 с 260-ю тиристорами.

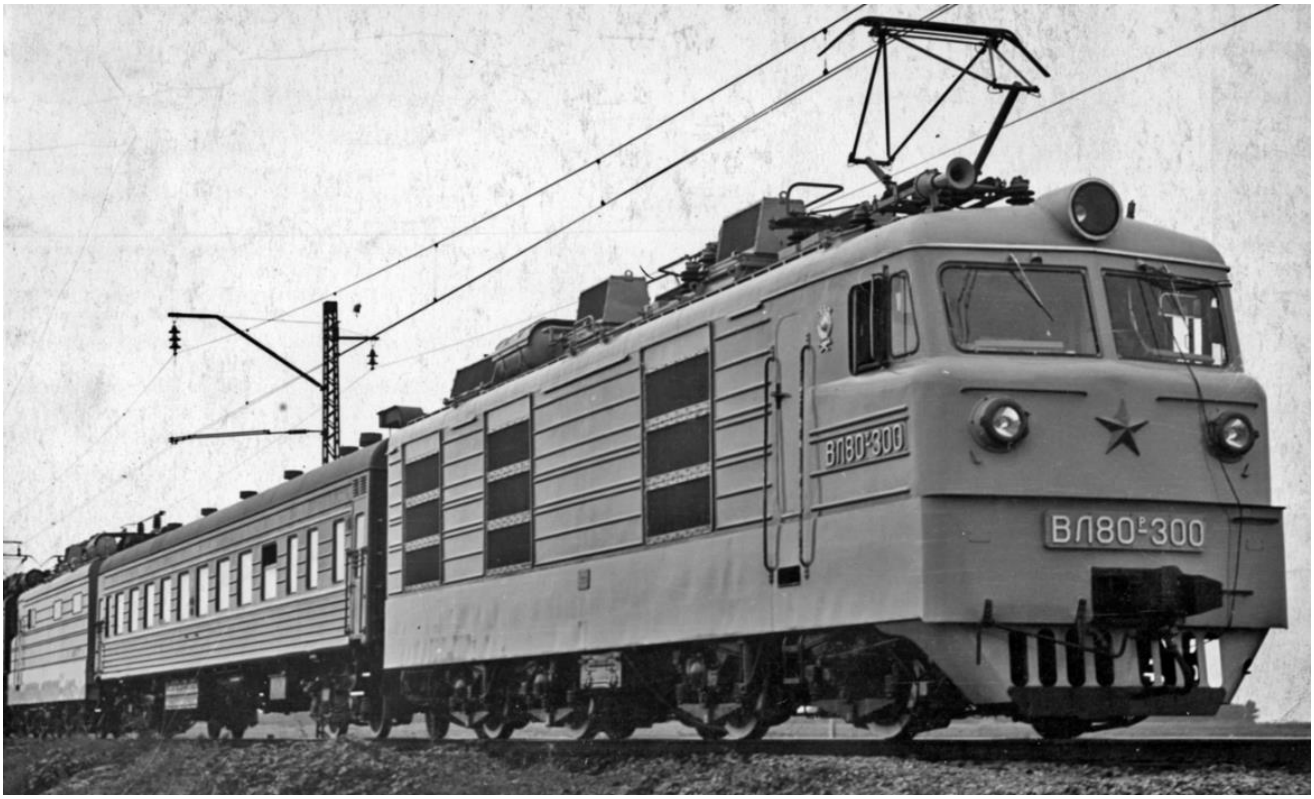


Рисунок 1 *– Первый экспериментальный электровоз с ВИП (Интернет)*

В декабре 1973 года выпускается первый серийный ВЛ80Р-1500 с ВИП-2200М с 154-я тиристорами (рисунок 2). После испытаний в 1974-м году ВЛ80Р-1500 и последующих локомотивов в депо «Батайск», электровозы в 1975-м году передаются на Красноярскую железную дорогу в локомотивное депо Боготол. С этого момента начинается становление Красноярской школы технического обслуживания и ремонта (ТОиР) электронного оборудования локомотивов.

Рисунок 2 *– Первый серийный электровоз с ВИП (Интернет)*

Дальнейшее развитие электровозной тяги на переменном токе происходило на базе электровозов с ВИП [1], которые постоянно совершенствовались: прежде всего повышался класс тиристоров с последующим сокращением их в ВИП (рисунок 3). Совершенствовалась и электронная система управления ВИП от транзисторных БУВИП-80, БУВИП-100, БУВИП-113, цифровых БУВИП-133, до микропроцессорных систем управления МСУД. В настоящее время эксплуатируются тысячи электровозов с ВИП серий ВЛ80Р, ВЛ85, ВЛ65, ЭП1, ЭП1М, ЭП1П, Э5К, 2ЭС5К, 3ЭС5К, 4ЭС5К (рисунок 4).

Выпрямительно-инверторный преобразователь ВИП-4000М-УХЛ2

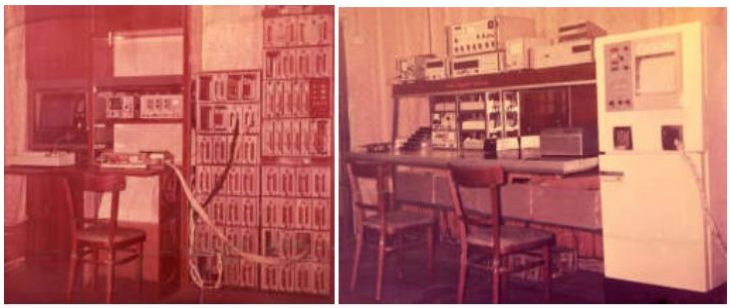
БУВИП-113 (1-е поколение) *БУВИП-133 (2-е поколение)* *МСУД (3-е поколение)*

Рисунок 3 *– Электронная система управления современных электровозов*

Рисунок 4 *– Электровозы переменного тока с ВИП (Интернет)*

Появление в локомотивном депо «Боготол» электровозов с полностью электронной системой управления потребовало решение принципиально новых задач по организации их ТОиР. Впервые в стране был создан цех выпрямительных установок под управлением Н. Г. Шабалина [2]. Именно в цехе ВУ депо Боготол создавалась новая технология ремонта. Эмпирически определялись оптимальные межремонтные пробеги, разрабатывались ремонтные приспособления, диагностические устройства. Итогом стало внедрение в 1984-м году автоматизированной системы технического диагностирования (АСТД) на базе ЭВМ «Электроника Д3-28» – первого компьютера в отечественном локомотивном депо (рисунок 5) [3, 4].

Первый компьютер (ЭВМ) в локомотивных депо: «Электроника Д3-28 (1983 г.)



Первые стенды для испытания и ремонта электронного оборудования

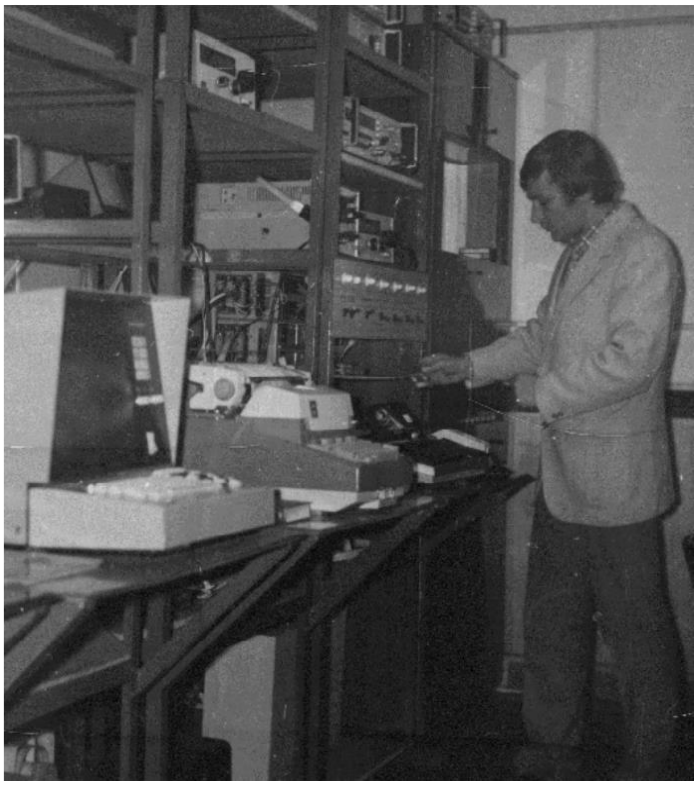


Рисунок 5 *– Первая компьютерная автоматизированная система технического диагностирования БУВИП (АСТД), внедрённая в локомотивном депо Боготол Красноярской железной дороги в 1984-м году*

В результате внедрения АСТД в базово локомотивном депо «станции Боготол надёжность электровозов ВЛ80Р была повышена в 5 раз от первоначальной и получен положительный ответ на вопрос, может ли электроника эксплуатироваться в тяжёлых климатических условиях Сибири. После проведения школы передового опыта в депо «Боготол» в 1986 году аналогичные системы (АСТД) были внедрены во всех депо Восточного полигона, эксплуатирующих и ремонтирующих электровозы с ВИП. АСТД была удостоена золотой медали ВДНХ и стала уникальной для своего времени.

Именно опыт, накопленный в депо Боготол, лёг в основу модели управления ТОиР электронного оборудования, позже разработанной в ДЦВ Красноярской ж.д. и далее описанной в настоящей статье.

ДЦВ КРАСНОЯРСКОЙ Ж.Д.

В 1999 году в МПС РФ совместно с ВНИИЖТ и Отраслевым центром внедрения (ОЦВ) принято решение о необходимости создания на каждой железной дороге Дорожных центров внедрения – ДЦВ. В результате 20 марта 2000 года, 25 лет назад создано АО «ДЦВ Красноярской ж.д.» (далее – ДЦВ) [5]. Именно к этой дате приурочено проведение 2-й научно-практической конференции «ТОиР».

Первоначально все центры занимались внедрением общесетевых проектов. Но постепенно стала появляться специализация. У ДЦВ Красноярской ж.д. – это наукоёмкие проекты, связанные с электроникой. ДЦВ развивает мониторинг и исследования, разработку и совершенствование технических средств тягового подвижного состава, модернизирует устаревшее оборудование, выполняет капитальный ремонт с продлением срока службы электронных систем локомотива, занимается экспертизой и диагностикой электроники, наукоемких схемных электрических систем локомотива. В ДЦВ разработана и внедрена, в замену аналоговых БУВИП, микропроцессорная система управления МСУЭ для электровозов ВЛ80Р и ВЛ80ТК. Разработан бортовой регистратор МСУ электровоза. ДЦВ занимается совершенствованием ВИП, разработкой стендового оборудования. В ДЦВ получены патенты на «Усовершенствованный преобразователь электровозов ВЛ85, ВЛ80р», «Выпрямительно-инверторный преобразователь, усовершенствованный ВИП-4000 (ВИП-У)», «Устройство для повышения коэффициента мощности ВИП», «Способ управления многозонным ВИП переменного тока» и др.

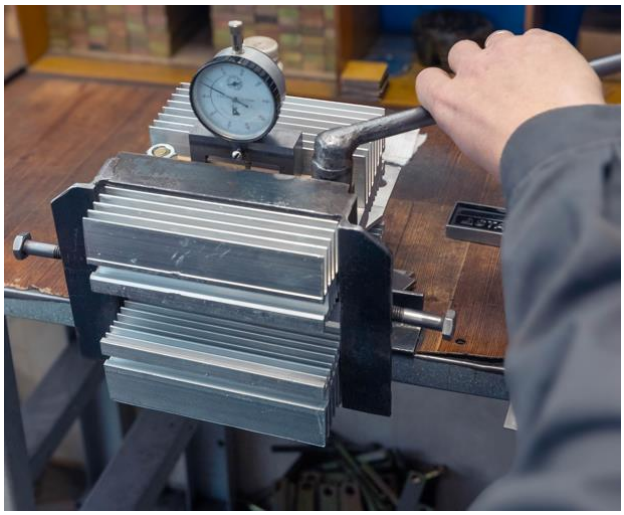
Свою научно-практическую деятельность ДЦВ ведёт во взаимодействии со многими отраслевыми производителями электронного оборудования тягового подвижного состава (ТПС), конструкторскими и технологическими подразделениями заводов: «Электровыпрямитель», НЭВЗ, ЛЭС, КСК, группы компаний АО «ТМХ». Активно ведёт работу с вузами, прежде всего ДВГУПС, ИрГУПС, ОмГУПС, РУТ.

Несмотря на множество направлений работы ДЦВ отраслевой направленности, главным направлением деятельности ДЦВ Красноярской ж.д. постепенно стало техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) электронного оборудования тягового подвижного состава ОАО "РЖД" (рисунки 6, 7). ДЦВ является технологическим партнером компаний «ЛокоТех», «ЛокоТех-Сервис», «Желдорремаш», «Трансмашхолдинг», «Электровыпрямитель», НЭВЗ, ЛЭС и многих других.

В технологический процесс ремонта внедрены автоматизированные стенды для испытания, диагностирования и сортировки силовых тиристоров ВИП, который позволяет автоматизировать формирование в плечи ВИП. Многое оборудование уникально и изготовлено по заказу (техническому заданию) ДЦВ Красноярской ж.д.

Участок сборки ВИП ДЦВ Красноярской ж.д.

Тиристоры после тестирования



Сборка тиристоров с радиатором

Испытательно-наладочные стенды

Технологическое оборудование подготовки тиристоров

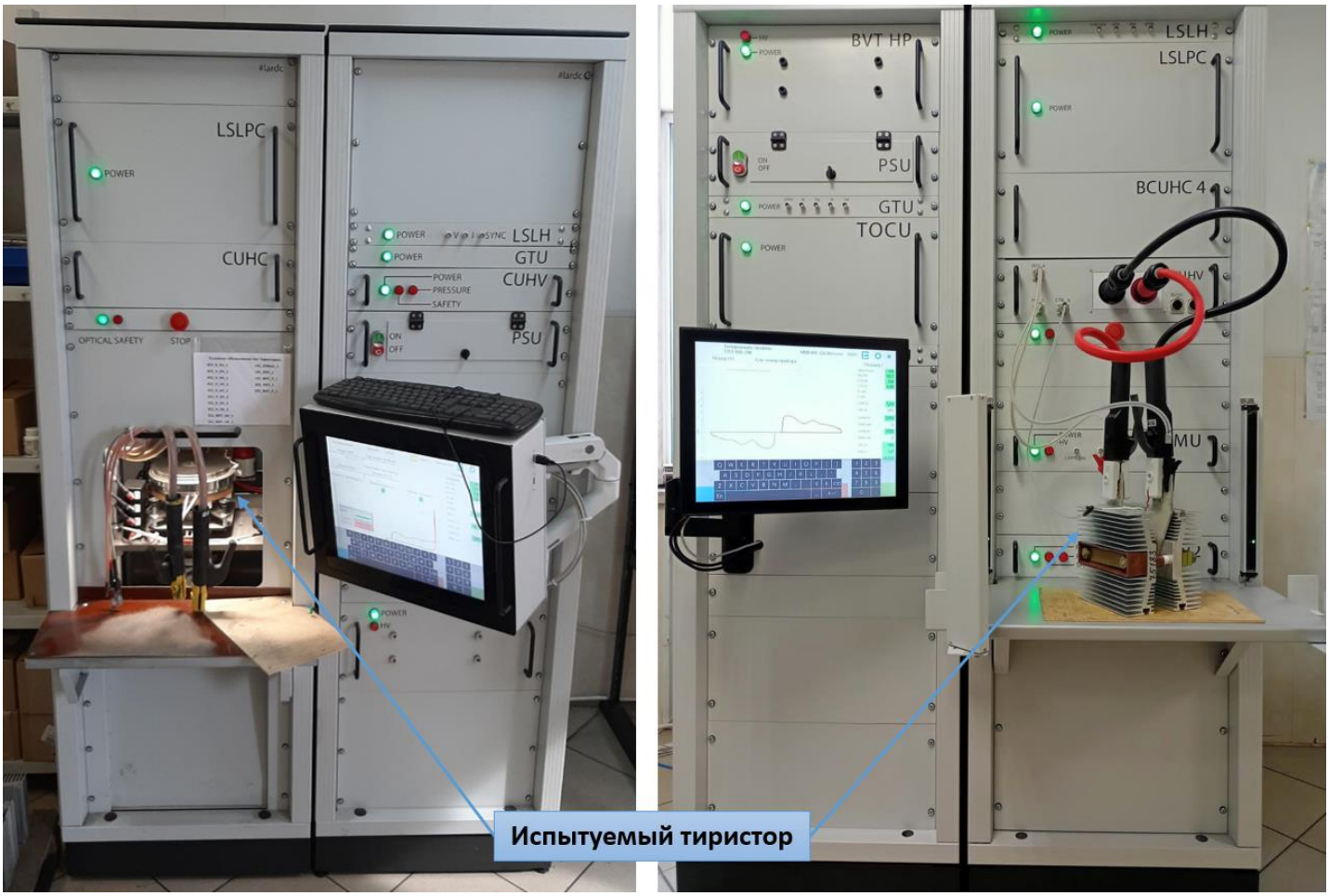
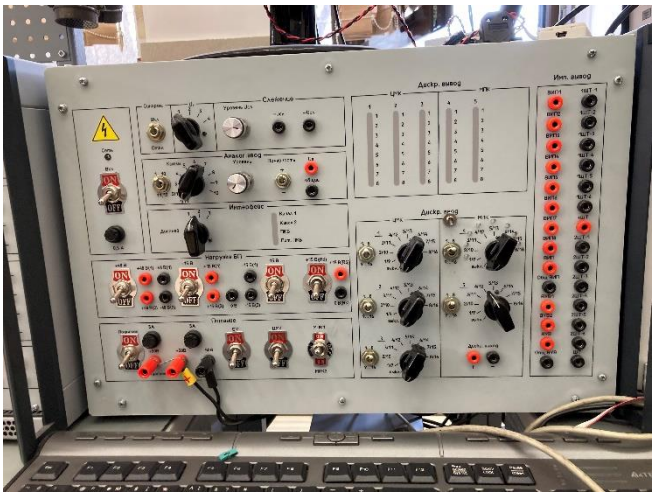


Рисунок 6 *– Базовый опорный сервисный центр ремонта ВИП электровозов Восточного полигона в городе Боготоле*

Сервисные участки ДЦВ выполняют работы с непрерывным циклом ТОиР электронного оборудования электровозов Восточного полигона ОАО "РЖД": Красноярская, Восточно-Сибирская, Забайкальская, Дальневосточная железные дороги. Штат работников – высококвалифицированные специалисты, обладающие уникальной технологией и компетенциями. На текущий момент, ДЦВ Красноярской ж.д. является значимым стратегическим ресурсом ОАО "РЖД".



Технологическое оборудование

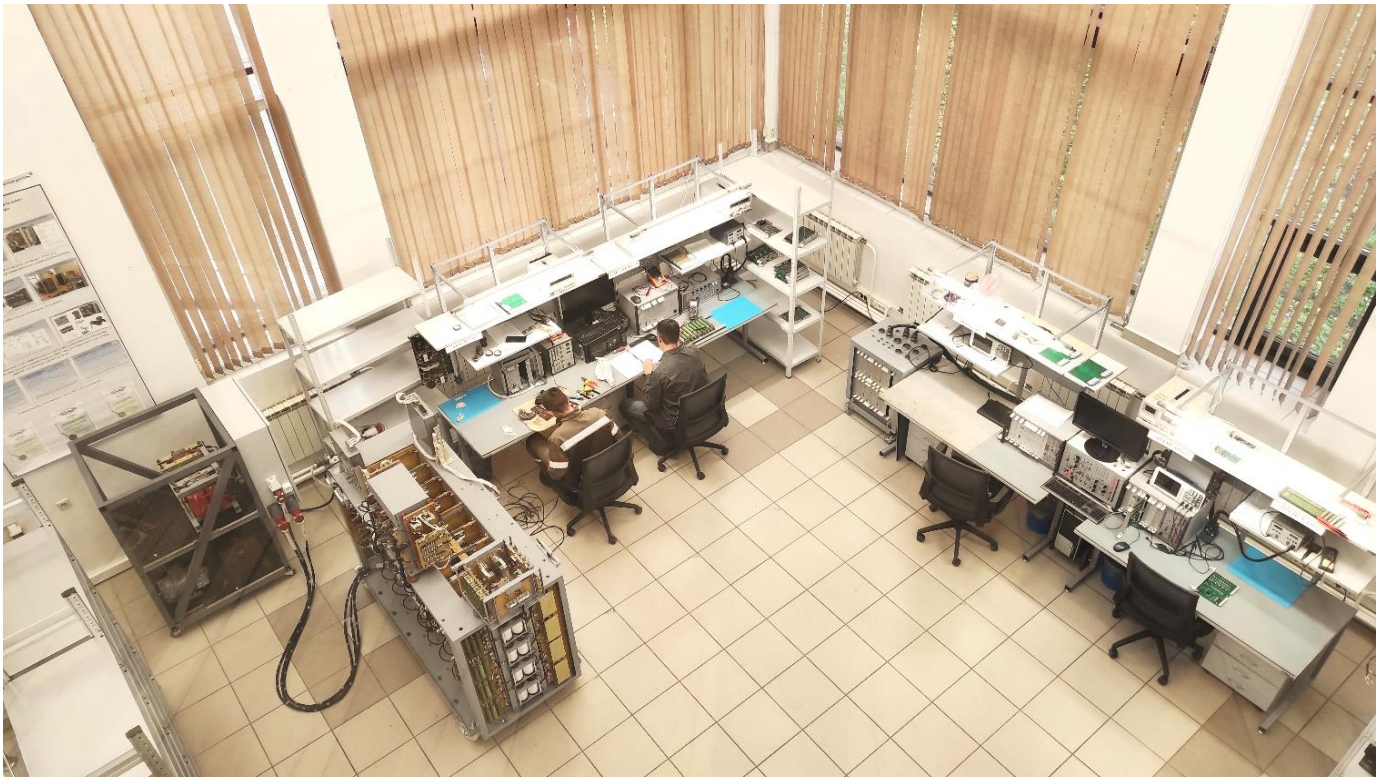


Рисунок 7 *– Базовый опорный сервисный центр ремонта микропроцессорных систем управления электровозов Восточного полигона в городе Красноярске*

АО «ДЦВ Красноярской ж. д.» в своей структуре имеет 7 сервисных участков, опорных пунктов на сетевых ПТОЛ железных дорог ОАО «РЖД» Восточного полигона, с центральным оперативно-проектным офисом и базовым сервисным центром по ремонту микропроцессорной электроники в городе Красноярске. Базовый производственно-технологический центр ДЦВ находится в городе Боготоле на производственной площадке в СЛД «Боготол-Сибирский».

В ДЦВ создан филиал – базовый сервисный центр для обслуживания и ремонта ВИП на базе СЛД «Боготол-Сибирский». Приобретено наукоемкое, стендовое: диагностическое, технологическое оборудование и оснастка для ремонта выпрямительных преобразователей всех модификаций, их диагностирования и ремонта тиристорных блоков ВИП с помощью компьютерного АРМ – комплекс измерения параметров силовых полупроводниковых приборов (КИП СПП-404). На базе этого же депо и в Красноярске (см. рисунок 6) созданы центры диагностирования и ремонта микропроцессорного оборудования локомотивов. В эти центры поступают отказавшие (неисправные, отклонения технических параметров) электронные блоки со всех опорных центров, куда взамен отправляются исправные ремонтные комплекты, для оперативного крупно-агрегатного ремонта электроники на линии.

Многолетний опыт организации ТОиР электронного оборудования, накопленный в ДЦВ Красноярской ж.д. является уникальным и значимым для нужд локомотивного хозяйства ОАО «РЖД».

АО «ДЦВ Красноярской ж.д.» (ДЦВ) является единственной сервисной компанией по обслуживанию и ремонту электронного оборудования электровозов переменного тока на сети железных дорог ОАО «РЖД». При этом показатели надёжности электронного оборудования электровозов у ДЦВ самые высокие по сети железных дорог.

МОДЕЛЬ ТОиР ДЦВ КРАСНОЯРСКОЙ Ж.Д.

Реализованная в ДЦВ во исполнение решения НТС ОАО «РЖД» (протокол № 3 от 16.02.2012) модель сервиса электроники электровозов Восточного полигона имеет высокую эффективность и значимость в обеспечении бесперебойного перевозочного процесса ОАО «РЖД».

Современное оборудование локомотивов является сложным и наукоёмким. Существовавшая со времён паровозов технология ТОиР морально устарела. Шутка «на паровозе пять минут ищешь отказ и час ремонтируешь, а на электровозах час ищешь отказ и 5 минут ремонтируешь» отражает суть проблемы: диагностика и ремонт требуют высокой квалификации персонала, использование дорого диагностического и технологического оборудования. Создать такие центры ТОиР в каждом депо и по каждому виду оборудования – практически нерешаемая задача.

Один из выходов из сложившейся ситуации – крупно-агрегатный способ ремонта. В этом случае при ремонте диагностировать место отказа надо с точностью до

заменяемого узла с его заменой на исправный с дальнейшим ремонтом отказавшего оборудования на специализированном стенде. Именно по такому пути пошёл ДЦВ Красноярской ж.д., создав свою модель ТОиР электронного оборудования на Восточном полигоне железных дорог (рисунок 8).

Изначально модель технического обслуживания и ремонта (ТОиР) электронного и микропроцессорного оборудования электровозов переменного тока с плавным регулированием силы тяги ВИП под управлением микропроцессорных систем управления и диагностики (МСУ, МСУД) разработана и проектировалась как универсальная система ТОиР с технологическим охватом обслуживания и ремонта электронного оборудования сети железных дорог Восточного полигона для ТПС на переменном токе.

Концептуальная цель решения задачи: иметь на сети железных дорог ОАО «РЖД» единый профильный Сервисный центр обладающий уникальными компетенциями, кадровым высококвалифицированным персоналом, функция которого – содержать электронное оборудования электровоза в работоспособном, исправном состоянии, обеспечить переходным, неснижаемым запасом Сетевые пункты технического обслуживания локомотивов (ПТОЛ) электронными компонентами – ремонтными комплектами, для обслуживания электронного оборудования электровозов в эксплуатации на линии.

Разработанная модель ТОиР Восточного полигона позволила получить самую высокую по сети железных дорог надёжность электронного оборудования электровозов, полностью исключить «тяжелые отказы» - сквозные пробои ВИП.

Объемный анализ сервиса ДЦВ показывает высокую его эффективность в содержании, парка электровозов железных дорог ОАО «РЖД» Восточного полигона, исправном состоянии.

За 12 месяцев 2024 года по обособленным подразделениям АО «ДЦВ Красноярской ж.д.» Восточного полигона объем технического обслуживания электровозов переменного тока составил 242 851 секций (рисунок 9). Обеспечение технического обслуживания МСУ тягового подвижного состава Восточного полигона, сервисными участками АО «ДЦВ Красноярской ж.д.» по сериям электровозов за 12 месяцев 2024 года приведено в таблице 1 и рисунке 10.

Таким образом, статистика отказов и надёжности ВИП и МСУД на Восточном полигоне наглядно подтверждает эффективность предложенной модели сервисного ТОиР, реализованной согласно современным методическим подходам систем менеджмента качеством (СМК) [6, 7].

Объём восстановительного ремонта за 2024 год в обособленных подразделениях ДЦВ на сетевых ПТОЛ Восточного полигона составил 6 216 отказов (таблица 2).

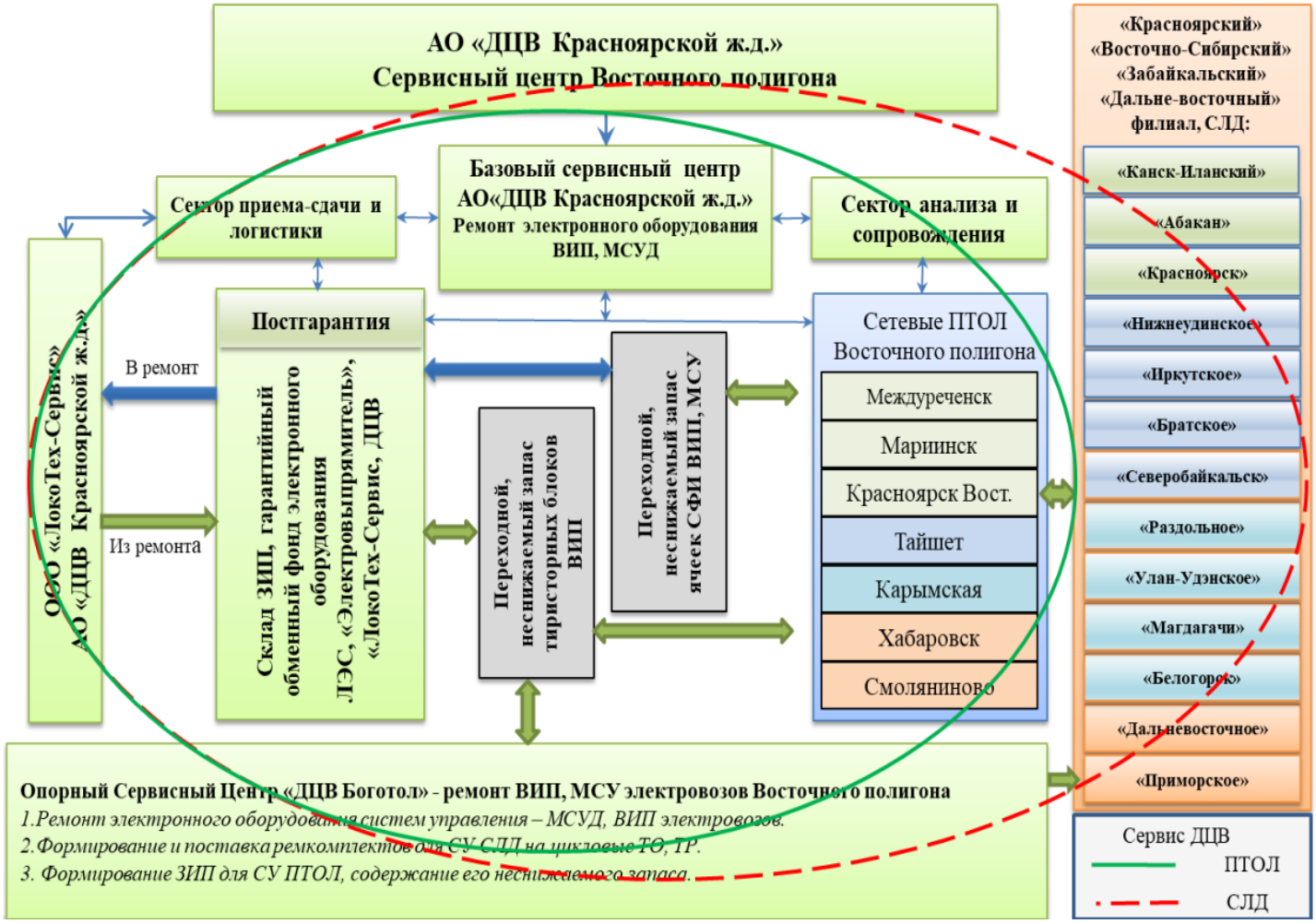


Рисунок 8 *– Модель сервиса электронного оборудования электровозов Восточного полигона на базе ДЦВ Красноярской ж.д.*

Рисунок 9 *– Выполненный объем ТО электронного оборудования электровозов (секции) на Восточном полигоне железных дорог ОАО «РЖД».*

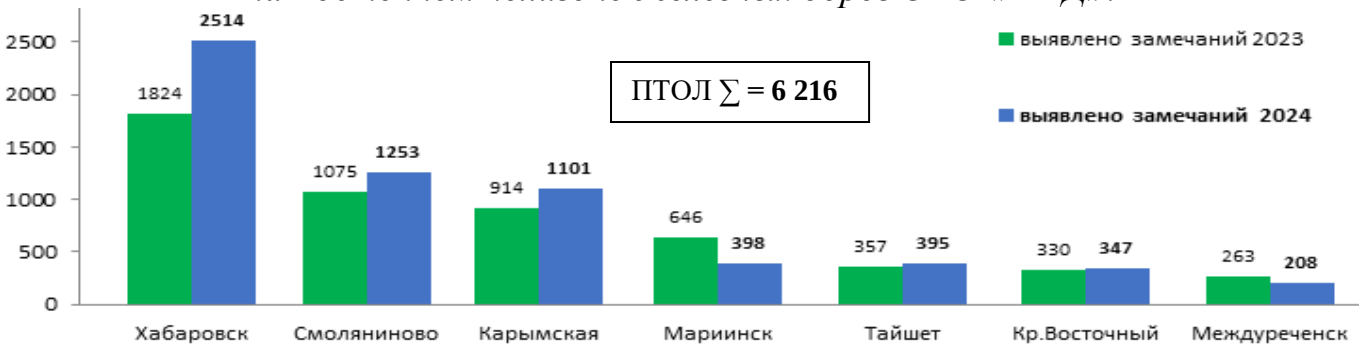


Рисунок 10 *– Распределение замечаний по ПТОЛ Восточного полигона*

Таблица 1 *– Обеспечение ТОиР МСУ электровозов Восточного полигона в 2024 г.*

Серия	Карымская	Хабаровск	Смоляни-ново	Мариинск	Тайшет	Между-реченск	Красноярск Восточный	Итого:
ВЛ80Р	9122	0	0	7683	5554	2215	4073	**28647**
ВЛ85, ВЛ65	10518	0	0	7287	6614	0	3111	**27530**
ВЛ80ТК(СК)	0	0	0	246	1029	708	189	**2172**
2(3,4)ЭС5К	54752	42287	42722	14871	11797	6492	4582	**177503**
Э5К	77	299	152	4	87	5	3	**627**
ЭП1	437	2051	39	2727	1108	10	0	**6372**
Итого:	**74906**	**44637**	**42913**	**32818**	**26189**	**9430**	**11958**	**242851**

Таблица 2 *– Распределение выявленных отказов 3-го вида на ПТОЛ Восточного полигона по сериям электровозов за 2024 г.*

Серия эл-за	Крымская	Хабаровск	Смоляни-ново	Мариинск	Тайшет	Междуреченск	Красноярск Восточный	Итого:
ВЛ80Р	181	0	0	104	88	48	137	**558**
ВЛ85, ВЛ65	274	0	0	94	102	0	114	**584**
ВЛ80ТК(СК)	0	0	0	11	50	70	16	**147**
2(3,4)ЭС5К	629	2254	1241	95	123	88	79	**4509**
Э5К	1	32	10	0	2	1	1	**47**
ЭП1	16	228	2	94	30	1	0	**371**
Итого:	**1101**	**2514**	**1253**	**398**	**395**	**208**	**347**	**6216**

Устранение выявленных предотказных состояний электронных систем локомотивов сервисными участками ДЦВ на ПТОЛ способствует повышению надежности локомотивов в целом, что подтверждается анализом (рисунок 11).

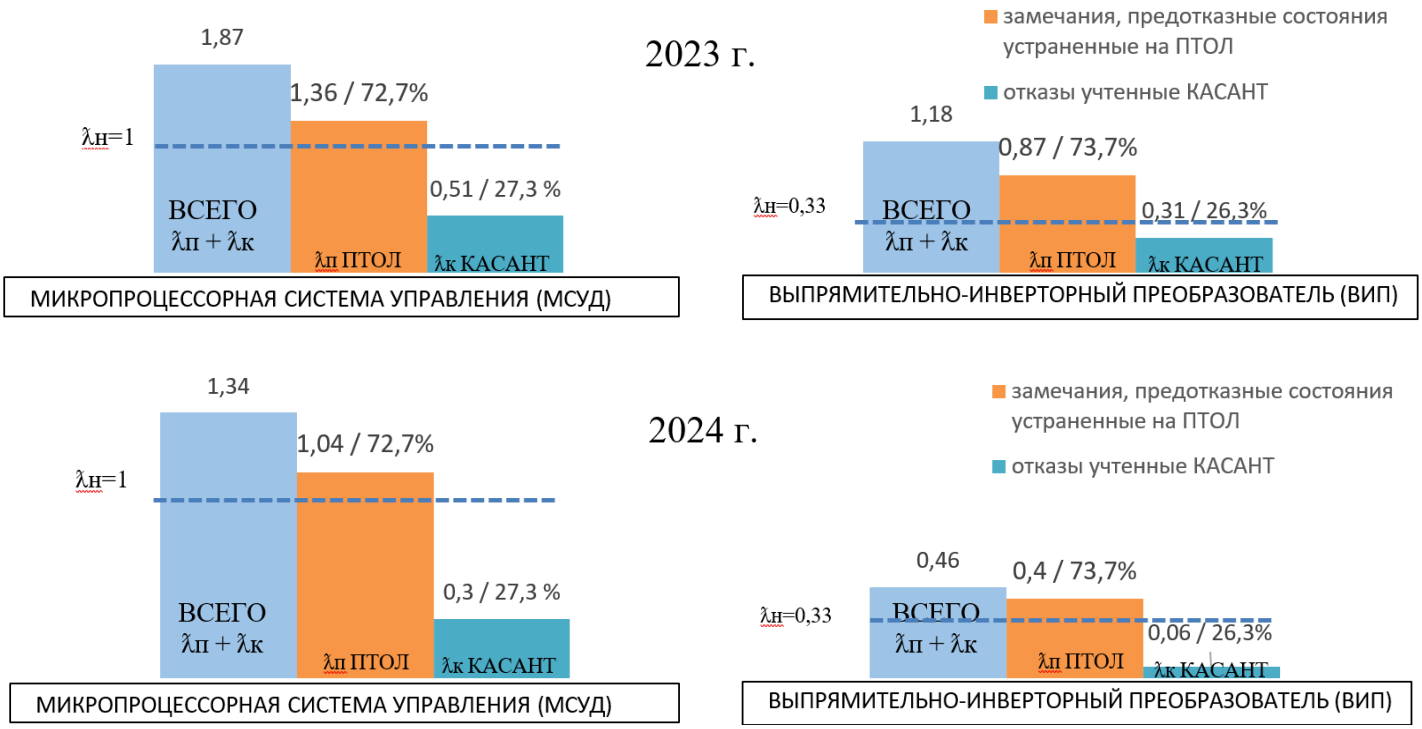


Рисунок 11 *– Отказы электронного оборудования Восточного полигона*

где: *λн – нормативная интенсивность отказов на 1 млн км;*
λф - фактическая интенсивность отказов на 1 млн км.

ВЫВОДЫ

Электронное оборудование тягового подвижного состава является значимой – ключевой составляющей безопасности движения железных дорог. Разработанная в Дорожном центре внедрения Красноярской железной дороги сервисная модель технического обслуживания и ремонта (ТОиР) электронного и микропроцессорного оборудования электровозов переменного тока ориентирована на обеспечение коэффициента технической готовности (КТГ) локомотива, бесперебойную работу тягового подвижного состава приписного парка железных дорог ОАО «РЖД», поддержания его нормативного коэффициента готовности в эксплуатации (КГЭ). АО «ДЦВ Красноярской ж.д.» является единственной сервисной компанией по обслуживанию и ремонту электронного оборудования электровозов переменного тока на сети железных дорог ОАО «РЖД».

Реализованная в ДЦВ во исполнение решения НТС ОАО «РЖД» (протокол № 3 от 16.02.2012) модель сервиса электроники электровозов Восточного полигона имеет высокую эффективность и значимость в обеспечении бесперебойного перевозочного процесса ОАО «РЖД».

Опорный сервисный центр – филиал АО «ДЦВ Красноярской ж.д.» создан в базовом сервисном ремонтном локомотивном депо «Боготол-Сибирский» компании «ЛокоТех» и является самым передовым центром сервисного обслуживания электронного оборудования на всей сети железных дорог ОАО «РЖД» и обеспечивает полный цикл работ ТОиР электронного оборудования электровозов переменного тока производства НЭВЗ на сетевых ПТОЛ железных дорог ОАО «РЖД» Восточного полигона. С помощью сервисной модели ДЦВ удалось добиться значительного технико-экономического эффекта как в плане повышения технической надежности работы электронного оборудования локомотива в целом, так и в плане уменьшения себестоимости ТОиР за счет уменьшения случаев пересылки неисправных электровозов с линии в ремонтное депо на восстановительные ремонты.

Опыт ДЦВ Красноярской ж. д.: «Организация ТОиР электронного силового и микропроцессорного оборудования электровозов переменного тока с выпрямительно-инверторными преобразователями» является значимым и уникальным для нужд перевозочного процесса и приемлемым для тиражирования, реализации его на сети железных ОАО «РЖД».

Охват полным сервисом ТОиР электронного оборудования с единым центром ответственности обеспечивает высокую надёжность работы электронного оборудования локомотивов. Как результат – высокий коэффициент готовности (КГЭ) локомотива в целом на высоком уровне.

Таким образом, методический подход Дорожного центра внедрения Красноярской железной дороги (ДЦВ Красноярской ж.д.) создания полигонных опорных центров с высокотехнологичным оборудованием и высоко-квалифицированными кадрами для обслуживания, диагностирования, испытания, восстановления работоспособности и комплектования рем. комплектов для опорных пунктов на базе ПТОЛ для осуществления крупно-агрегатного ТОиР является перспективным, подтвердившим свою эффективность за длительный период времени эксплуатации и вероятностно-статистического анализа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электронное оборудование электровоза ВЛ80Р. Ремонт и техническое обслуживание / Горбань В. В., Донской А. Л., Шабалин Н. Г. – М.: Транспорт, 1984, 184 с.
2. Шабалин, Н. Г. Организация эксплуатации и технического обслуживания тягового подвижного состава с использованием современных информационных технологий: 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Шабалин Николай Григорьевич, Московский государственный университет путей сообщения. – Москва, 1999. – 171 с. – Текст : непосредственный.
3. Семченко, В. В. Диагностирование систем управления электровозов переменного тока с тиристорными преобразователями: 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук, Дальневосточный университет путей сообщения – Хабаровск: 2010, 199 с. – Текст : непосредственный.
4. Лакин, И. К. Разработка теории и программно-технических средств комплексной автоматизированной справочно-информационной и управляющей системы локомотивного депо: специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Лакин Игорь Капитонович. – Москва, 1997. – 377 с. – Текст : непосредственный.
5. Дорожный центр внедрения Красноярской железной дороги. 20 лет. – Красноярск: ДЦВ Красноярской ж.д., 2020 – 120 с., 249 фотографий, 54 рис.
6. Деминг, Э. Выход из кризиса: Новая парадигма управления людьми, системами и процессами / Э. Деминг. – Пер. с англ. – Москва : Альпина Бизнес Букс, 2007. – 370 с. – Текст : непосредственный.
7. Джонс, Дэниэл Бережливое производство. Как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании / Дэниел Джонс, Джеймс Вумек – Москва : Альпина Паблишер, 2020, 472 с. – Текст : непосредственный.

Дорожный центр внедрения
Красноярской железной дороги
(ДЦВ Красноярской ж.д.)

Семченко Виктор Васильевич:
к.т.н., генеральный директор.

УДК: 629.423.32 ГРНТИ: 73.29.71

А. В. Ставцев

СОВРЕМЕННЫЕ СИЛОВЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Аннотация. *Силовые полупроводниковые приборы играют ключевую роль в современных тяговых приводах железнодорожного транспорта и системах собственного электроснабжения поездов. Преобразователи, используемые в железнодорожной отрасли, оснащаются мощными полупроводниковыми приборами. Эволюция элементной базы — от простых диодов и тиристоров до биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT) и современных транзисторов на основе широкозонных материалов, таких как карбид кремния (SiC) и нитрид галлия (GaN), — позволила существенно повысить энергоэффективность, точность регулирования и надежность преобразовательной техники [1]. Новые полупроводниковые технологии обеспечивают более высокую эффективность и плотность мощности по сравнению с традиционными кремниевыми компонентами [2]. Железнодорожный сектор активно стимулирует спрос на такие инновации, что обусловлено стремлением к энергосбережению и снижению стоимости жизненного цикла. Параллельно с развитием новых технологий возрастают требования к надежности силовых приборов. Железнодорожный транспорт характеризуется длительным сроком службы подвижного состава и экстремальными условиями эксплуатации, включая электрические перегрузки, вибрации и значительные перепады температуры окружающей среды. В связи с этим вопросы устойчивости приборов к многократным термоциклам, методы ускоренных испытаний и модели прогнозирования ресурса становятся ключевыми при проектировании и производстве силовых полупроводниковых приборов. В данной статье представлен расширенный обзор современных силовых полупроводниковых приборов, применяемых в железнодорожной технике, с акцентом на энергоэффективность, надежность, долговечность и снижение стоимости жизненного цикла. Проведено сравнение различных технологий, включая тиристоры, IGBT и SiC MOSFET.*

Ключевые слова: *Силовые полупроводниковые приборы, тиристоры, IGBT, SiC MOSFET, железнодорожный транспорт.*

Тенденции развития преобразовательной техники для ЖДТ

Железнодорожный электрический транспорт играет ключевую роль в экономическом, социальном и техническом развитии мирового сообщества. Он обеспечивает грузовые и пассажирские перевозки, способствует развитию городов и промышленности, а также представляет собой экологичную и энергоэффективную альтернативу другим видам транспорта. Кроме того, железнодорожный транспорт является драйвером научно-технического прогресса в широком спектре отраслей промышленности. В последние десятилетия железнодорожный транспорт развивается стремительными темпами. Современные проекты в этой области ориентируются на следующие направления:

- Высокоскоростные поезда;
- Водородные, гибридные и полностью электрические локомотивы;
- Бесшумный городской электротранспорт (метро, трамваи, электрички);
- Поезда на магнитной подушке.

Все эти сегменты требуют использования эффективных, компактных, легких и надежных тяговых преобразователей и преобразователей собственных нужд, способных работать при высоких напряжениях и повышенных частотах коммутации. К создаваемым образцам преобразовательной техники предъявляются следующие требования:

- Повышение надежности и срока службы;
- Снижение стоимости жизненного цикла и эксплуатационных расходов;
- Увеличение КПД и энергоэффективности в целом;
- Уменьшение массогабаритных показателей;
- Минимизация негативного воздействия на качество электроэнергии питающей сети.

Ключевым элементом преобразовательной техники являются силовые полупроводниковые приборы, которые во многом определяют их базовые характеристики. Таким образом, потенциал и развитие силовых полупроводниковых приборов напрямую влияют на технические возможности преобразователей для железнодорожного транспорта и, в конечном итоге, на характеристики подвижного состава в целом.

Требования к современным силовым полупроводниковым приборам

Исходя из требований, предъявляемых к современной преобразовательной технике для железнодорожного транспорта, формируются соответствующие требования к силовым полупроводниковым приборам, используемым в этой отрасли. Одним из ключевых требований является повышение плотности тока, которое достигается за счёт снижения динамических и статических потерь, увеличения максимальных рабочих температур и улучшения тепловых характеристик приборов.

Кроме того, для улучшения потребительских свойств преобразовательной техники необходимо повышение частоты коммутации, что требует снижения паразитных индуктивностей в конструкции приборов и оптимизации распределения токов по токоведущим цепям.

Не менее важным требованием является повышение ресурса и надёжности приборов. В условиях интенсивной эксплуатации железнодорожного транспорта долговечность и стабильность работы силовых полупроводниковых приборов становятся критически важными параметрами.

Современные тенденции также включают требования к повышению степени интеграции, что позволяет создавать более компактные и функциональные устройства. При этом разработка кастомизированных решений под конкретные задачи железнодорожной отрасли становится всё более востребованной, обеспечивая оптимальное сочетание характеристик и стоимости. Наконец, снижение стоимости удельной мощности остаётся важным экономическим требованием, позволяющим

внедрять передовые технологии без значительного увеличения затрат. Это особенно актуально для массового применения в железнодорожной инфраструктуре.

Таким образом, современные силовые полупроводниковые приборы для железнодорожной отрасли должны сочетать высокую эффективность, надёжность, компактность и экономичность, что требует постоянного совершенствования технических решений и технологии их производства.

Классические решения на тиристорах

Несмотря на доминирование транзисторных технологий в современных технических решениях, тиристоры не утратили своей актуальности и продолжают использоваться в силовых системах железнодорожного транспорта. Во-первых, значительное количество эксплуатируемой техники оснащено тиристорными преобразователями. Например, в России и странах СНГ до сих пор работают тысячи электровозов постоянного тока с тиристорными регуляторами. Эти системы зарекомендовали себя как надежные и легко ремонтируемые, а внедрение техники на основе IGBT происходит постепенно, по мере износа существующего парка или при необходимости повышения эффективности. Во многих случаях тиристорные схемы остаются простыми, хорошо освоенными и экономически выгодными в эксплуатации.

Тиристоры классического типа также активно применяются во вспомогательных узлах и инфраструктуре железных дорог. Например, в выпрямительных блоках тяговых подстанций для питания контактной сети постоянного тока предпочтение отдается мощным кремниевым тиристорам и диодам, благодаря их высокой эффективности и надежности. Там, где не требуется быстрого переключения, и коммутация может осуществляться за счет перехода тока через ноль, тиристоры остаются оптимальным решением по соотношению цена/потери. Кроме того, тиристоры используются в устройствах плавного пуска и рекуперативного торможения электропоездов на постоянном токе. Например, схема рекуперации может включать полууправляемые тиристоры, которые возвращают избыточную энергию обратно в контактную сеть или направляют её на тормозной резистор. Еще одно важное применение – защитные устройства: тиристоры могут функционировать в качестве электронных предохранителей или коммутаторов, отключая цепь при превышении допустимого тока. В новых составах такие функции часто выполняют быстродействующие выключатели на основе IGBT (Solid State Circuit Breaker), однако тиристорные аналоги (TSCB) также существуют и могут быть более надежными, поскольку тиристор в открытом состоянии обладает крайне низким сопротивлением и способен выдерживать огромные импульсные токи (десятки кА) в течение короткого времени.

Производители продолжают совершенствовать характеристики тиристоров. Современные быстродействующие тиристоры обладают сокращенным временем выключения, что расширяет область их применения. Появились тиристоры с элементами самозащиты, способные корректно переключаться при превышении предельного значения dV/dt, перенапряжении или приложении повторного напряжения в момент неполного восстановления. Также разработаны тиристоры с повышенной устойчивостью

к циклическим нагрузкам. Таким образом, тиристоры остаются важной частью силовой электроники железных дорог, хотя их применение ограничивается более узкими сегментами: либо в существующем парке, где их ресурс еще не исчерпан, либо в специализированных задачах, требующих уникальных свойств (например, способности выдерживать сверхбольшие перегрузочные токи). В целом наблюдается тенденция к замене тиристорной техники на решения с использованием IGBT/SiC там, где это экономически и технически оправдано. Однако для некоторых задач классические тиристоры еще долгое время будут использоваться параллельно с современными технологиями.

Сравнение технических решений на основе тиристоров с современными подходами на базе IGBT, SiC и GaN MOSFET

Тиристоры

Различные поколения силовых приборов обладают уникальными преимуществами и ограничениями, которые определяют их область применения в тяговых приводах. Тиристоры были основой тяговой электроники в 1970–1990-х годах. Тиристор имеет четырёхслойную структуру p-n-p-n и управляется токовым импульсом на управляющем электроде. После открытия он остается в проводящем состоянии до тех пор, пока анодный ток не снизится до нуля. Это означает, что обычный тиристор не может самостоятельно отключаться – для этого требуется либо естественная коммутация от сети, либо использование внешних цепей принудительного гашения.

Достоинства тиристоров

1. Высокая устойчивость к токовым перегрузкам: Тиристоры способны выдерживать значительные токи короткого замыкания, что делает их надежными в условиях возникновения нештатных ситуаций.

2. Низкие статические потери: В открытом состоянии тиристоры имеют минимальные потери, что повышает их энергоэффективность. В проводящем состоянии тиристор ведет себя как диод с малым падением напряжения (~1,5–2 В), тогда как у IGBT падение напряжения насыщения может составлять 2–3 В. Это обеспечивает более высокий КПД в мощных системах с относительно низкой частотой коммутации, где тиристоры демонстрируют меньшие потери на проводимость.

3. Высокая циклостойкость и ресурс: Тиристоры обладают длительным сроком службы и устойчивостью к многократным температурным циклам.

4. Надежность и отработанность решений: благодаря многолетнему опыту применения, схемы на основе тиристоров хорошо изучены и отличаются высокой надежностью.

Ограничения тиристоров

1. Низкая частота коммутации: Тиристоры не способны работать на высоких частотах, что ограничивает их применение в современных высокочастотных системах.

2. Необходимость сложных схем управления: для отключения тиристоров требуются дополнительные цепи, что усложняет конструкцию и увеличивает стоимость системы.

3. Высокие динамические потери: при переключении тиристоры теряют значительное количество энергии, что снижает общую эффективность системы.

4. Низкая скорость переключения: В схемах на тиристорах невозможно быстро изменить режим работы, что приводит к заметным пульсациям тока и необходимости использования больших сглаживающих реакторов.

Линейка отечественных тиристоров охватывает диапазон напряжений от 800 В до 6500 В с возможностью расширения до 8000 В. Средние токи варьируются от нескольких сотен до нескольких тысяч ампер. Приборы выпускаются в прижимной конструкции в модульном, таблеточном и штыревом исполнениях. Помимо низкочастотных тиристоров, адаптированных для групповой работы в последовательно-параллельных схемах, существуют также высокочастотные тиристоры, которые применяются в подвижном составе железнодорожного транспорта.

Линейка отечественных тиристоров и диодов на примере продукции компании АО "Протон-Электротекс" приведена на рисунках 1 и 2.

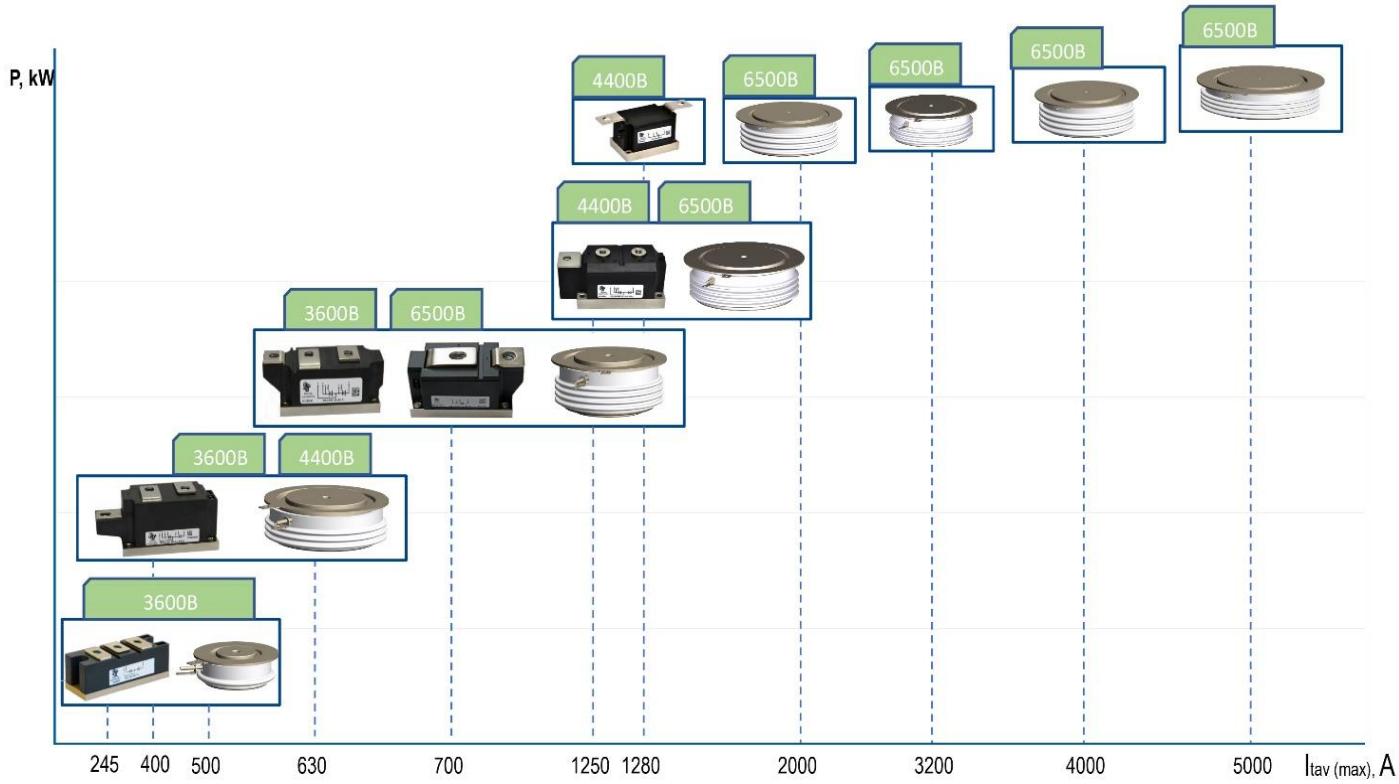


***Рисунок 1**. Часть линейки отечественных силовых тиристоров на примере продукции компании АО "Протон-Электротекс"*

IGBT

Биполярные транзисторы с изолированным затвором IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) совершили качественный скачок в тяговой электронике начиная с 1990-х годов. IGBT представляет собой трехслойный прибор (p-n-p) с MOSFET-структурой управления затвором, объединяющий достоинства биполярного транзистора (высокая токовая нагрузочная способность, низкое напряжение насыщения) и MOSFET (высокое входное сопротивление, управление напряжением). В отличие от тиристора, IGBT – полностью управляемый ключ, способный включаться и выключаться по сигналу затвора

в любое время, независимо от тока через него. Это упрощает управление током и позволяет работать на значительно более высоких частотах.

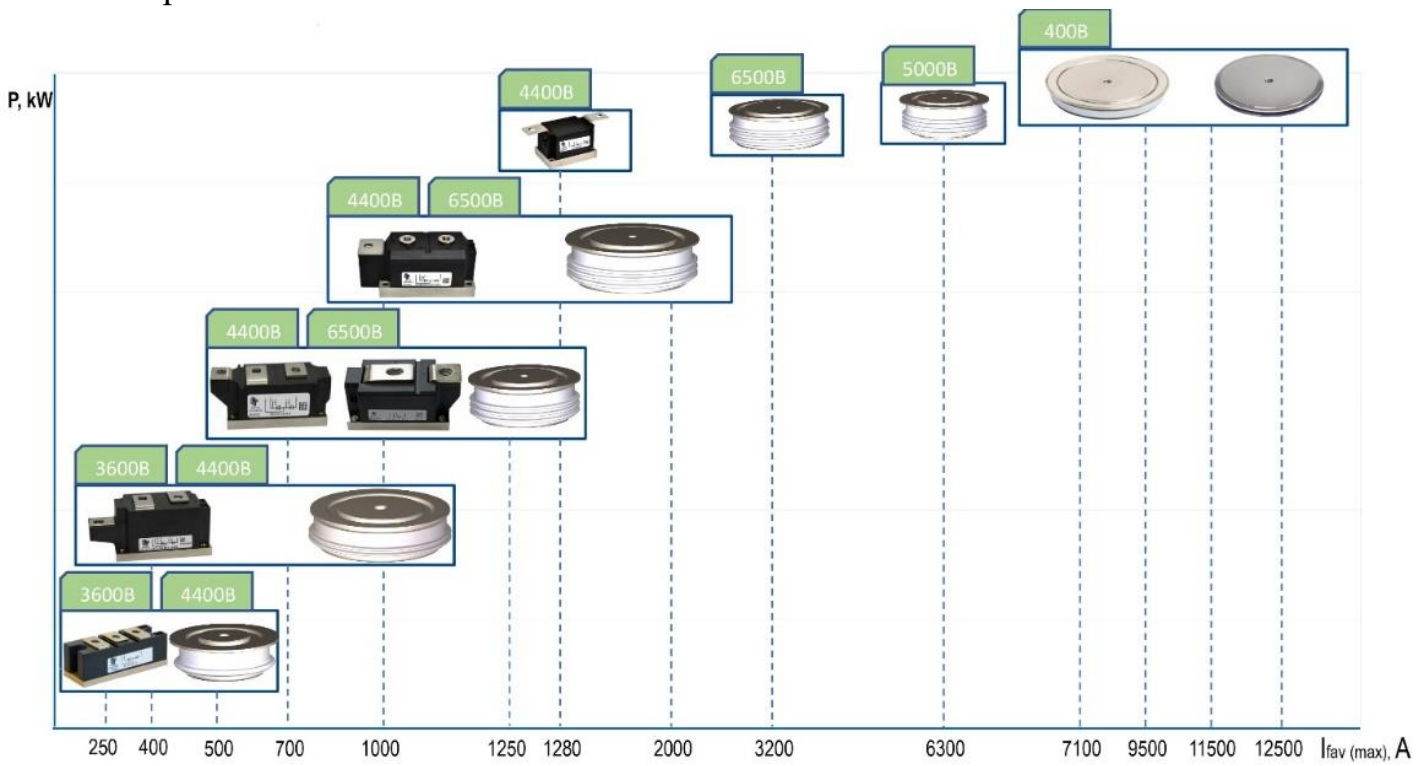


***Рисунок 2**. Часть линейки отечественных силовых диодов на примере продукции компании АО "Протон-Электротекс"*

Достоинства IGBT:

- Высокая частота коммутации. IGBT может переключаться на частоте до нескольких килогерц. Благодаря этому тяговые инверторы на IGBT формируют ток почти синусоидальной формы с минимальными пульсациями, что улучшает плавность хода, снижает нагрев двигателей и акустический шум. Также более высокая частота ШИМ позволяет использовать двигатели без массивных сглаживающих дросселей.

- Простота реализации схем и монтажа. Модули IGBT с изолированным основанием достаточно легко монтировать на охладитель и подключать к ним силовые шины. Не требуются сложные и массивные снабберные цепи, обязательные для тиристоров. Кроме того, IGBT-модули легко включать параллельно для увеличения тока и последовательно для повышения напряжения, практически без сложных согласующих цепей (достаточно небольших RC-фильтров для равномерного распределения напряжения) [1]. Это существенно облегчает создание многоуровневых и многомодульных систем.

- Защищенность от аварий. IGBT обладает встроенной способностью ограничивать ток при коротком замыкании. В режиме КЗ транзистор входит в насыщение и удерживает ток на уровне порядка 5 номиналов, после чего за десятки микросекунд может быть выключен сигналом затвора. Таким образом, IGBT способен пережить короткое замыкание без разрушения, в то время как для тиристорных схем необходимы специальные быстрые предохранители или разрядники, иначе прибор выходит из строя. Это свойство существенно повышает надежность и живучесть тяговых преобразователей с IGBT.

- Низкие динамические потери. Относительно низкие динамические потери IGBT позволяют их использовать на повышенных частотах и эффективно организовывать отвод выделяемого тепла.

- Высокая плотность мощности. По совокупности факторов IGBT модули дают возможность построить более эффективные преобразователи по плотности мощности - Решения на IGBT обладают меньшими размерами и массой при одинаковой мощности преобразователя по сравнению с решениями на тиристорах.

Ограничения IGBT

- Ограниченная перегрузочная мощность в режиме короткого замыкания – тиристоры выдерживают токи перегрузки в несколько десятков крат по отношению к номиналу, в отличии от IGBT, которые выдерживают порядка 5 кратное превышение тока и в случае затруднений с выключением транзистора в данном режиме возможен выход его из строя.

- Относительно низкая циклостойкость. Более низкая циклостойкость и ресурс IGBT приборов в массовом модульном исполнении с изолированным основанием по сравнению тиристорами прижимной конструкции.

- Высокие статические потери. Что не позволяет построить эффективное техническое решение, где преобладают статические режимы работы.

В преобразователях собственных нужд применяются IGBT приборы на 1200В и 1700В. В основном применяется решение на 1700В.

В тяговом преобразователе востребованы транзисторы:

- 1700В - преимущественно для метрополитена;

- 3300В - тепловозы и электровозы, в том числе построенные по многоуровневой схеме;

- 4500В - электровозы ;

- 6500В - маневровые электровозы, электрички типа Ласточка и Иволга, высокоскоростные поезда типа Сапсан.

Линейка отечественных IGBT модулей на примере продукции компании АО "Протон-Электротекс" приведена на рисунке 3.

SiC MOSFET

SiC MOSFET сравнительно недавно начал применяться в железнодорожной технике. По принципу действия это полевой транзистор с изолированным затвором, аналогичный кремниевому MOSFET, но изготовленный на основе карбида кремния с широкой запрещённой зоной ~3,2 эВ (в сравнении с 1,1 эВ у кремния). Благодаря материалу SiC MOSFET сочетает высокое рабочее напряжение и устойчивость к повышенным температурам с крайне низкими потерями на переключение. По сравнению с IGBT, у SiC MOSFET коммутационные потери значительно ниже. Он способен работать на частотах в десятки килогерц даже при напряжениях класса 3,3–6,5 кВ, в то время как кремниевый IGBT ограничен частотами в единицы килогерц. SiC MOSFET — это прибор, управляемый напряжением (как и IGBT), имеющий паразитный обратный диод. В контексте железнодорожной техники SiC MOSFET рассматривается как преемник

IGBT для новых поколений тяговых преобразователей, что позволяет ещё больше снизить потери и уменьшить габариты оборудования.

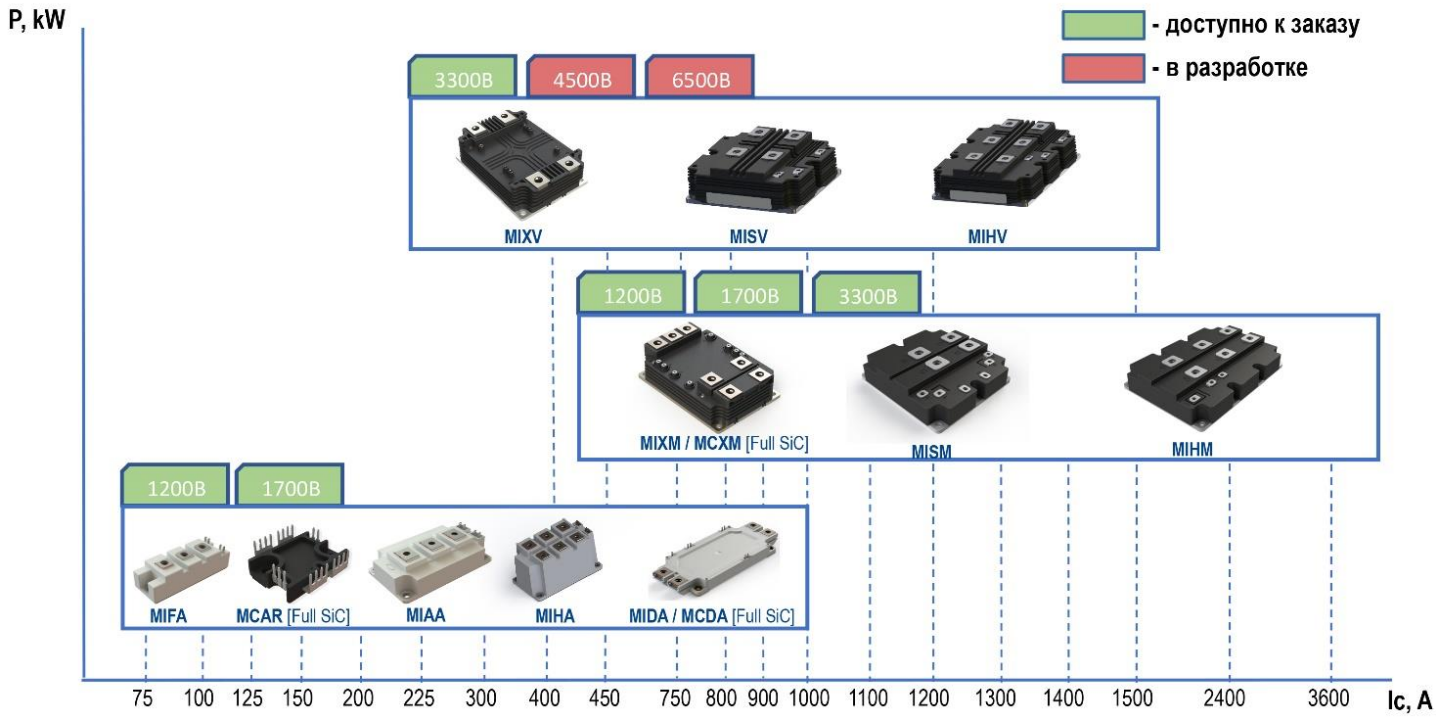


***Рисунок 3**. Линейка отечественных силовых IGBT и SiC на примере продукции компании АО "Протон-Электротекс"*

Ключевые преимущества SiC MOSFET:

- Значительно меньшие коммутационные потери;
- Более низкие статические потери при малых и средних токах;
- Возможность работы при температуре кристалла 175–200 °C без ухудшения надёжности;
- Возможность работы в третьем квадранте, то есть пропускание обратного тока через транзистор, что имитирует встречно-параллельный диод. Это позволяет уменьшить габариты силовых полупроводниковых приборов по сравнению с IGBT и исключить высокие перепады температур в цикле работы транзистора и встречного диода.

Ограничения SiC MOSFET:

- Высокая стоимость;
- Сложность производственной технологии;
- Недостаточно изученные вопросы долговечности (например, надёжность подзатворного оксида и встроенного диода при длительной эксплуатации);
- Сложность обеспечения электромагнитной совместимости (EMC);
- Высокие скорости фронтов тока и напряжения, что может повредить изоляцию трансформатора или двигателя;
- Проектирование полупроводников и преобразователя в целом требует специфических знаний.

Тем не менее, в испытательных и опытных образцах подвижного состава SiC-инверторы продемонстрировали улучшение КПД и снижение потерь на ~10–15% по

сравнению с лучшими аналогами на основе IGBT [3]. Это напрямую способствует энергосбережению и снижению тепловой нагрузки на систему охлаждения. Отечественные силовые SiC MOSFET на примере продукции компании АО "Протон-Электротекс" приведены на рисунке 3.

GaN HEMT

GaN HEMT (транзисторы на основе нитрида галлия) по параметрам дополняют SiC MOSFET. Они обладают еще более высокой скоростью переключения и малой емкостью затвора, что минимизирует потери на высоких частотах. GaN-приборы имеют смысл применять там, где требуются очень высокие частоты (сотни кГц и выше) и сравнительно невысокое напряжение. В железнодорожном транспорте GaN может найти применение во вспомогательных преобразователях, источниках бесперебойного питания, системах отопления/кондиционирования вагонов – для повышения эффективности и уменьшения размеров этих устройств. Для основных тяговых цепей GaN-технология пока не обеспечивает нужных уровней напряжения и тока, но такие разработки ведутся. Несомненный плюс GaN – крайне низкие потери при высокочастотной работе, позволяющие существенно снизить массу фильтров и катушек, а значит, и общий вес оборудования. Ожидается, что по мере совершенствования технологий GaN займет свою нишу наряду с SiC в системах железнодорожной электроники.

Перспективные направления

Современные тенденции развития силовых полупроводниковых приборов для железнодорожного транспорта направлены на дальнейшее повышение эффективности, интеграцию интеллектуальных функций и освоение новых материалов. Рассмотрим некоторые перспективные направления:

1. Интеллектуальные силовые модули (IPM, Intelligent Power Module). Это силовые модули, объединяющие в одном корпусе не только собственно транзисторы/диоды, но и встроенные драйверы управления, датчики тока, температуры, а также схемы защиты и диагностики. IPM изначально появились для промышленной автоматики и электроприводов, но все более актуальны и для тяговых преобразователей железнодорожной техники. Преимущества очевидны: высокая степень интеграции упрощает разработку системы, сокращает число внешних компонентов и повышает надежность за счет оптимального согласования внутри модуля. Например, типовой IPM содержит встроенные защиты от перенапряжения, превышения тока, перегрева, а также выводит диагностические сигналы контроллеру [4]. В случае аварии такой модуль способен самоотключиться быстрее, чем сработает внешняя защита, предотвращая повреждение силовых элементов. Благодаря близости драйвера и транзисторов внутри корпуса уменьшается паразитная индуктивность и улучшается управление – можно достичь оптимальных быстрых фронтов без риска перенапряжений, что важно для SiC/GaN приборов. Для железнодорожной техники создание высоковольтных IPM-модулей (напряжением 3,3 кВ и выше) с интегрированными функциями станет большим шагом вперед, позволяющим упростить топологию преобразователей и улучшить их отказоустойчивость.

2. Системы мониторинга состояния и предиктивная диагностика. Внедрение датчиков и электронных измерителей прямо в силовые модули открывает возможность непрерывно контролировать их состояние. Перспективным является встроенный мониторинг параметров силового элемента: падения напряжения на открытом приборе, времени переключения, утечек, температуры кристалла, изменение теплового сопротивления и др. Уже сейчас реализуются решения, где каждая силовая ячейка снабжена микроконтроллером, собирающим такие данные и передающим их в центральную систему диагностики. Сочетание этих данных с алгоритмами машинного обучения позволит прогнозировать срок службы с высокой точностью. Для железнодорожных операторов это чрезвычайно важно – переход от планово-профилактического обслуживания к обслуживанию по состоянию позволяет снизить издержки и избежать внеплановых простоев. Можно предположить, что в новых поколениях тяговых преобразователей появятся “умные” силовые шкафы, способные сами сигнализировать о необходимости замены определенного модуля задолго до его отказа.

3. Новые полупроводниковые материалы и приборы будущего. Помимо SiC и GaN, которые уже вошли в практику, в лабораториях ведутся разработки силовых приборов на алмазе и других ультраширокозонных полупроводниках (оксид галлия Ga_2O_3, нитрид алюминия AlN и др.). Алмазные транзисторы обещают невиданные характеристики: ширина запрещенной зоны ~5,5 эВ, критическое электрическое поле пробоя порядка 10 МВ/см, теплопроводность в 3–5 раз выше, чем у меди. Теоретически алмазные приборы могли бы работать при температурах >300 °C, коммутировать тысячи вольт на частотах в сотни килогерц, практически без потерь. За алмазом закрепилось название “крайний” или “ультимативный” полупроводник будущего, способный вывести электронику на новый уровень эффективности [5]. Уже достигнуты первые успехи: созданы опытные диоды Шоттки на алмазе с пробивными напряжениями порядка 5–10 кВ [6]), отработаны технологии легирования алмаз для создания p-n переходов. В 2021 году японские инженеры сообщили о первом n-канальном алмазном транзисторе, открывшем путь к полностью алмазным приборам [7]. Практическое применение алмаза пока сдерживается трудностями: малый размер доступных монокристаллов, сложность легирования, очень высокая стоимость. Но перспективы внушительны: алмазные силовые транзисторы потенциально смогут радикально уменьшить габариты и массу тяговых преобразователей, практически устранив ограничения по нагреву и потери на проводимость [5], что приведет к упрощению охлаждения, снижению энергопотерь и даже удешевлению обслуживания и миниатюризации охлаждающих устройств. Ожидается, что алмазные приборы найдут нишу в сверхответственных применениях (например, авиация, космос) в течение ближайших 10–15 лет, а затем по мере удешевления могут прийти и в наземный транспорт, в т.ч. железные дороги.

4. Новые методы охлаждения и компоновки. Параллельно с развитием самих приборов идут инновации в области их охлаждения. Появляются решения по двухстороннему охлаждению силовых модулей (охлаждение с обеих сторон чипа для равномерного отвода тепла) и использование тепловых трубок.

5. Глубокая интеграция комплектного электропривода. Также рассматривается интеграция силовых модулей непосредственно на тяговых двигателях – интегрированный привод, где инвертор крепится на корпус двигателя – это сокращает длину кабелей, уменьшает потери и помехи. Все это требует очень надежных и компактных силовых компонентов, что становится возможным благодаря новым полупроводникам.

5. Улучшение характеристик IGBT. Нельзя забывать, что и традиционные кремниевые IGBT продолжают совершенствоваться. В настоящее время доступны IGBT VII поколения с еще более низким падением напряжения и возможностью работы при +175 °C. На подходе технологии с тонкопленочным затвором и новые конструкции ячеек, снижающие паразитные емкости и повышающие скорость. Это означает, что даже перед лицом конкуренции SiC, кремниевые приборы будут оставаться востребованными за счет оптимального сочетания цены и отличных характеристик в своем диапазоне. Более того, появляется концепция гибридных модулей, где в одном корпусе используются и кремниевые IGBT, и SiC-диоды (для снижения обратных потерь), или параллельное включение SiC MOSFET и IGBT для сочетания их преимуществ (SiC берет на себя быстрые переключения, IGBT – проведение больших токов).

Надежность силовых полупроводников

Надёжность силовых полупроводниковых приборов – критически важный параметр в железнодорожной технике, где отказ тягового привода может вывести из строя целый поезд и повлиять на безопасность движения. При проектировании преобразователей закладывается ресурс, рассчитанный на десятилетия интенсивной эксплуатации (до 30 лет, что эквивалентно миллионам циклов нагрузки).

Для обеспечения высоких требований к качеству силовых полупроводниковых приборов, применяемых на железнодорожном транспорте, деятельность компании-производителя должна быть организована соответствующим образом как в области разработки, так и испытаний и в целом система качества менеджмента должна быть нацелена на выпуск продукции, соответствующей высоким требования железнодорожной отрасли.

Разработка

На этапе разработки, по сути, закладывается качество будущей продукции и её себестоимость. Для гарантированного обеспечения качества необходимо применять методы оценки технических рисков и выстраивать целенаправленную работу по их снижению за счёт технических решений и (или) внедрения специализированных методов контроля при квалификации продукции или во время серийного производства.

Испытания

Реализуется комплекс испытаний, направленный как на определение базовых технических характеристик разрабатываемых и производимых приборов, так и на комплексное исследование и подтверждение высокого уровня надёжности продукции.

Объём базовых испытаний на надёжность на примере IGBT-модулей, выпускаемых компанией АО "Протон-Электротекс", приведён ниже. При этом общее количество испытаний превышает 125 для квалификации одного типа IGBT-модуля:

1. Стабильность утечек по затвору (HTGB);
2. Стабильность утечек по цепи коллектор-эмиттер (HTRB);
3. Стабильность утечек по цепи коллектор-эмиттер при повышенной влажности (H3TRB);
4. Электротермоциклирование;
5. Термоциклирование;
6. Тепловой удар;
7. Вибрация;
8. Механический удар;
9. Низкотемпературное хранение;
10. Высокотемпературное хранение;
11. Соляной туман;
12. Хранение при повышенной влажности.

Система качества менеджмента

Для обеспечения качества выпускаемой продукции система менеджмента должна гарантировать воспроизводимость её характеристик. Для этого необходимо автоматизировать бизнес-процессы компании, внедрить системы менеджмента качества, включая общепромышленную - ISO 9001 и специализированную для железнодорожного транспорта - IRIS, а также регулярно подтверждать применяемые подходы аудитами со стороны клиентов.

Ниже приведён подход в области менеджмента качества российской компании АО "Протон-Электротекс", поставляющей силовые полупроводниковые приборы для железнодорожной отрасли.

Сертификаты соответствия: ISO 9001:2015;ISO 14001:2015; ISO/TS 22163:2017 (IRIS).

Автоматизация бизнес-процессов:

- 100% основных бизнес-процессов компании автоматизированы с помощью ERP-системы;
- 40% вспомогательных и обеспечивающих процессов автоматизированы с помощью BPM-системы;
- Оставшиеся процессы качественно документированы.

Методы менеджмента качества:

- Применяется система анализа технических рисков конструкции – DFMEA;
- Применяется система анализа технических рисков технологии производства – PFMEA;
- Проводится оценка воспроизводимости ключевых технологических процессов с использованием статистических методов – SPC;

- Проводится оценка воспроизводимости измерений с использованием статистических методов – MSA;

- Применяются методы выявления коренных причин и анализ проблем: 8D, "5 Почему".

Пройденные аудиты со стороны клиентов, связанных с железнодорожной промышленностью:

- General Electric (США);
- TMX (Россия);
- ABB (Швейцария);
- Alstom (Франция);
- Schneider Electric (Франция);
- Fuji (Япония).

Заключение

Отрасль силовой полупроводниковой электроники для железнодорожного транспорта находится в фазе динамичного развития. Новые материалы и интеллектуальные технологии открывают возможности для создания еще более эффективных, надежных и “умных” тяговых преобразователей. Это, в свою очередь, будет способствовать появлению более энергоэффективных и экономичных поездов, с меньшими затратами на их жизненный цикл и лучшими эксплуатационными качествами. Инженерам, занимающимся разработкой и эксплуатацией железнодорожной техники, важно следить за этими трендами, чтобы своевременно внедрять передовые решения и сохранять конкурентоспособность подвижного состава в современных условиях.

Литература

1. Силовые полупроводниковые приборы. В центре тихой революции. URL: https://library.e.abb.com
2. Silicon Carbide Power Components For Mireo Plus B Units. URL: https://www.railvolution.net
3. Towards more efficient, Silicon Carbide-based traction systems. URL: https://rail-research.europa.eu
4. Intelligent Power Modules provide excellent protection for industrial equipment. URL: https://www.arrow.com
5. The transistor of the future. URL: https://compoundsemiconductor.net
6. Diamond Power Electronics: From 1kV towards 10kV Breakdown. URL: https://ieeexplore.ieee.org
7. New diamond transistor is a world-1st - paving the way for high. URL: https://www.livescience.com

АО "Протон-Электротекс", г. Орёл.

Ставцев Александр Валерьевич: технический директор

УДК [62-192+692.488+681.518.5] ГРНТИ 73.29.41

А. С. Туманин, Н. Г. Шабалин, А. И. Васекин, Ж. М. Мороз

МОДЕЛЬ СБАЛАНСИРОВАННОГО ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ И ПРОВОЗНОЙ СПОСОБНОСТИ УЧАСТКОВ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Аннотация: *Решение стоящих перед Восточным полигоном задач по увеличению пропускной и провозной способности в краткосрочной перспективе возможно за счет внедрения инновационных технологий организации движения поездов на уже существующей инфраструктуре. Представлена базовая модель, позволяющей определить точку технологического равновесия (E_i), которая показывает как с минимально возможными затратами (I) на действующей инфраструктуре (N) обеспечить выполнение планового объёма перевозок (провозная способность $Г \geq \Sigma p^g_{план}$.) На примере Красноярской ж.д. выполнен анализ экономически обоснованных стратегий увеличения пропускной и провозной способности за счет повышения средней массы поезда или средней участковой скорости.*

Ключевые слова: *пропускная способность, провозная способность, Восточный полигон, моделирование, точка технологического равновесия*

Abstract: *Solving the problems facing the Eastern training ground to increase throughput and carrying capacity in the short term is possible through the introduction of innovative technologies for organizing train traffic on existing infrastructure. A basic model is presented that makes it possible to determine the point of technological equilibrium (E_i), which shows how to ensure the implementation of the planned volume of transportation (carrying capacity (G) $\geq \Sigma p^g_{plan}$. Using the example of the Krasnoyarsk Railway, an analysis of economically feasible strategies for increasing throughput and carrying capacity by increasing the weight of the train or sectional speed was carried out.*

Key words: *throughput, carrying capacity, Eastern range, modeling, technological equilibrium point.*

Динамичный рост объёмов перевозок в направлении Дальнего Востока требует увеличения пропускных и провозных способностей Восточного полигона. Объём импорта и экспорта растёт ежегодно, но уже сейчас БАМ и Транссиб работают на пределе пропускной способности [1]. Решение данного вопроса является актуальным в связи с поставленной в Правительственной программе по Восточному полигону задачи об увеличении объемов перевозок до 182 млн тн в 2025 году [2]. Поэтому достижение оптимального баланса между спросом (провозная способность - 182 млн тн к 2025 году) и предложением (пропускная способность -129 пар поездов) является одной из ключевых задач развития ОАО «РЖД» на Восточном полигоне [3]. Решение этих ключевых проблем, в долгосрочной перспективе, зависит от объёма инвестиций, вложенных как в развития объектов станционной инфраструктуры, развёртывания автоблокировки с подвижными блок- участками, так и в усиление устройств энергоснабжения и путевого

комплекса. В краткосрочной перспективе решение стоящих перед Восточным полигоном задач возможно за счет внедрения инновационных технологий организации движения поездов, что позволит значительно увеличить пропускную и провозную способности на уже существующей инфраструктуре с минимальным объемом инвестиций. Цель статьи - определить текущую точку технологического равновесия (E_i), и на этой основе однозначно установить существующие проблемы и выбрать стратегическое направление их преодоления, на примере Красноярской железной дороги.

Анализ работы Красноярской железной дороги за период 2007-2023 годы

Для решения поставленной задачи был проведен анализ эксплуатационных показателей работы Красноярской железной дороги за период 2007-2023 годы. Результаты проведенного анализа показывают, что на дороге, как и на Восточном полигоне в целом, с 2007 года проводилась направленная работа по увеличению средней массы поезда. Данные представлены на рисунке 1.

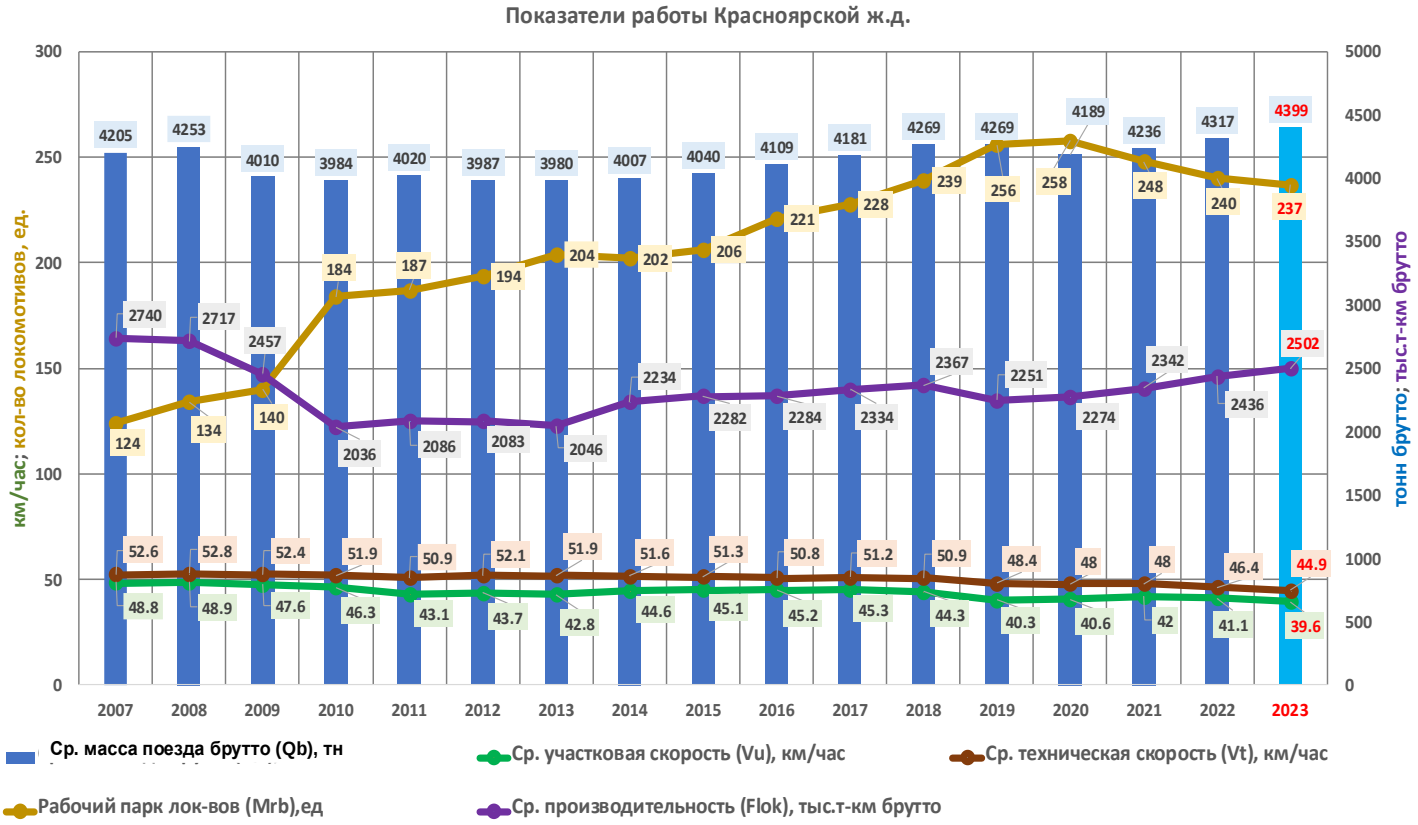


Рисунок 1 Основные показатели работы Красноярской железной дороги в период 2007-2023 года: средняя масса поезда брутто, тонн; средняя участковая скорость, км/ч; средняя техническая скорость, км/ч; рабочий парк локомотивов, ед.; средняя производительность локомотива, тыс.т-км брутто.

Обращает на себя внимание тот факт, что одновременно с увеличением средней массы поезда (в 2013 г. - 3 980 т, в 2023 г. - 4 399 т) снизилась на **19%** средняя участковая скорость с **48,8** до **39,6** км/час. Снижение средней участковой скорости повлекло увеличение рабочего парка локомотивов. В тоже время отметим, что в 2007-2009 годах при дефиците локомотивного парка среднесуточная производительность локомотива была выше на **9%** чем в 2023 году (**2740** против **2502** тыс.т-км). Из графика видно, что

резкое увеличение парка локомотивов на **113** ед. (почти в 2 раза) за 16 лет со **124** ед. в 2007 году до **237** ед. в 2023 году привело к снижению средних значений участковой и технической скоростей за этот период.

В 2023 году в соответствии с целевой программой (таблица 1) необходимо было обеспечить суммарную провозную способность **Г ≈ 173** млн тн, а пропускную способность **N=101** пару поездов.

Таблица 1 – Целевые показатели модернизации ж.д. инфраструктуры Восточного полигона

Год: / Показатель:	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2030	2032
Суммарная провозная способность (Г), млн тн	132	144	144	158	173	182	210	270
Суммарная пропускная способность (N), пар поездов	95	101	101	101	101	129	≈ 144	≈ 185

По Красноярской железной дороге реальное выполнение составило **90** пар поездов от **101** запланированной (по участку Мариинск – Юрты **N≈70** пар поездов, по участку Междуреченск – Тайшет **N≈20** пар поездов). Таким образом дефицит составил **11** пар поездов. В текущем 2024 году суммарная провозная способность должна составить **Г=182** млн тн, а пропускная **N =129** пар поездов. В настоящее время динамика эксплуатационной работы 2023 года сохраняется. Таким образом можно сделать вывод, что при сохранении тенденции дефицит ежегодно будет возрастать.

Базовая модель повышения эффективности процесса перевозок

Как было отмечено выше в краткосрочной перспективе для изменения ситуации, до завершения инвестиционных программ, есть только один способ - внедрение инновационных технологических решений в области организации движения поездов. Очевидно, что стратегия на увеличение только средней массы поезда ограничена потенциальными возможностями инфраструктуры, тягового энергоснабжения, подвижного состава и локомотивного парка.

Определить оптимальные, экономически обоснованные сценарии управления объектами и процессами для выполнения в 2030 году целевого задания провозной способности **Г=210** млн тн и пропускной **N ≈ 144** пары поездов, можно, но для этого предлагается определить базовую модель повышения процесса перевозок. На рисунке 2 представлена базовая модель повышения эффективности процесса перевозок. Ключевым результатом имитационного моделирования является определение точки технологического равновесия (***E_i***), которую можно определить как – возможность на действующей инфраструктуре (***N***) выполнить плановый объём перевозок (***Г ≥ Σp^g_{план}***) с минимальными затратами (***при I → min***)

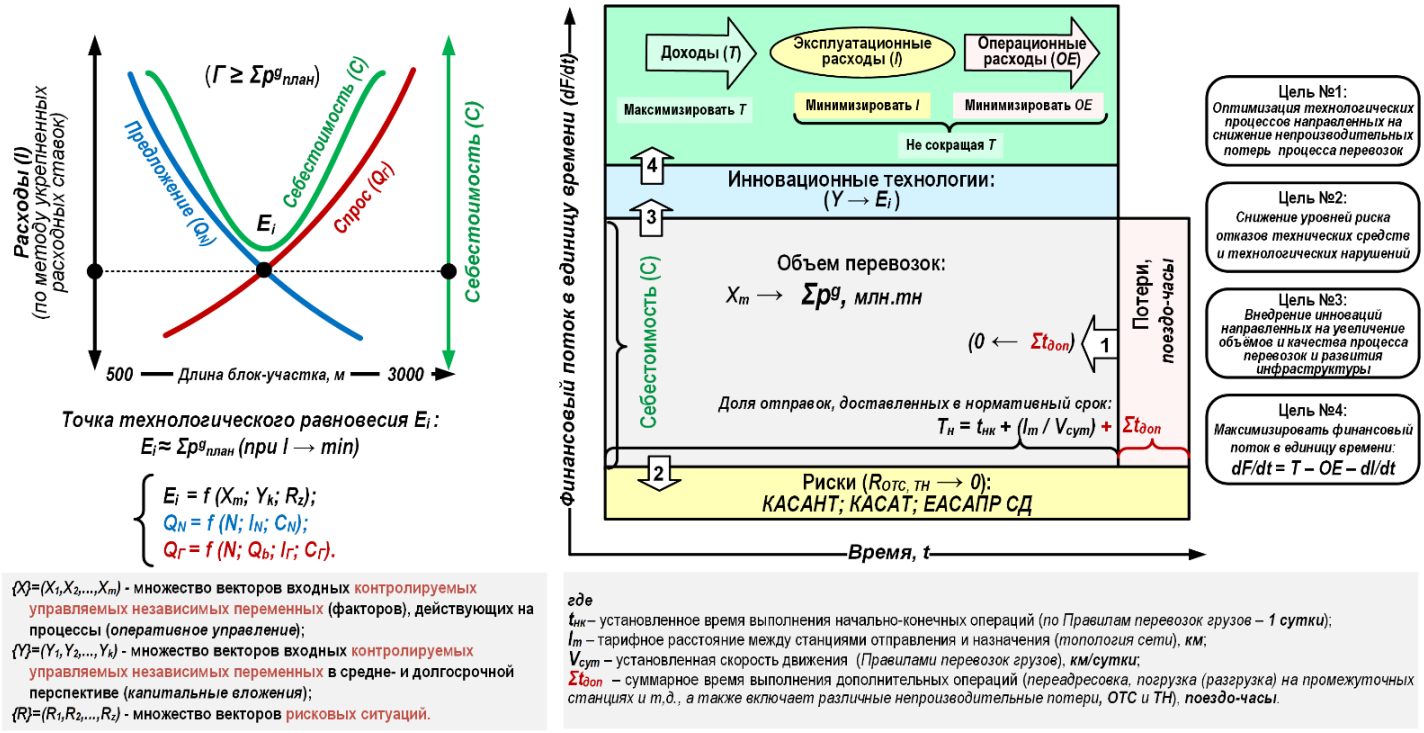


Рисунок 2. Базовая модель повышения эффективности процесса перевозок.

При нахождении E_i будет возможно с минимальными затратами (I) обеспечить провозную способность ($Г \geq \Sigma p^g_{план}$) на действующей инфраструктуре (N), а значит выполнить плановый объём перевозок ($\Sigma p^g_{план}$). Говоря рыночным языком сбалансировать спрос (провозная способность) и предложение (пропускная способность).

Цели, к которым должна стремится система для принятия адекватных управленческих решений в оперативном, кратко-, средне-, и долгосрочном периодах можно сформулировать следующим образом.

Цель №1: Оптимизация технологических процессов направленных на снижение непроизводительных потерь процесса перевозок ($\Sigma t_{доп} \rightarrow 0$).

Цель №2: Снижение уровней риска отказов технических средств и технологических нарушений ($R_{ОТС,ТН} \rightarrow 0$).

Цель №3: Внедрение инноваций направленных на увеличение объемов и качества процесса перевозок и развития инфраструктуры.

Цель №4: Увеличение финансового потока в единицу времени (dF/dt).

Плановый объём перевозок, скорость и срок доставки грузов являются важнейшими показателями, по которым оценивается качество работы железнодорожного транспорта. За невыполнение сроков доставки грузов ОАО «РЖД» несет не только материальную ответственность перед грузополучателями, но и теряет существенную часть доходов (T) из-за потери погрузочных ресурсов. Процесс управления, направленный на комплексное снижение времени выполнения дополнительных операций и потерь поездо-часов ($\Sigma t_{доп} \rightarrow 0$), оказывает положительное влияние на увеличение коэффициента надежности ($R_{ОТС,ТН} \rightarrow 0$), использования наличной пропускной способности и увеличения количества отправок, доставленных в нормативный срок ($T_н$).

Контроль времени выполнения дополнительных операций и потерь поездо-часов ($\Sigma t_{доп}$) должен проводится по всем этапам технологического процесса и на всем маршруте следования грузового поезда от станции отправления до станции назначения.

На рисунке 3 представлен график определения экономически обоснованной точки технологического равновесия (график построен по данным 2023 года). Исходными данными являются провозная способность **Г=173** млн тн, средняя масса поезда брутто **Q_b = 4399** тн, средняя участковая скорость **Vu≈ 40** км/час.

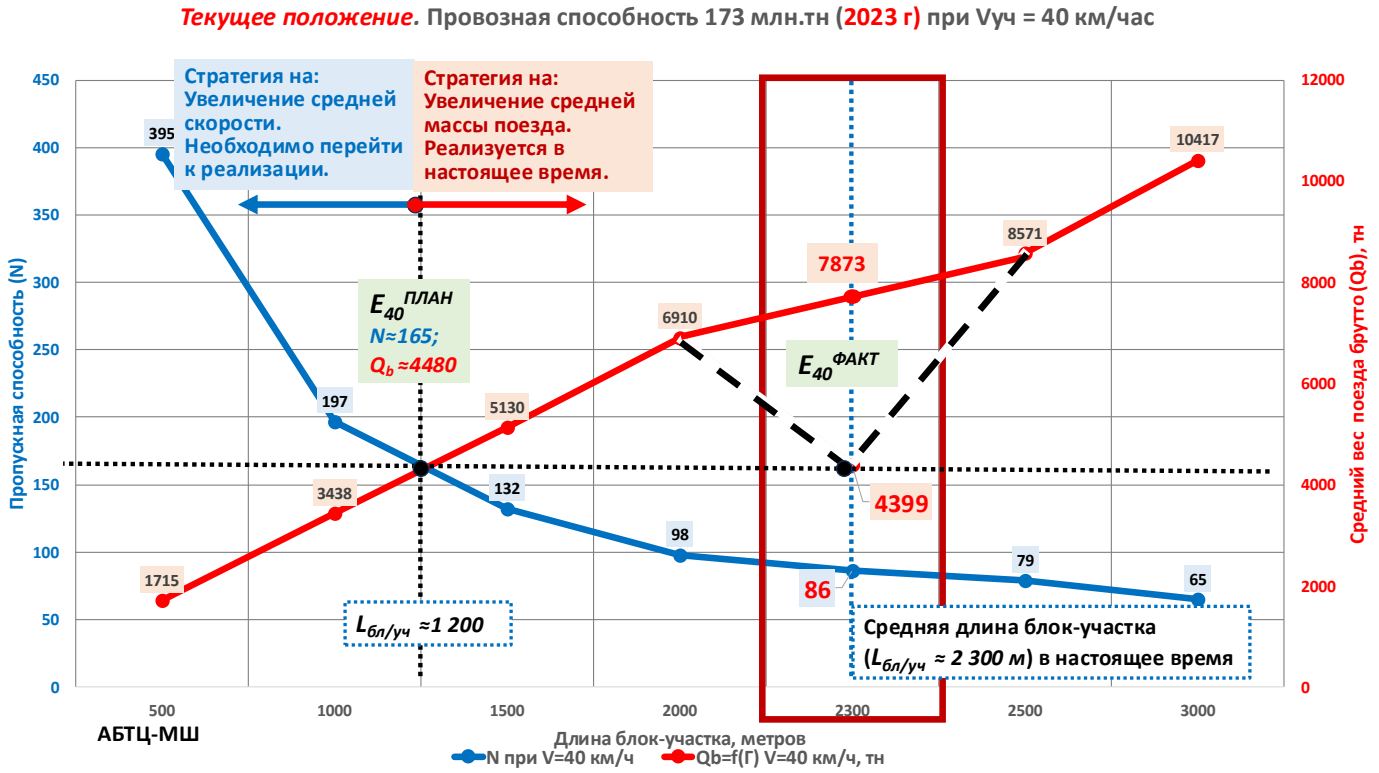


Рисунок 3. Зависимость пропускной способности (N) от длины блок-участка ($L_{бл/уч}$, м синяя линия) при $V_{уч}$ =40 км/ч. Зависимость средней массы поезда брутто (Q_b - красная линия) от пропускной способности (N) и планового задания ($Г \geq \Sigma p^g_{план}$= 173 млн тн).

Фактическая точка технологического равновесия ($E_{40}^{ФАКТ}$) соответствует провозной способности **Г≈97** млн тн, для «перехода» в плановую точку ($E_{40}^{ПЛАН}$) необходимо выбрать соответствующею стратегию. Рассмотрим три возможных стратегии:

- Первая (Y_k), капитальные вложения, направленные на сокращение длины блок-участков с ***2300*** м до гарантированного тормозного пути;
- Вторая (X_m), оперативное управление, направленное на увеличение средней участковой скорости (V_u) с **40** км/ч и более в зависимости от тяговых расчетов на конкретных участках железных дорог;
- Третья (X_m), увеличение средней массы поезда Q_b с **4399** тн до возможностей инфраструктуры и перспективных технологий, например, увеличение в графике движения количества виртуально соединённых поездов.

Анализ предложенных стратегий показывает, что реализация первой стратегии требует значительных инвестиций и значительного времени завершения строительства.

Реализация второй стратегии ограничена максимально возможной средней участковой скоростью $V_u \lesssim 55$ км/ч. Реализация третьей стратегии ограничена возможностями инфраструктуры, тягового энергоснабжения и подвижного состава, но также надо отметить, что она противоречит второй стратегии.

Реализация стратегий, направленных на увеличение средней скорости движения и средней массы поезда, связана как с увеличением, так и с уменьшением затрат на их осуществление. Для оценочных расчетов затрат на планируемые мероприятия, при проведении в дальнейшем имитационного моделирования, наиболее подходит метод укрупнённых расходных ставок, что позволяет выбрать экономически оптимальный вариант сценариев развития ситуаций и управленческих решений.

Расчет затрат по методу «Укрупнённых расходных ставок» применяется для оценки эксплуатационной деятельности дорог в текущих или перспективных условиях. Для этого методом единичных расходных ставок по особым формулам рассчитывают расходы, приходящиеся на единицу эксплуатационной работы, например, 1 поездо-км, 1 поездо-час, 1 техническая единица и т.п. Умножив данные расходы (укрупненные расходные ставки) на величину соответствующих измерителей, приходящихся на заданный объем работы, получают расходы, связанные с измерителем в конкретных условиях.

Более подробно распределение расходов на реализацию второй и третьей стратегии показаны на Рисунке 4.

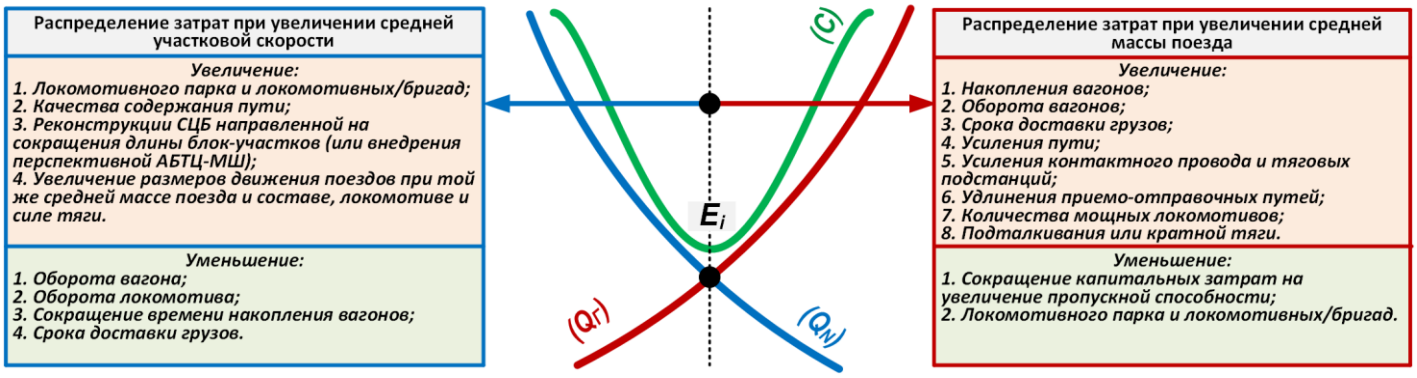


Рисунок 4 Стратегии повышения пропускной и провозной способности за счет увеличения средней участковой скорости (синяя линия) или увеличения средней массы поезда (красная линия).

Необходимо отметить, что реализация второй стратегии (**Xm**) - оперативное управление, направленное на увеличение средней участковой скорости, приведет к увеличению затрат на: локомотивный парк и локомотивные бригады; качество содержания пути; реконструкцию СЦБ для уменьшения длины блок-участков; увеличение размеров движения поездов при той же средней массе поезда и составе, локомотиве и силе тяги. Но при этом произойдет уменьшение затрат на: оборот вагона; оборот локомотива; сокращение времени накопления вагонов; срок доставки грузов.

Реализация третьей стратегии (**Xm**) – увеличение средней массе поезда, приведет к увеличению затрат на: увеличение количества мощных локомотивов, накопление вагонов, оборот вагонов; срока доставки грузов; усиление пути, усиление контактного

провода и тяговых подстанций; удлинение приёмо-отправочных станционных путей. При этом уменьшаться затраты на: локомотивный парк и локомотивные бригады. А в целом приведет к сокращению капитальных затрат на увеличение пропускной способности.

Вывод: в сложившейся ситуации необходимо в первую очередь разрабатывать «точечные» технологические решения, например, вождение виртуально соединённых поездов, применение частично-пакетного графика и другие, во-вторую очередь параллельно, исходя из местных условий и возможностей, в различных пропорциях реализовывать все три стратегии.

Использование имитационного моделирования для решения задач повышения пропускной и провозной способности

Цели моделирования, заключаются в определении плановых состояний равновесия (E_i), к которым должна стремится система для принятия адекватных управленческих решений в оперативном, кратко-, средне- и долгосрочном периодах.

Модель нужна для того, чтобы понять, как устроены конкретные объекты (ЦФТО, ЦД, ЦТ, ЦДИ, ТрансЭнерго), какие внутренние технологические связи, технические характеристики, перспективы развития и взаимодействия с окружающей средой влияют на плановое состояние (E_i). Также модель поможет определить оптимальные сценарии управления объектами или процессами при заданных целях и критериях. Модель поможет спрогнозировать прямые и косвенные последствия реализации управленческих решений на объект и плановое состояние (E_i). (рис. 5) как инструмент исследования.

Данная модель позволяет на основе регулирования исходными параметрами Y_k, X_m, R_z, представленными в таблицах 2 и 3, прогнозировать поведение системы. Результатом моделирования должна быть выработка экономически обоснованных рекомендаций, в целом по системе с учетом критических показателей работы, направленных на оптимизацию баланса E_i между спросом и предложением. При составлении модели должны быть отражены отдельные стороны функционирования системы, направленные на решение поставленной целевой установки.

Таблица №2 «Критерии выбора»

Подсистемы:	**ЦФТО**	**ЦД**	**ЦТ**	**ЦДИ**	**ТрансЭнерго**
Критерий выбора:	Прогноз объёмов перевозок в кратко – и среднесрочной перспективе	Технологические мероприятия по реализации плановой провозной способности	Обеспечение плановой провозной способности локомотивами и л/бригадами	Обеспечение плановой пропускной способности на объём перевозок	Обеспечение плановой провозной способности тяговым энергоснабжением
Показатель результативности (KRI):	прогноз / факт $k_{цфто} \leq 0,95$	план / факт $k_{цд} \leq 0,95$	план / факт $k_{цт} \leq 0,95$	план / факт $k_{цди} \leq 0,91$	план / факт $k_{цэ} \leq 0,95$
В Главный критерий (*классически*) входят 4 составляющие: **результат, качество, время, ресурсы**. Решающими факторами должны быть первые два. Тогда как **время и ресурсы** (*материальные*, *финансовые*, *кадровые*) становятся функционально зависимыми от результата и качества.					

Синтез имитационной модели на основе системного подхода

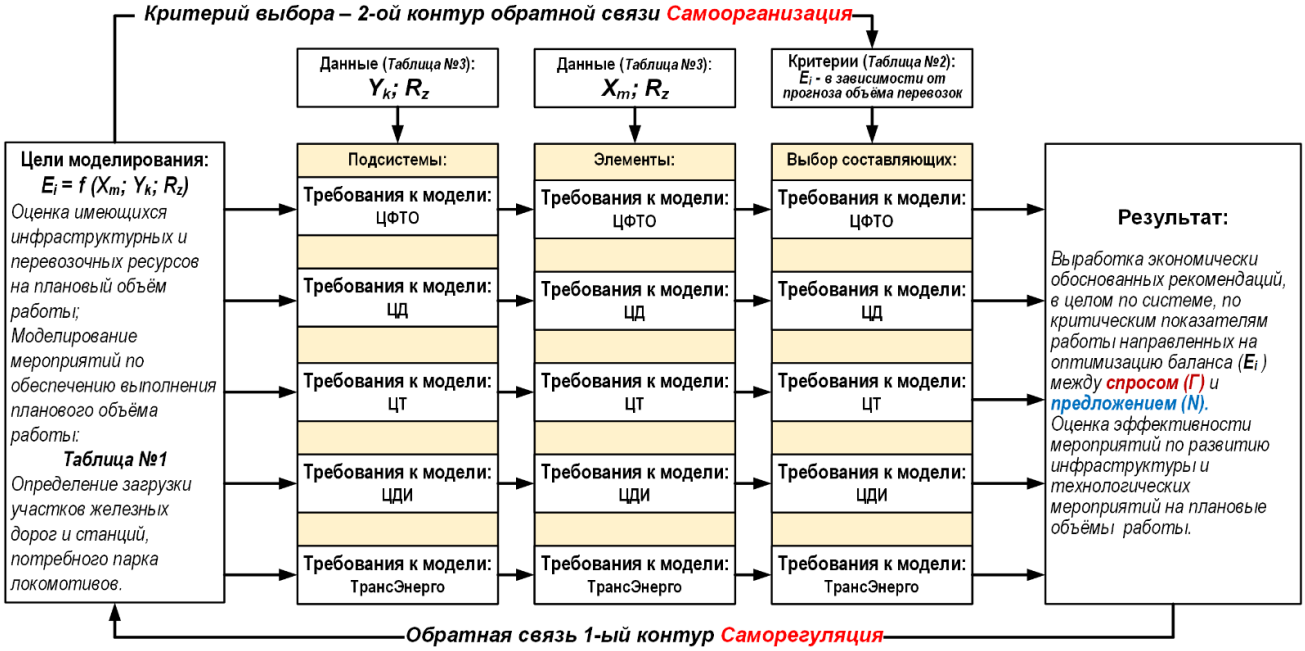


Рисунок 5 – Синтез имитационной модели на основе системного подхода

Таблица №3 «Контролируемые и не контролируемые данные»

Подсистемы: / **Данные:**	**ЦФТО**	**ЦД**	**ЦТ**	**ЦДИ**	**ТрансЭнерго**
X_m Контролируемые и оперативно управляемые показатели	План перевозок; $\sum p^g$ - перевезено грузов, тыс.тн; $\sum u_{gr}$ - погрузка, вагонов; Выручка от грузовых перевозок, тыс.руб.	План формирования; Техническое нормирование; График движения; $\sum (pl)_b$; Q_b; F_{lok}; S_{lok}; $\sum MS$; $\sum M_{rb}$; V_t; V_u; $V_м$; F_w; S_w; Tw; $\sum u$; t_{tr}; $\sum nt_{dv}$	Процент неисправных локомотивов по видам тяги; Процент вождения поездов в режиме автоведения; F_{lok}; S_{lok}; $\sum t_{dv}^{lok}$; $\sum t_{st}^{lok}$; V_t^{lok}; V_u^{lok}; $\sum M_{rb}$	V_u - Предупреждения об ограничении скорости по состоянию пути; Балловая оценка пути; Оценка качества технического обслуживания устройств сигнализации и связи, балы; $\sum n^g s$ - Пробег грузовых вагонов, общий, тыс. вагоно-км;	V_t - Предупреждения об ограничении скорости по состоянию тягового энергоснабжения; Балловая оценка устройств энергоснабжения
			Коэффициенты готовности технических средств		
	Единичные расходные ставки приходящиеся на измеритель эксплуатационной работы				
Y_k Контролируемые и управляемые показатели только в средне и долгосрочной перспективе	Объем предоставляемых услуг	Инфраструктурные ограничения станций	Типы и характеристики локомотивного парка; Оборудование локомотивного парка перспективными устройствами связи и автоматики; Тяговые расчеты	План и профиль пути; Внедрение перспективных систем интервального регулирования;	Типы и характеристики тяговых подстанций и контактного провода; Тяговые расчеты
	Нормативные и законодательные ограничения				
R_z - риски	**КАСАТ; КАСАНТ; ЕАСАПР; Форс мажорные обстоятельства**				

Системный подход к построению имитационной модели использует принцип от общего к частному. Основой модели является цель, то есть понимание для чего нужна модель. Формирование абстракций нескольких уровней (в данной модели достаточно 3-ёх) является вторым шагом. Построение модели начинается с формулировки главной цели моделирования – нахождения точка технологического равновесия:

$$E_i = f(X_m; Y_k; R_z)$$

$$E_i \approx \Sigma p^g_{план} \ (при \ I \rightarrow min)$$

Затем на основе фактических исходных данных, ограничений (нормативных и законодательных) и цели функционирования формируются требования к модели на всех уровнях управления. На базе требований осуществляется, после некоторого количества «прогонов» с тестовыми показателями, выбор вариантов достижения поставленной цели удовлетворяющей принятым критериям.

Наличие в модели двух контуров обратной связи позволяют получить системе следующие свойства. Возможность проверки результатов работы имитационной модели на соответствие полученного набора показателей исходной цели – это саморегуляция (первый контур обратной связи). Целенаправленное изменение модели до возможно более полного совпадения целевых показателей с очередным экспериментом – это самоорганизация (второй контур обратной связи, включающий память о реакциях модели на сделанные изменения).

Также построение модели позволяет прогнозировать свойства и поведение объектов как внутри компании, так и на внешним окружении. Это так называемая прогнозирующая роль модели. Управляющей ролью является возможность управлять объектами, отбирая наилучшие воздействия путём испытания их на модели.

Заключение

Полученные результаты показали, что для увеличения пропускной и провозной способности Восточного полигона в краткосрочной перспективе в первую очередь надо разрабатывать «точечные» технологические решения, например, вождение виртуально соединённых поездов, применение частично-пакетного графика и параллельно, исходя из местных условий и возможностей, в различных пропорциях реализовывать все три стратегии, приведенные выше.

Список литературы

1. Перевозчики рассказали об оперативном решении логистических проблем на Восточном полигоне / ИА «ТАСС» // ОАО «РЖД» : [официальный сайт] URL: https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=207132 (дата обращения: 10.12.2023).
2. Провозная способность Восточного полигона по итогам 2022 года // ОАО «РЖД» : [официальный сайт] URL: https://company.rzd.ru/ru/9397/page/104069?id=280126 (дата обращения: 10.12.2023).
3. Восточный полигон – Транссиб и БАМ : перспективы развития в 2023-2024 гг. // ОАО «РЖД» : [официальный сайт] URL: https://cargo.rzd.ru/ru/9787/page/103290?id=19722#main-header (дата обращения: 10.12.2023).
4. Васекин, А. И. Новые технологии в бизнес-модели "цифровая железная дорога" /

А. И. Васекин, Ж. М. Мороз // Цифровизация транспорта и образования: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 125-летию железнодорожного образования в Сибири, Красноярск, 09–11 октября 2019 года. – Красноярск: Красноярский институт железнодорожного транспорта - филиал ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», 2019. – С. 317-323. – EDN YVIGUL.

5. На Восточном полигоне объем контейнерного импорта обогнал экспорт в 2,2 раза : Также за восемь месяцев 2023 года удалось сэкономить более 1 млрд рублей и дополнительно провезти почти 5 млн тонн грузов / ИА «ТАСС» // Информационное агентство ТАСС : [официальный сайт] URL: https://tass.ru/ekonomika/18718095 (дата обращения: 10.12.2023).
6. Розенберг, Е. Н. Цифровая железная дорога - путь в будущее / Е. Н. Розенберг // Железнодорожный транспорт. – 2017. – № 4. – С. 36-41. – EDN YPTUFB.
7. Розенберг, Е. Н. О стратегии развития цифровой железной дороги / Е. Н. Розенберг, В. В. Батраев // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО РЖД. – 2018. – № 1. – С. 9-27. – EDN YSLALA.
8. Рыжаков, С. А. Система интервального регулирования движения поездов / С. А. Рыжаков // Молодежная наука : Труды XXV Международной студенческой научно-практической конференции, Красноярск, 22–24 апреля 2021 года. Том 5. – Красноярск: Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», 2021. – С. 115-119. – EDN CGWTYF.

Туманин Алексей Сергеевич, начальник Красноярской ж.д., г. Красноярск

Шабалин Николай Григорьевич, д.т.н., профессор, НИИАС, г. Москва

Васекин Александр Иванович, к.т.н., доцент, НИИАС, г. Москва

Мороз Жанна Михайловна, к.ф.-м.н., доцент, заведующая кафедрой КрИЖТ ИрГУПС, г. Красноярск

УДК 629.783 ГРНТИ 73.29.11

И. С. Фролов

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ «ЭКСПРЕСС-РВ» В ИНТЕРЕСАХ РОССИЙСКИХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОМПАНИЙ

Аннотация. *В статье описаны перспективы применения создаваемой спутниковой системы связи «Экспресс-РВ» с космическими аппаратами на высокоэллиптической орбите в интересах российских железнодорожных компаний (перевозчиков). Применение системы актуально на всей территории РФ, особенно на труднодоступных территориях крайнего Севера, Сибири и Дальнего Востока, где отсутствует развитая инфраструктура проводной, радио и сотовой связи. Полученные технические решения при разработке системы призваны решить такие технические задачи как диагностика и мониторинг технического состояния подвижного состава и предоставление мультисервисных услуг связи при осуществлении пассажирских перевозок и организации работы железнодорожных компаний.*

Ключевые слова: *спутниковая связь, абонентский терминал, орбитальная группировка, высокоэллиптическая орбита, подвижной состав, железная дорога.*

В Концепции социально-экономического развития РФ до 2030 года большое внимание уделено развитию территорий крайнего Севера, Сибири и Дальнего Востока. Развитие данных территорий невозможно без строительства транспортных путей: автомобильных и железных дорог, а также модернизации существующих транспортных артерий, таких как Транссибирская и Байкало-Амурская магистрали [1]. К задаче столь интенсивного развития данных территорий, строительства и модернизации железных дорог нельзя серьезно приступить без создания мощной инфраструктуры связи, с предоставлением всем пользователям (организации, физические лица) всего спектра современных инфокоммуникационных услуг (речь, данные, аудио, видео). Учитывая отдаленность и иногда труднодоступность этих территорий, создание там развитой инфраструктуры связи возможно только на базе систем спутниковой связи.

Применение спутниковых систем связи в интересах железнодорожных компаний (перевозчиков) обусловлено, прежде всего, отсутствием проводной (телефон, телетайп, ВОЛС) и беспроводной (радио, радиорелейной) связи. Данный фактор характерен для вновь строящихся железных дорог, таких как Тихоокеанская железная дорога (угольная компания «Эльга») [2], Амуро-Якутская железно-дорожная магистраль (АО «АК «Железные дороги Якутии») [3] с перспективами строительства железной дороги в Магадан, Северного широтного хода (участки Обская – Салехард – Надым – Новый Уренгой – Коротчаево) [4]. Применение спутниковых систем связи на участках Транссиб и БАМ может осуществятся в качестве дополнения к существующим видам проводной, сотовой и радиосвязи, для предоставления мультисервисных услуг при осуществлении пассажирских перевозок, организации работы железнодорожных компаний, а также для мониторинга в режиме online технического состояния подвижного состава [5].

Современные существующие системы спутниковой связи базируются в основном на использовании космических аппаратов (КА), функционирующих на геостационарной орбите (ГСО). В средних широтах в районах со сложным рельефом нельзя избежать затенений геостационарных КА связи препятствиями (горами, лесом и городской застройкой), приводящих или к полному отсутствию связи, или к ее неустойчивому функционированию. Особенно заметно это проявляется при связи с такими подвижными объектами как подвижной состав железных дорог.

Проводимые на электронных картах с помощью математического моделирования исследования условий радиовидимости спутников на геостационарной орбите и на высокоэллиптической орбите (ВЭО) с земных станций (ЗС), находящихся в различных регионах РФ, показали, что эффект затенения рельефом местности КА на геостационарных орбитах наблюдается даже в Южных районах страны (например, на территории Республики Алтай и Чеченской Республике), где углы видимости КА на ГСО без учета рельефа составляют более 30°. Наличие гор приводит к отсутствию радиовидимости на значительной части таких территорий даже в благоприятных для таких спутников условиях. [6]

В то же время космические аппараты на высоких эллиптических орбитах в этих районах видны с земных станций под углами места около 60° и эффект их затенения рельефом оказывается существенно ниже (охватывает значительно большие площади этих территорий), чем для геостационарных КА связи.

Рисунок 1 *– Углы места для КА, функционирующих на ГСО и ВЭО*

Такие же исследования условий радиовидимости применительно к случаю установки приемно-передающих станций (абонентских терминалов (АТ)) на железнодорожный подвижной состав и его следованию по ж/д магистралям РФ показали, что с АТ на ж/д составе геостационарные КА связи в среднем видны примерно в 15% времени, тогда как КА, функционирующие на ВЭО видны практически в 100% времени – за исключением прохождения ж/д состава в необорудованных для связи тоннелях. Если рассматривать не все ж/д магистрали РФ (включая ее Европейскую часть), а только в Азиатской части, то процент видимости геостационарных КА будет еще меньше (в

среднем, менее 10%), тогда как условия видимости высокоэллиптических КА практически останутся теми же (около 100%).

Обеспечить непрерывность и надежность спутниковой связи в интересах железнодорожных компаний на территории РФ в средних и северных широтах со сложным рельефом местности возможно при использовании вновь создаваемой компанией 1АО «РЕШЕТНЁВ» спутниковой системы связи (ССС) с космическими аппаратами «Экспресс-РВ» функционирующих на высоких эллиптических орбитах. Космические аппараты данной системы спутниковой связи видны с земных станций (ЗС) и подвижных абонентских терминалов, расположенных в указанных районах, обычно под высокими углами (от 30°– 40° и больше). В этих условиях затенения практически полностью исключаются (Рисунок 2).

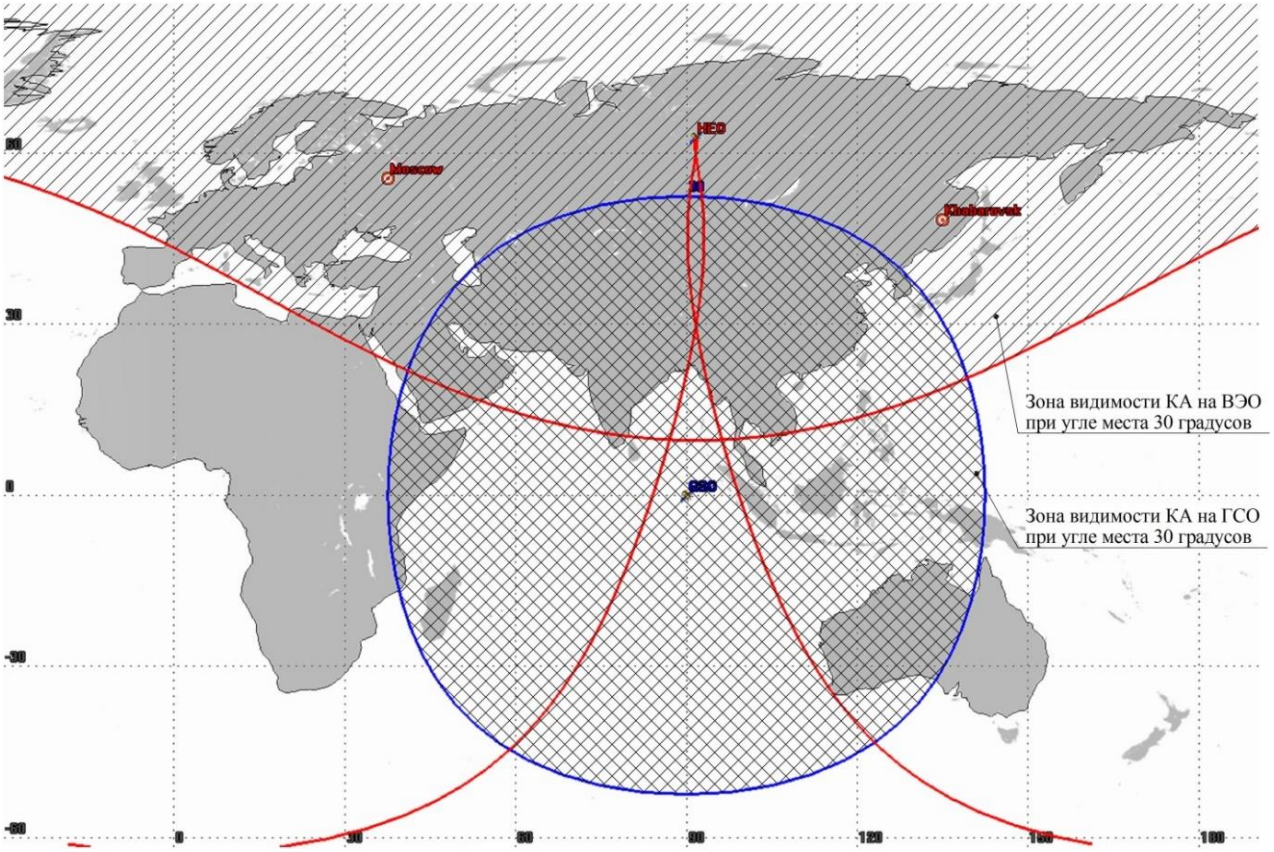


Рисунок 2 *– Зоны видимости (угол места 30° с территории РФ): синий цвет – геостационарный КА, красный цвет – высокоэллиптический КА*

Спутниковая система связи «Экспресс-РВ» состоит из космического сегмента (орбитальная группировка космических аппаратов) и наземного сегмента (наземного связного комплекса, состоящего из центра спутниковой связи и абонентских терминалов).

Орбитальная группировка «Экспресс-РВ» состоит из 4 космических аппаратов, каждый из которых находится в отдельной орбитальной плоскости (Рисунок 3). Орбитальные плоскости разнесены по долготе восходящего узла в геоцентрической инерциальной системе координат на 90 градусов. Наивысшая точка орбиты (апогей) – 42000 км, низшая точка орбиты (перигей) –1000 км. Период обращения КА за один виток (полный оборот по траектории орбиты) составляет 12 часов. Продолжительность рабочего участка орбиты (осуществление сеансов связи) около 6 часов в районе апогея (±

3 часа от апогея). Одновременно в системе работают 2 космических аппарата на основном витке с обслуживанием заданных многолучевых зон (Рисунок 3) и на сопряженном (Рисунок 4), тем самым обеспечивается возможность организации круглосуточной связи в Ku - диапазоне частот на территории РФ и акватории Северного Ледовитого океана.

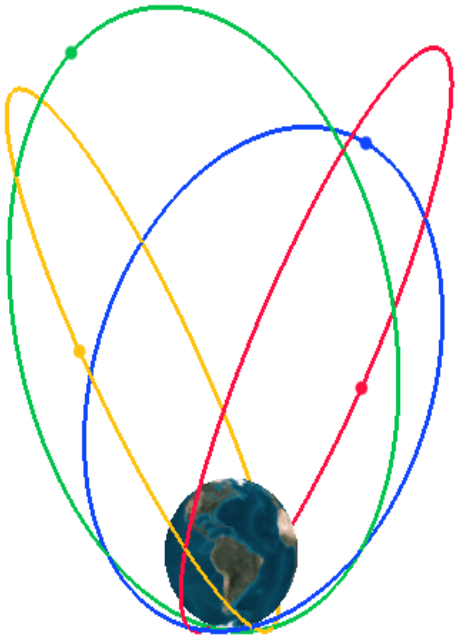


Рисунок 3 *–Построение орбитальной группировки «Экспресс-РВ»*

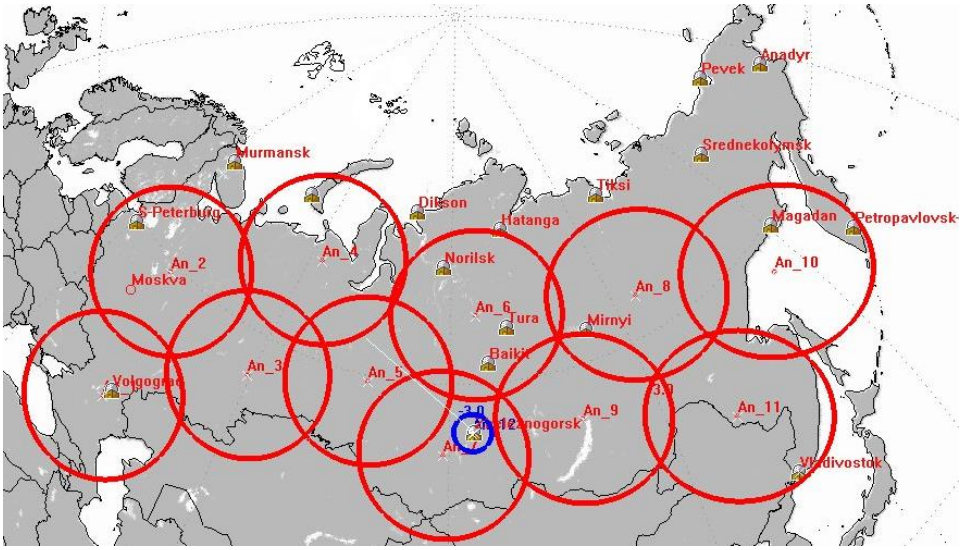
Основные задачи, выполняемые центром спутниковой связи (ЦСС):

- Оказание услуг спутниковой связи в Ku – диапазоне (частотные диапазоны 10,7 – 12,75 и 12,75 – 14,8 ГГц);
- Формирование, организация, конфигурирование, форматирование и коммутирование цифровых каналов и трактов;
- Обслуживание и администрирование собственных сетей;
- Подключение пользователей к услугам связи.

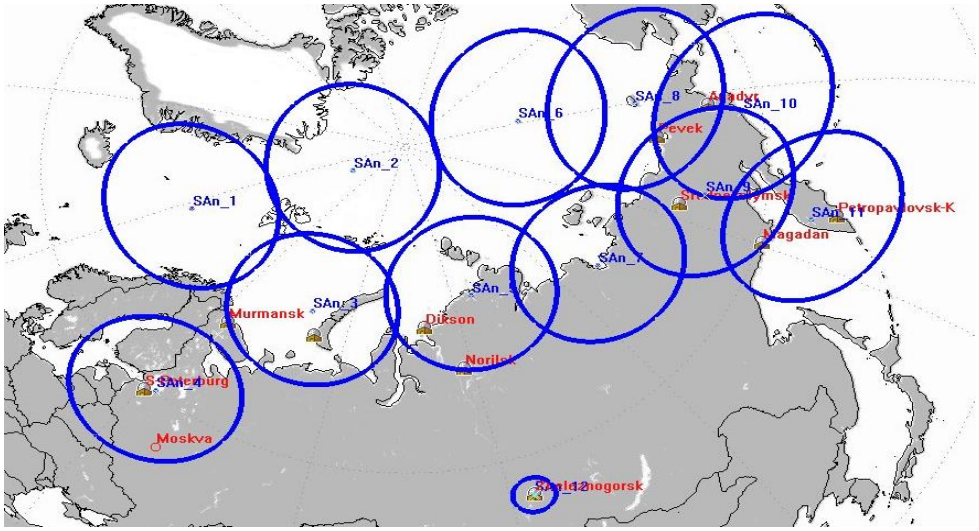
В состав центра спутниковой связи входят центральные станции (ЦС) с антенными постами, модемным оборудованием, центром управления системой, маршрутизаторы. В задачи ЦС входят организация приема-передачи сигналов с КА, автоматическое обнаружение и сопровождение КА на орбите, взаимодействие с модемным оборудованием.

Центр спутниковой связи будет размещен в непосредственной близости от существующих магистральных линий связи и коммуникаций, что существенно расширяет возможности применения данной системы спутниковой связи различными ведомствами, организациями, в том числе и железнодорожными компаниями.

В рамках создания данной системы разрабатывается несколько типов абонентских терминалов для установки как на стационарных объектах, так и на подвижных (подвижной состав железных дорог). Общий вид терминалов представлен на рисунке 5 и их основные характеристики приведены в таблице 1 [7].

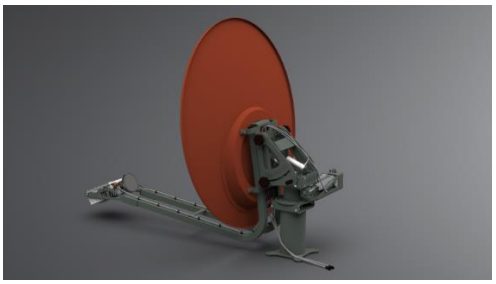


а *– на основном витке*



б *– на сопряженном витке*

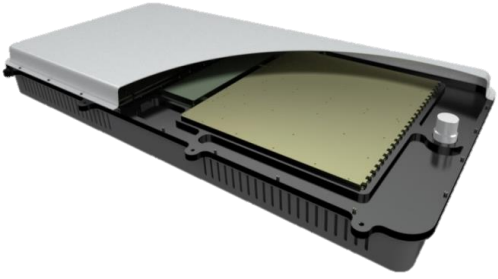
Рисунок 4 *– Многолучевая зона покрытия КА «Экспресс-РВ» в Ku-диапазоне в апогее*



а) Абонентский терминал тип 1

б) Абонентский терминал тип 2

в) Абонентский терминал тип 3



г) Абонентский терминал тип 4

Рисунок 5 *– Общие виды абонентских терминалов*

Применение систем спутниковой связи на ВЭО имеют такую важную и значимую особенность, как необходимость слежения антенной системы центральных станций и абонентских терминалов за положением космического аппарата на орбите, так и космический аппарат должен иметь функцию перенацеливания узконаправленных антенн на земные станции и абонентские терминалы. Данный фактор обусловлен тем, что КА постоянно передвигаются относительно земной поверхности, в отличие от геостационарной орбиты, где угловая скорость движения КА по орбите, расположенной в плоскости экватора Земли, равна угловой скорости вращения Земли, что создает эффект «зависания» геостационарного КА относительно поверхности Земли.

Таблица 1 *– Основные технические характеристики абонентских терминалов*

Параметры	**АТ тип 1**	**АТ тип 2**	**АТ тип 3**	**АТ тип 4**
Частотный диапазон	Передача 10 700-11 700 МГц Прием 13 750-14 500 МГц			
Тип антенны	Офсет	Фазированная антенная решетка (ФАР)	Прямо-фокусная	Активная фазированная антенная решетка
Тип опорно – поворотного устройства (ОПУ)	2-осевое	2-осевое	3-осевое	Электронное сканирование
Диаметр рефлектора	0,9 м	Эквивалент 0,9 м	1,2 м	0,9 м (эквивалент)
Скорость приема / передачи (ПРМ/ПРД), Мбит/с	60/4	60/4	70/6,5	60/4
Эквивалентная изотропная излучаемая мощность (ЭИИМ) дБВт	47,5	47,5	50	47,9
G/T, дБ/К	13	13	16	13,8

Абонентские терминалы тип 1-3 ССС «Экспресс-РВ» имеют в своем составе опорно-поворотные устройства (ОПУ) для осуществления слежения за космическим аппаратом. Абонентский терминал тип 4 конструктивно построен на основе активной фазированной антенной решеткой, где перенацеливание луча в горизонтальной и вертикальной плоскости осуществляется путем изменения управляющих сигналов на фазовращатели антенной решетки. Данный абонентский терминал состоит из конструкции - основания, блока системы наведения (БСН), фазированной антенной решетки (ФАР), блока цифрового управления (БЦУ), усилителя мощности с конвертером (УМК) и двух внешних антенн глобальной навигационной спутниковой системы. Общий вид абонентского терминала тип 4 приведен на рисунке 6.

Электропитание данного терминала производится от промышленной сети переменного тока напряжением 220 Вольт частотой 50 Гц. Допустимая мощность электропотребления 1 кВт. Данный АТ, по условиям технического задания на его разработку, должен штатно функционировать на крыше пассажирского вагона или локомотива. Пример расположения АТ тип 4 на крыше локомотива приведен на рис. 7.

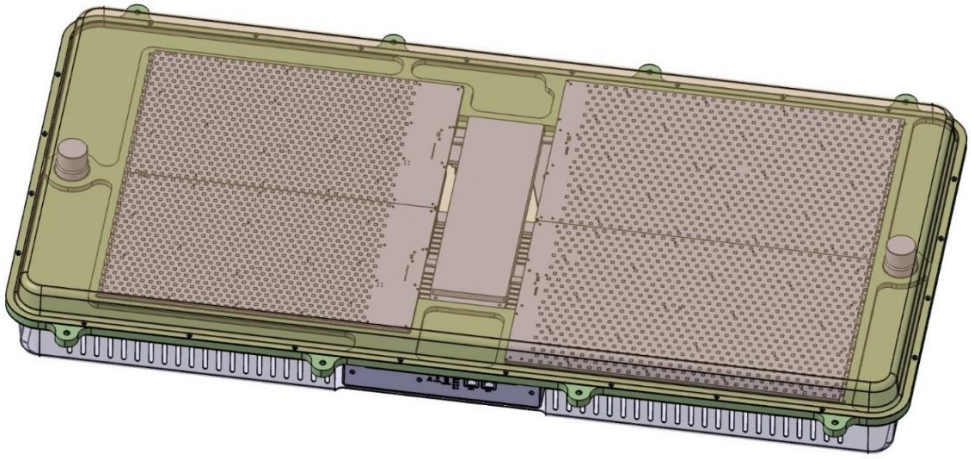


Рисунок 6 *– Общий вид абонентского терминала тип 4*

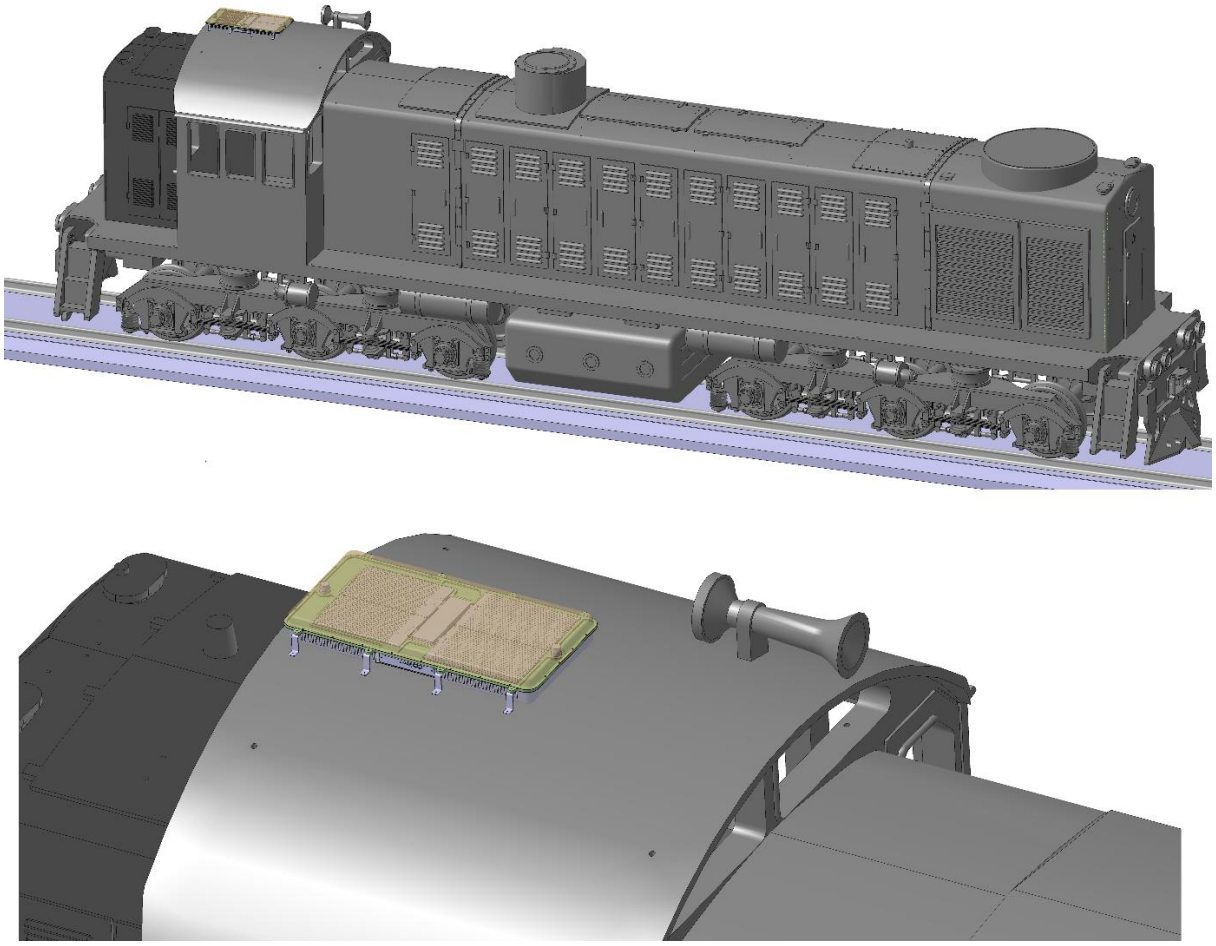


Рисунок 7 *– Расположение абонентского терминала тип 4 на крыше локомотива*

Перспективы применения спутниковой системы связи «Экспресс-РВ» после ее запуска и ввода в эксплуатацию поможет создать, а где-то и расширить возможности по предоставлению мультисервисных услуг связи при осуществлении пассажирских перевозок и организации работы железнодорожных компаний.

На рисунке 8 приведена схема перспективного применения системы спутниковой связи на железнодорожном транспорте. Данная схема может дополнятся исходя из потребностей потребителей.

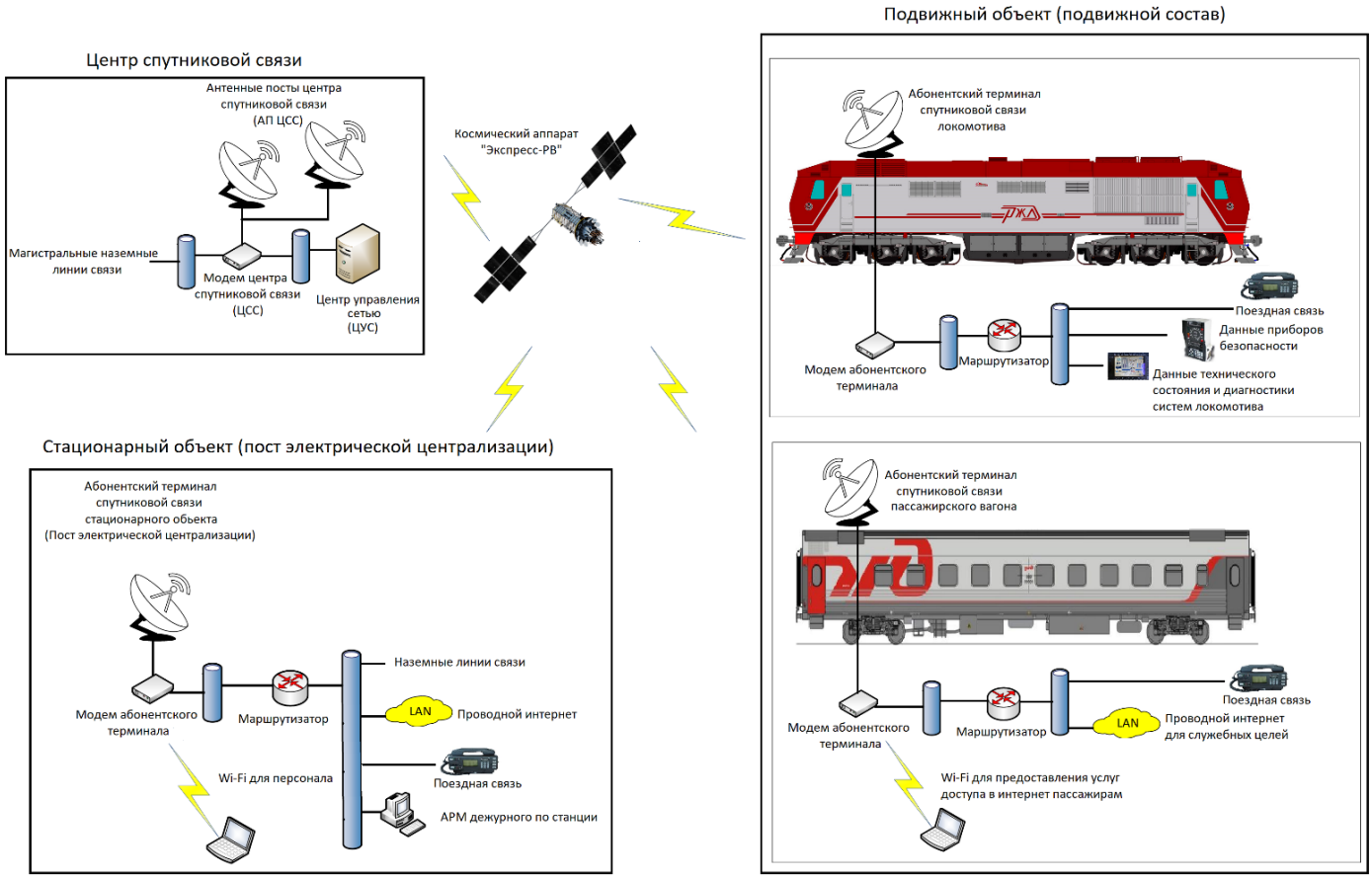


Рисунок 8 *– Схема перспективного применения системы спутниковой связи «Экспресс-РВ» в интересах железнодорожного транспорта*

Список использованных источников

1. Прогноз долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2030 года, март, 2013 Режим доступа: http://static.government.ru/media/files/41d457592e04b76338b7.pdf (дата обращения 05.03.2025)
2. Угольная компания Эльга : официальный сайт URL: // https://elga.ru (дата обращения 05.02.2025).
3. АО «АК «Железные дороги Якутии»: официальный сайт URL: // https://rw-y.ru (дата обращения 05.02.2025).
4. Официальный сайт полномочного представителя Президента Российской Федерации в Уральском федеральном округе: официальный сайт URL: // http://uralfo.gov.ru/projects/sshh/ (дата обращения 05.02.2025).
5. Российские железные дороги: официальный сайт URL: https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=215271 (дата обращения 05.02.2025).
6. Камнев Е.Ф., Аболиц А.И., Акимов А.А., Белов А.С., Бобков В.Ю., Пелехатый М.И. Системы спутниковой связи с эллиптическими орбитами, разнесением ветвей и адаптивной обработкой. – М.: Глобсатком, 2009. – 724 с. с ил.
7. «Экспресс-РВ-ЦСС» Обзор перспективных спутниковых абонентских терминалов, 2023 Режим доступа: https://www.satcomrus.ru/upload/iblock/b06/ dky9355wcqpo78iuqvdjnxatrghi2hu7.pdf (дата обращения 05.03.2025).

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва» (АО «РЕШЕТНЁВ»), г. Железногорск Красноярского края.

Фролов Илья Сергеевич:
инженер-конструктор 2-й категории.

УДК 629.423.1 ГРНТИ 55.41.03

Е. А. Чабан, А. Г. Андриевский

ОЦЕНКА ДЕЙСТВИЯ ВИБРАЦИОННОЙ НАГРУЗКИ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КОЖУХА ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОВОЗА

Аннотация. *Представлены результаты исследования закономерности динамического отклика конструкции кожуха зубчатой передачи при действии вибрационной нагрузки в частотном диапазоне от 0 до 1600 Гц. В качестве методов исследования использовались численный и экспериментальный методы. Путем численного исследования определены собственные частоты кожуха и подтверждены предполагаемые резонансные условия работы конструкции кожуха в диапазоне частот возмущения от 0 до 1600 Гц, определены уровни напряжения для установленных режимов резонансной работы конструкции. Экспериментально, методом возбуждения колебаний одиночным ударом, определён коэффициент демпфирования конструкции на резонансных частотах работы.*

Ключевые слова: *кожух зубчатой передачи, нагруженность конструкции, собственная частота, виброускорение, численное исследование, напряженное состояние.*

Динамическая нагруженность необрессоренной экипажной части электровозов, а именно такого элемента колесно-моторного блока как кожух зубчатой передачи (КЗП), существенно влияет на техническое состояние элементов конструкции, прочность при механических воздействиях [1-4]. Согласно ГОСТ 30631-99 [5], устанавливающего единые требования по стойкости к механическим внешним воздействующим факторам для технических изделий, для неподрессоренного оборудования расположенного на тележке электровоза, уровень синусоидальной вибрации в диапазоне частот от 0,5 до 100 Гц составляет 150 м/с^2, что соответствует частотам кинематических возмущений со стороны пути для интервала эксплуатационных скоростей грузовых локомотивов. Также ГОСТ 2582-2013 [6] для тяговых двигателей с опорно-осевым подвешиванием устанавливает уровень ускорения вибрационного воздействия равного геометрической сумме вертикальной, продольной и поперечной составляющих вибрации до 155 м/с^2 в диапазоне частот от 10 до 100 Гц. При этом наиболее высокая частота возмущения характерна для коротких неровностей пути длиной от 0,3 м до 0,5 м [7]. Такие длины неровностей наблюдаются при волнообразном износе рельсов. Однако, следует отметить, что диапазон частот вибраций, определяемый экспериментальным путем для КЗП [8], имеет более высокие частоты и может возбуждаться действием фрикционных сил в контакте колесо рельс при наличии скольжения в контакте «колесо – рельс», особенно при движении в кривых участках пути, где гребень набегающей первой колесной пары по ходу движения электровоза вынужден упираться во внешнюю рельсовую нить или частотой пересопряжения зубьев в зубчатой паре тяговой передачи. Для оценки влияния высокочастотной вибрации на выработку прочностного ресурса материалом кожуха

представляется целесообразным определить уровень возникающих напряжений при действии высокочастотной вибрации.

С целью проведения такой оценки для КЗП был выполнен модальный расчет в программной среде *Ansys Workbench* для разработанной твердотельной модели кожуха (рис. 1). При этом считалось, что все элементы кожуха абсолютно жестко соединены между собой, а сам кожух жестко закреплен в точках крепления к тяговому двигателю. При этом наличием смазки в нижней половине КЗП пренебрегалось, поскольку вес смазочного масла должен составлять 4,2 кг, а это по отношению к весу КЗП составляет порядка 3%, что на результат проводимого исследования существенного влияния не оказывает, а обмен механической энергией между смазочной жидкостью и стенками кожуха несущественен. Проведенные расчеты позволили также определить амплитудные частотные характеристики составляющих вибрацию конструкции КЗП в точке под горловиной под ось колесной пары (рис. 2).

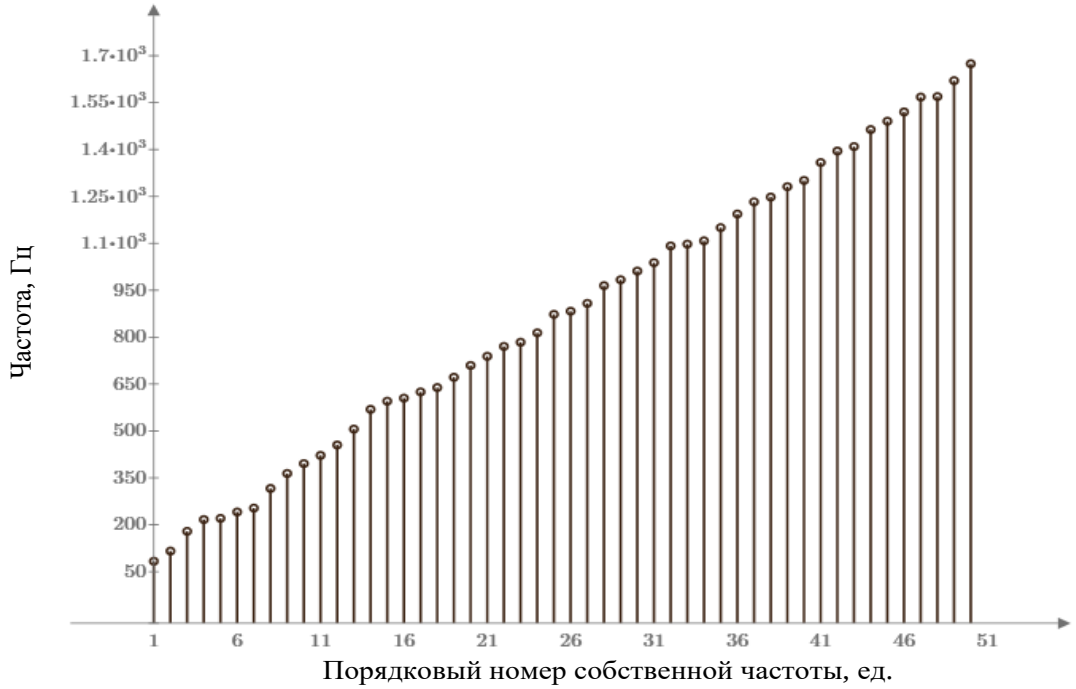


Рисунок 1 – Полоса спектра собственных частот КЗП

Первая собственная частота 83,54 Гц (рис. 1) соответствует изгибным колебаниям боковин кожуха в горизонтальной плоскости ввиду малой жесткости конструкции кожуха в этом направлении. Оценка отклика на синусоидальное воздействие конструкции кожуха выполнялась при действии суммарного вектора ускорений в продольном, вертикальном и горизонтальном направлениях амплитудой 155 м/с^2 в диапазоне частот от 0 до 1600 Гц. Согласно полученным результатам выполненного расчета (рис. 2) колебания конструкции кожуха, возникающие на частоте 1510 Гц, не вызывают действительно значимых индуцированных ускорений и смещений. Таким образом, несмотря на то что данная форма колебаний совпадает с силовой функцией, коэффициент участия массы в направлении силовой функции в ней составляет менее 5%, что не вызывает существенных деформаций конструкции и, соответственно, не вызывает возникновения высоких уровней интенсивностей напряжения.

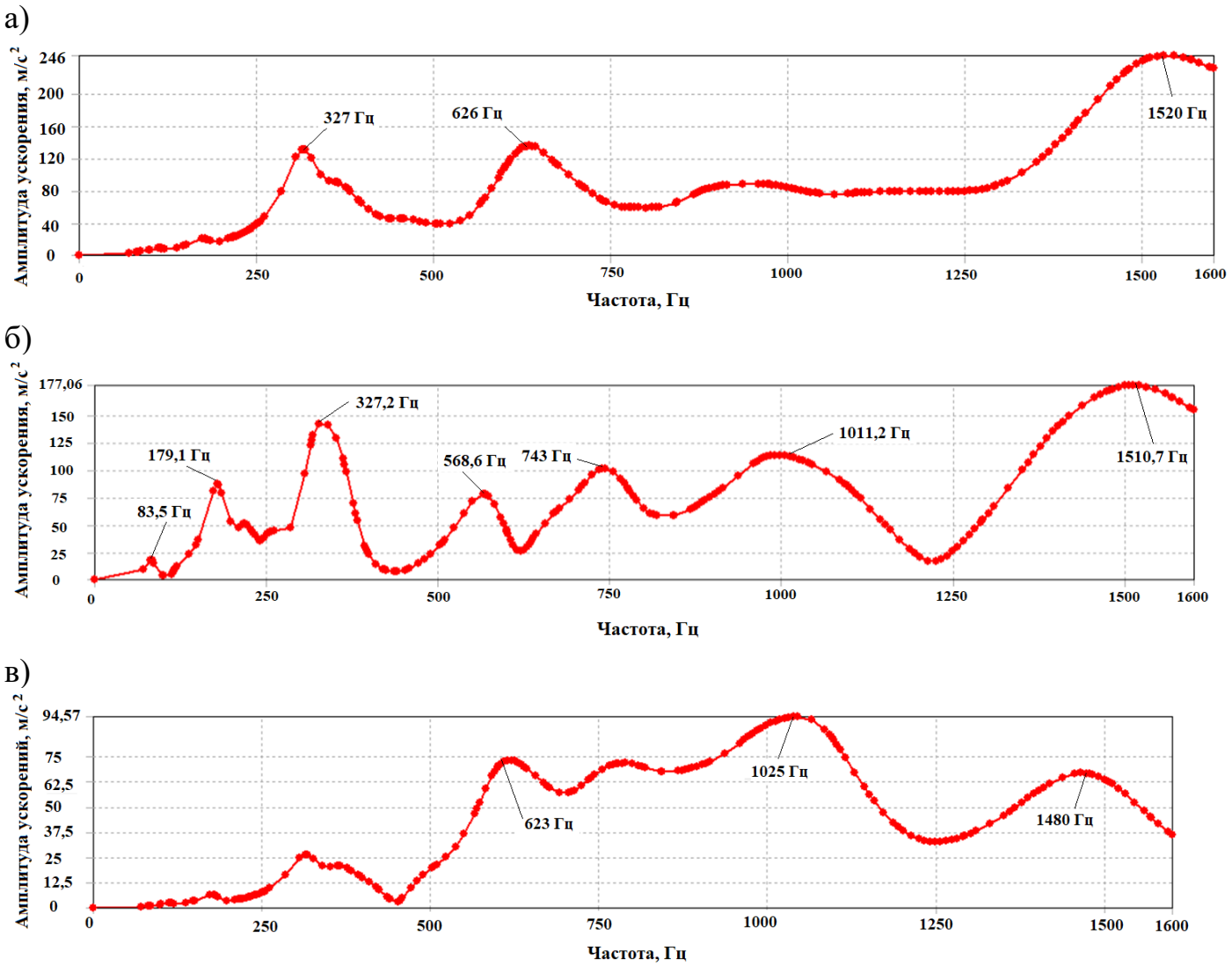


Рисунок 2 – Амплитудные частотные характеристики составляющих вибрацию конструкции КЗП:
а – вертикальной, б – поперечной оси пути, в – продольной оси пути

Для экспериментальной оценки собственных частот КЗП был применен метод возбуждения колебаний одиночным ударом. При этом вибропреобразователь, измеряющий процесс $x(t)$, закреплялся на стенке кожуха со стороны его крепления к остову тягового двигателя. Полученный в результате спектр виброускорений для КЗП (рис. 3) позволяет наблюдать на некоторых частотах пиковые значения виброускорения, свидетельствующие о возникающих резонансных явлениях, возможных при наличии соответствующей собственной частоты кожуха и совпадении ее с частотой возмущения.

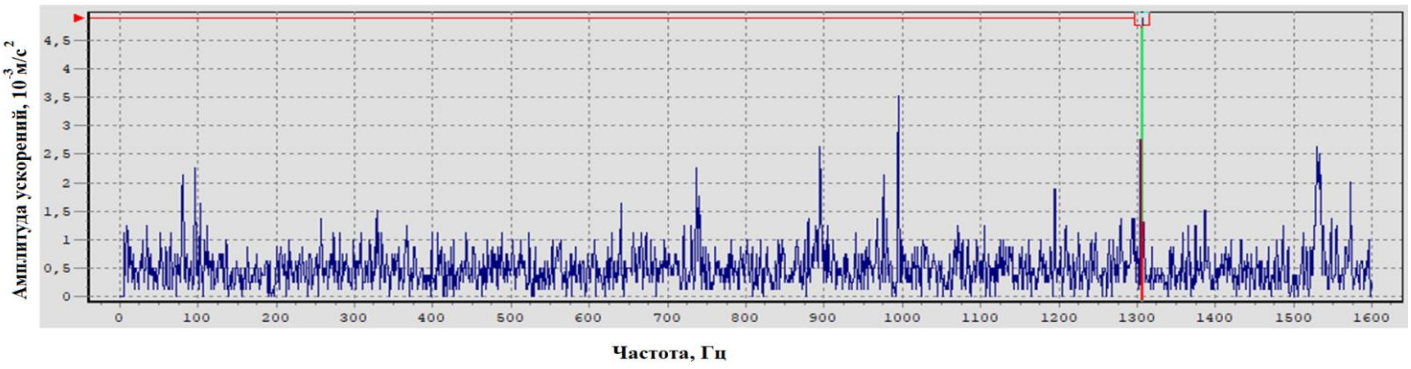


Рисунок 3 – Спектр виброускорений КЗП в поперечном направлении

Результат сравнения пиков амплитуд ускорений, полученных путем численного моделирования (рисунок 2, б), и пиков спектра виброускорений КЗП, полученного экспериментальным путем (рисунок 3), показывает, что частоты, на которых наблюдаются пиковые значения ускорений совпадают, что свидетельствует о соответствии частот, полученных путем численного моделирования, собственным частотам конструкции кожуха и адекватности разработанной твердотельной модели КЗП. Так, например, полученное экспериментальным путем значение максимума виброускорения на частоте 82 Гц согласуется с расчетным значением собственной частоты полученного для модели с жестким креплением КЗП, что свидетельствует об адекватности расчетных данных полученных на модели КЗП. Добротность колебательной системы на частоте 82 Гц составила Q = 20,7 ед., логарифмический декремент затухания λ = 0,1521 ед., время релаксации τ = 80 мс. Данные параметров для других собственных частот КЗП приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры конструкции КЗП, полученные экспериментально

Собственная частота, *f*, Гц	82	96	240	330	736,65	997,8	1529
Добротность, Q, ед.	20,7	22,9	55,1	34,5	2914,2	983,9	166,5
Логорифмический декремент затухания, λ, ед.	0,1521	0,1371	0,057	0,0576	0,0011	0,0032	0,0189
Время релаксации, τ, мс	80	80	73	53	1259	771	35

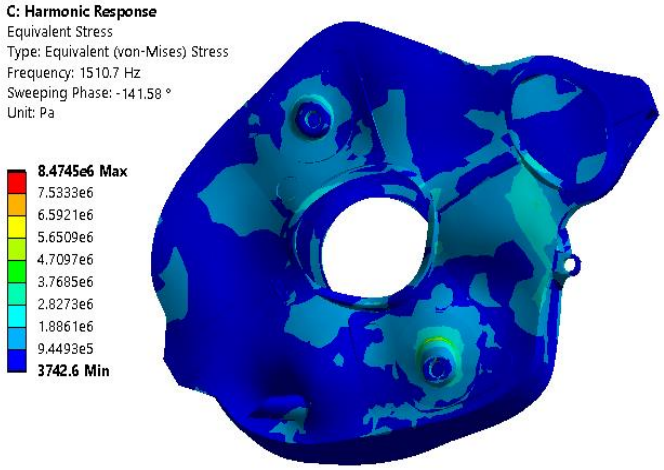
Представляет практический интерес определения уровня интенсивности напряжений на частотах, где наблюдаются пиковые значения ускорений (рис.2). Однако, стоит отметить, что наличие высоких уровней ускорений на высоких частотах не приводит к возникновению, высоких уровней напряжений, как это можно видеть на рис. 4. Полученные в результате численного исследования максимальные значения интенсивности напряжений, возникающие в конструкции КЗП для различного уровня частот, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Уровни интенсивности напряжений, возникающие в конструкции КЗП, соответствующие частотам вибрации

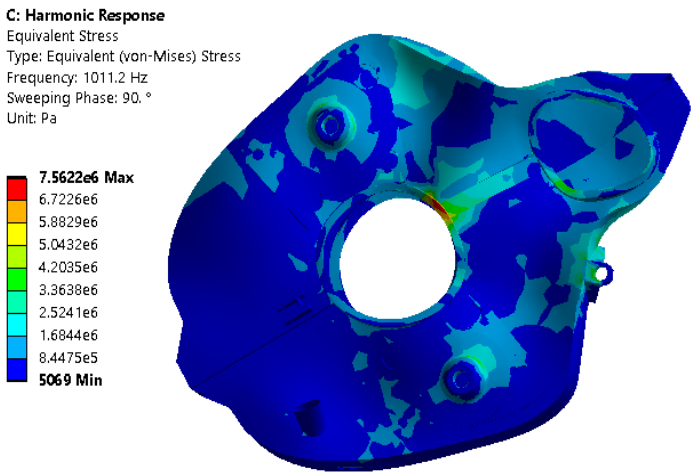
Частота вибрации, Гц					
83,5	327,2	565,68	743,64	1011,2	1510,7
Интенсивность напряжений, МПа					
63,4	53,01	14,3	11,5	7,56	8,47

В процессе эксплуатации кожух подвержен широкому спектру возмущений, с частотой до 1600 Гц, при этом отклик конструкции кожуха на возмущения при действии гармонической вибрации приводит к появлению индуцированной части ускорений на частотах 1510,7 Гц; 1011,2 Гц; 743,64 Гц; 565,68 Гц; 327,2 Гц; 179,17; 83,5 Гц. При имеющихся резонансных режимах работы конструкции КЗП уровень возникающих интенсивностей напряжений при штатных условиях эксплуатации кожуха [1, 4] не превышают значения напряжения предела выносливости материала конструкции Ст.3 при симметричном цикле нагружения σ_{-1} = 180 МПа.

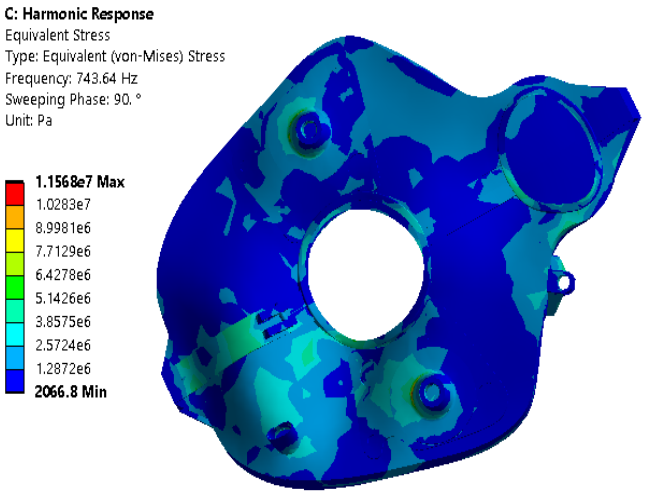
а.



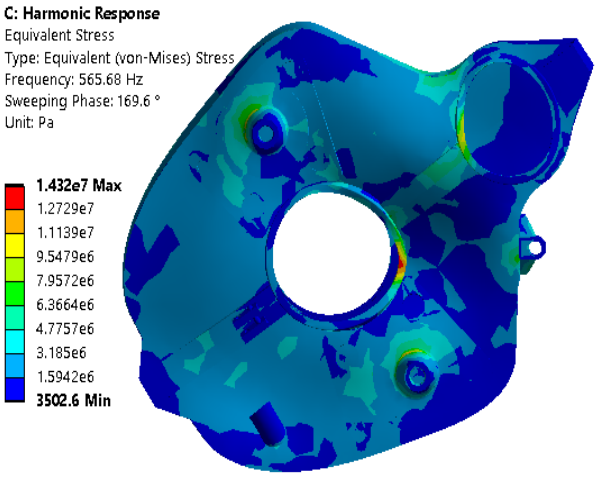
б.



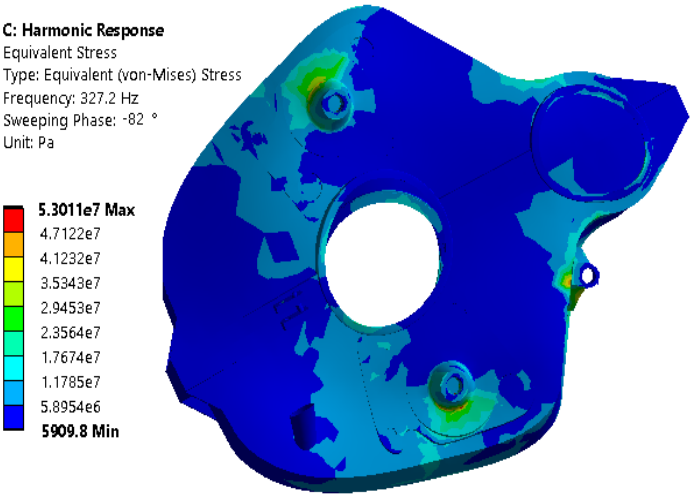
в.



г.



д.



е.

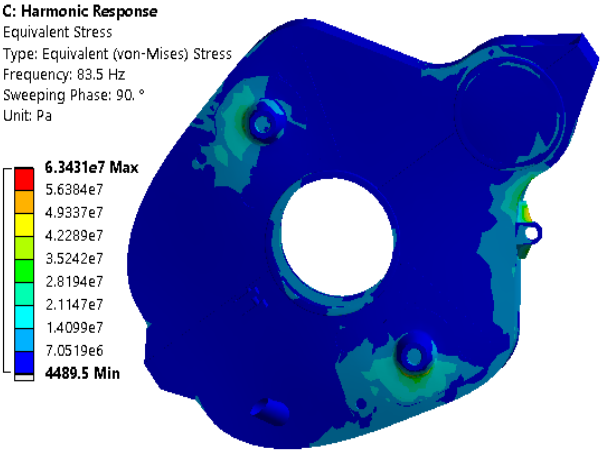


Рисунок 4 – Интенсивность напряжений при действии вибрационной нагрузки для уровней частот: а – 1510,7 Гц; б – 1011,2 Гц; в – 743,64 Гц; г – 565,68 Гц; д – 327,2 Гц; е – 83,5 Гц

Таким образом, влияние высокочастотной вибрации на конструктивную прочность КЗП не может являться основной причиной интенсивной выработки усталостного ресурса КЗП грузовых электровозов, которое наблюдается в эксплуатации.

Список использованных источников

1. Москвичев В. В., Чабан Е. А., Андриевский А. Г. Проблемы кожухов зубчатой передачи электровозов: отказы, нагруженность, виброзащита // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2020. № 1(65). – С. 31-42.
2. Андриевский А. Г., Чабан Е. А. Обеспечение конструкционной прочности кожуха зубчатой передачи грузового локомотива // Безопасность и мониторинг природных и техногенных систем : материалы и доклады, Кемерово, 05–09 октября 2020 года. – Кемерово: ФИЦ ИВТ, 2020. – С. 68-70.
3. Андриевский А. Г., Чабан Е. А. Влияние на прочность кожуха зубчатой передачи электровоза условий его закрепления // Безопасность и мониторинг природных и техногенных систем : материалы и доклады, Красноярск, 16–20 октября 2023 года. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий", 2023. – С. 99-102.
4. Андриевский А. Г., Москвичев В. В., Чабан Е. А. Расчетно-экспериментальное определение динамических характеристик кожуха тяговой зубчатой передачи электровоза // Известия Транссиба. 2020. № 3(43). – С. 47-57.
5. ГОСТ 30631-99. Общие требования к машинам, приборам и другим техническим изделиям в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам при эксплуатации. – Москва: Изд-во стандартов, 1999. – 31с.
6. ГОСТ 2582-2013. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2014. – 56 с.
7. Андриевский, А. Г. Динамическое нагружение кожуха зубчатой передачи от крутильных колебаний остова тягового двигателя / А. Г. Андриевский, Е. А. Чабан // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2019. – Т. 2. – С. 203-207.
8. О вибрации колесно-моторного блока вследствие взаимодействия колеса с рельсом и работы зубчатой передачи электровоза 3ЭС5К в условиях горно-перевального участка / А. Ю. Портной, О. В. Мельниченко, К. П. Селедцов [и др.] // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2020. – Т. 24, № 3(152). – С. 527-547.

КрИЖТ ИрГУПС, г. Красноярск

Чабан Елена Анатольевна: к.т.н., доцент.

Андриевский Анатолий Геннадьевич: старший преподаватель.

УДК 629.423.1 ГРНТИ 55.41.03

Е. А. Чабан, А. Г. Андриевский

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА КОЖУХА ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОВОЗА

Аннотация. *Сложные условия эксплуатации электровозов в условиях Восточного полигона, вероятностный характер одновременного приложения нестационарных нагрузок, возможность возникновения условий резонансных колебаний кожуха зубчатых передач может приводить к наступлению предельного состояния раньше проектного срока эксплуатации. Проведение восстановительных технологических мероприятий поврежденных кожухов дает лишь временный эффект. С целью определения возможности, условий и сроков дальнейшей безопасной эксплуатации, планирования ремонтно-восстановительных работ для кожуха целесообразно давать оценку его остаточного ресурса. Предложена методика расчета остаточного ресурса кожуха зубчатых передач.*

Ключевые слова: *кожух зубчатой передачи, ослабление болтового крепления, предельное состояние, остаточный ресурс, номограмма.*

Одним из наиболее повреждаемых элементов колесно-моторного блока (КМБ) грузового электровоза является кожух зубчатых передач (КЗП). Основными причинами возникновения выявляемых отказов для КЗП являются повреждение элементов крепления, составляющие порядка 44 % от всех отказов, и повреждение непосредственно сварной конструкции кожуха – 56 %. При этом наблюдается зависимость возникновения количества отказов от сезонного фактора – ежегодно в период с ноября по март количество отказов КЗП за счет повреждений усталостного характера резко увеличивается, а в весенне-летний период времени практически отсутствует [1, 2].

Сложные условия нагружения КЗП при эксплуатации электровозов в условиях Восточного полигона, вероятностный характер одновременного приложения нестационарных нагрузок, возможность возникновения условий резонансных колебаний может приводить к наступлению предельного состояния для кожуха раньше проектного срока эксплуатации. Основным критерием наступления предельного состояния для КЗП является возникновение повреждения в виде трещины в сварном шве кожуха, основном металле стенки кожуха, кронштейне крепления к остову тягового электродвигателя (ТЭД) [3 - 4].

Применение консольного (навесного) крепления КЗП (рисунок 1, а и б) в КМБ электровозов имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что КЗП крепится болтами, которые установлены с зазором в отверстиях кронштейнов двигателя и подвержены вибрационным нагрузкам, что является причиной ослабления их затяжки в условиях эксплуатации и, как следствие, наступление нештатного условия крепления кожуха к остову тягового двигателя [5, 6].

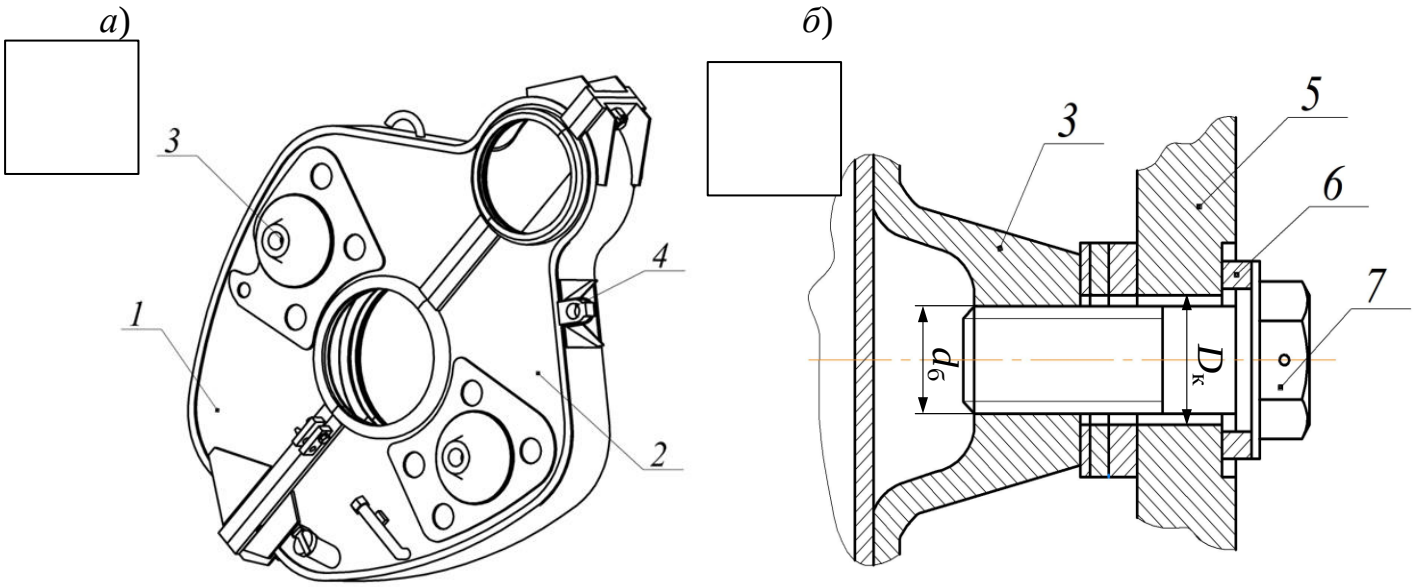


Рисунок 1 – Кожух зубчатой передачи (а), эскиз болтового соединения «бобышка КЗП – кронштейн тягового двигателя» (б): 1 – верхняя разъемная часть; 2 – нижняя разъемная часть; 3 – бобышка; 4 – кронштейн кожуха; 5 – кронштейн двигателя; 6 – упругая шайба; 7 – болт

Основные причины неработоспособного состояния КЗП можно разделить на две группы [1]:

- повреждение элементов крепления – отсутствие и излом болтов, а также повреждение резьбы болтов и бобышки – 44 %;
- повреждение сварной конструкции кожуха – развитие усталостных трещин и его разрушение, а также излом кронштейнов – 56 %.

Необходимо отметить, что обнаружение трещин и проведение восстановительных технологических мероприятий поврежденных КЗП дает лишь временный эффект, учитывая ускоренное образование трещин в области ремонта. В этом случае с целью определения возможности, условий и сроков его дальнейшей безопасной эксплуатации, планирования ремонтно-восстановительных работ целесообразно проводить оценку остаточного ресурса КЗП, который необходимо осуществлять по результатам оценки параметров технического состояния болтовых креплений к остову ТЭД.

Оценку параметров технического состояния болтовых креплений и КЗП рекомендуется проводить по результатам проведения обследования и оперативной диагностики при проведении планового технического осмотра (ТО), выполняемом с целью получения данных о текущем техническом состоянии КЗП. В случае выявления нештатного крепления КЗП к ТЭД после проведения ТО в Журнале регистрации технического состояния электровоза рекомендуется указать пробег электровоза для обследуемого кожуха, а также причины невосприятия нагрузки болтовыми креплениями, которыми могут являться: ослабление болтового соединения в процессе эксплуатации электровоза или отказ болтового соединения в процессе эксплуатации электровоза.

Целью такого анализа параметров технического состояния КЗП является установление уровня фактической нагруженности, необходимого для прогнозирования остаточного эксплуатационного ресурса КЗП.

Анализ параметров текущего технического состояния КЗП включает:

- оценку параметров технического состояния болтовых креплений КЗП, их соответствие требованиям нормативно-технической и конструкторской документации, а по отклонению от требований – установление определяющих параметров технического состояния;

- оценку фактической нагруженности болтовых креплений КЗП к остову ТЭД, выполненную расчетным методом с учетом всех режимов нагружения и действующих нагрузок, фактической геометрии конструкции, фактических толщин ее несущих элементов, имеющихся и выявленных концентраторов напряжений и экспериментальных результатов численных исследований напряженно-деформированного состояния КЗП;

- заключение о возможности дальнейшей эксплуатации КЗП с установлением назначенного ресурса в случае отсутствия повреждений, влияющих на параметры технического состояния кожуха.

Для КЗП, эксплуатируемого в условиях циклического нагружения, прогнозирование остаточного ресурса рекомендуется проводить по результатам контроля технического состояния его болтовых креплений к остову ТЭД. Контроль технического состояния проводится в соответствии с технологией технического обслуживания и ремонта для обследуемой серии электровоза. В этом случае показателем остаточного ресурса КЗП является наработка в виде пробега электровоза с КЗП, имеющим нештатное крепление к остову ТЭД.

Расчет остаточного ресурса КЗП предлагается выполнять по следующей методике:

1. Определяется суммарное время работы электровоза на кривых и прямых участках пути

$$T = T_{кр} + T_{пр} = \frac{S_{кр}+S_{пр}}{\upsilon_{тех}},$$

где T – суммарное время работы электровоза; $T_{кр}$ и $T_{пр}$ – время работы в кривых и прямых участках соответственно; $S_{кр}$ и $S_{пр}$ – пробег в кривых и прямых участках соответственно; $\upsilon_{тех}$ – техническая скорость.

2. Поскольку в процессе эксплуатации электровоз движется с различными скоростями, доли времени работы в интервалах скоростей задаются согласно [7], то время работы электровоза можно представить в виде произведения

$$T = \left(T_{кр} + T_{пр}\right)(k_{\upsilon 1} + k_{\upsilon 2} + k_{\upsilon 3} + k_{\upsilon 4} + k_{\upsilon 5} + k_{\upsilon 6} + k_{\upsilon 7} + k_{\upsilon 8}),$$

причем сумма $\sum_{i=1}^{n=8} k_{\upsilon i} = 1$, где $k_{\upsilon i}$ – доли работы электровоза в i-ом интервале скоростей, для электровоза с конструкционной скоростью до 120 км/ч.

$$T = \left(\frac{S_{кр}+S_{пр}}{\upsilon_{тех}}\right)(k_{\upsilon 1} + k_{\upsilon 2} + k_{\upsilon 3} + k_{\upsilon 4} + k_{\upsilon 5} + k_{\upsilon 6} + k_{\upsilon 7} + k_{\upsilon 8}).$$

3. Количество циклов нагружения можно определить по формуле

$$N = T\sum_{i=1}^{n}\frac{\upsilon_i k_{\upsilon i}}{L_{нер}}$$

4. Определяется долговечность кожуха по формуле

$$T_к = \frac{1}{\frac{n}{N}} = \frac{1}{\frac{T\sum_{i=1}^{n}\frac{\upsilon_i k_{\upsilon i}}{L_{нер}}}{N}}$$

5. Расчет остаточного ресурса КЗП (в годах) определяется по следующей формуле

$$T_к = \frac{1}{\sum_{i=1}^{k}\frac{365 S_{ср.сут.}\alpha_i}{\upsilon_{тех}}\left(\frac{\sum_{j=1}^{n}\frac{\upsilon_j k_{\upsilon j}}{L_{нер.i}}}{N_0\left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{ai}+\psi\sigma_{mi}}\right)^m}\right)},$$

где $S_{ср.сут.}$ – среднесуточный пробег локомотива;

$\upsilon_{тех}$ – техническая скорость локомотива;

α_i – коэффициент учитывающий долю пути от общего пробега с характерными длинами неровностей $L_{нер i}$;

υ_j – средняя скорость для j-го интервала скоростей;

$k_{\upsilon j}$ – доля времени работы электровоза в j-м интервале скоростей;

N_0 – базовое число циклов при испытании;

σ_{-1} – предел выносливости для стали КЗП;

σ_{ai},σ_{mi} – амплитуда и среднее значение напряжений цикла для i-го режима нагружения;

m – показатель степени кривой усталости материала;

ψ – коэффициент чувствительности материала КЗП к асимметрии цикла нагружения;

k – число учитываемых режимов эксплуатационного нагружения.

На рисунке 2 показана номограмма для оценки влияния на долговечность КЗП повышенных нагрузок в случае отказа точек крепления: верхней бобышки и кронштейна (1), нижней бобышки и кронштейна (2), верхней бобышки (3), нижней бобышки (4).

Остаточный ресурс КЗП определяется следующим образом. По расчетной кривой долговечности для КЗП по оси абсцисс определяют пробег, соответствующий половине пробега для электровоза с момента проведения последнего ТО. Затем по кривой долговечности определяют соответствующее ему количество лет, характеризующее уменьшение эксплуатационного ресурса КЗП. Учитывая, что ресурс КЗП при благоприятных условиях его эксплуатации рассчитан на срок порядка 50 лет, эксплуатация кожуха в условиях нештатного закрепления может значительно снижать его эксплуатационный ресурс.

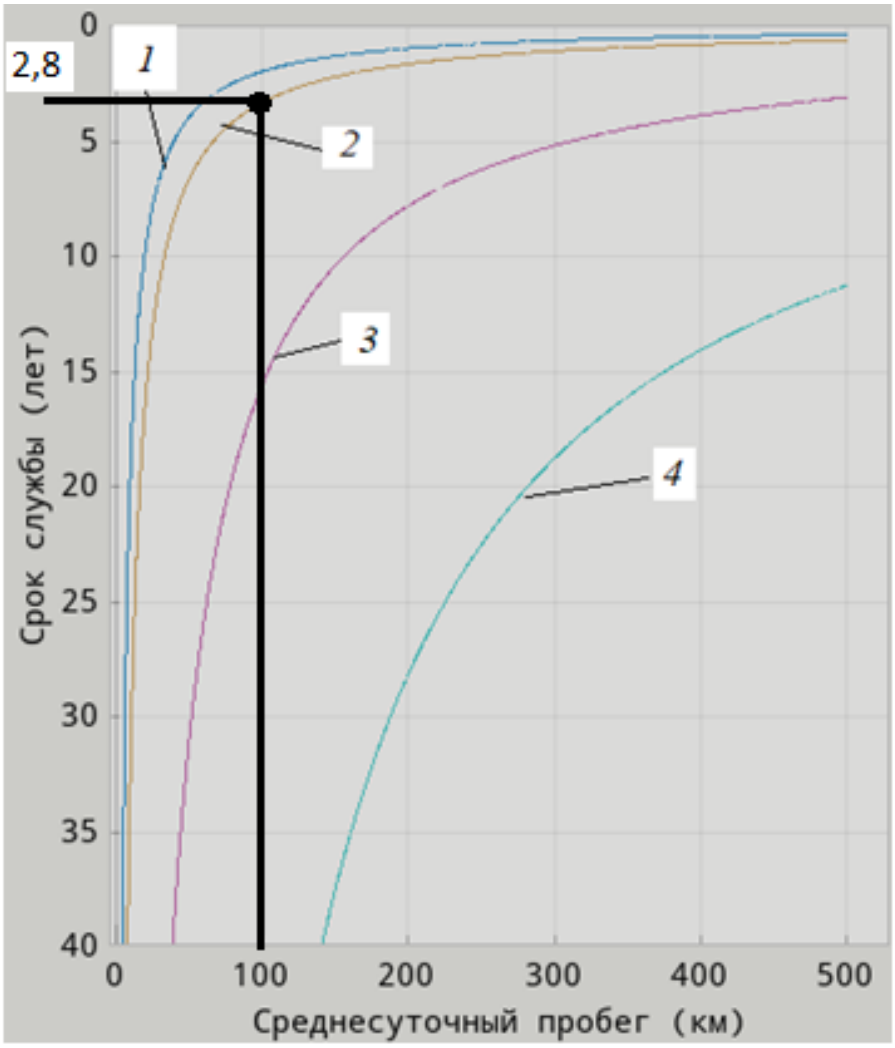


Рисунок 2 – Номограмма для оценки влияния на долговечность КЗП повышенных нагрузок в случае отказа точек крепления: верхней бобышки и кронштейна (1), нижней бобышки и кронштейна (2), верхней бобышки (3), нижней бобышки (4)

В качестве примера рассмотрим определение остаточного ресурса обследуемого при очередном ТО КЗП, для которого было выявлено ослабление болтового крепления нижней бобышки и кронштейна. Пробег для электровоза с момента проведения последнего ТО составил порядка 1 000 км.

По кривой долговечности для КЗП (рис. 2) на оси абсцисс определяем пробег, соответствующий величине пробега при нарушении условий крепления, например, 100 км. Этому пробегу соответствует уменьшение ресурса до 2,8 лет. В журнале указываем, что остаточный ресурс для обследуемого КЗП составляет 2,8 года.

Результаты анализа параметров текущего технического состояния КЗП рекомендуется оформлять в виде технического заключения с решением о возможности его дальнейшей эксплуатации с указанием назначенного эксплуатационного ресурса. Результаты выполненных расчетов по прогнозированию остаточного ресурса КЗП должны оформляться в виде отчета и служить основанием для принятия решения о наблюдении и проведении профилактических ремонтно-восстановительных мероприятий.

Список использованных источников

1. Москвичев В. В., Чабан Е. А., Андриевский А. Г. Проблемы кожухов зубчатой передачи электровозов: отказы, нагруженность, виброзащита // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2020. № 1(65). – С. 31-42.
2. Андриевский А. Г., Чабан Е. А. Обеспечение конструкционной прочности кожуха зубчатой передачи грузового локомотива // Безопасность и мониторинг природных и техногенных систем: материалы и доклады, Кемерово, 05–09 октября 2020 года. – Кемерово: ФИЦ ИВТ, 2020. – С. 68-70.
3. Андриевский А. Г., Москвичев В. В., Чабан Е. А. Расчетно-экспериментальное определение динамических характеристик кожуха тяговой зубчатой передачи электровоза // Известия Транссиба. 2020. № 3(43). – С. 47-57.
4. Проблема надежности кожухов зубчатой передачи электровозов серии "Ермак" / Е. Ю. Дульский, И. О. Лобыцин, Е. А. Милованова, П. Ю. Иванов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2018. – № 4(60). – С. 87-92.
5. Андриевский А. Г., Чабан Е. А. Влияние на прочность кожуха зубчатой передачи электровоза условий его закрепления // Безопасность и мониторинг природных и техногенных систем: материалы и доклады, Красноярск, 16–20 октября 2023 года. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий", 2023. – С. 99-102.
6. Галиев, И. И. Анализ причин неисправностей кожуха зубчатой передачи локомотива 2ЭС6 «Синара» / И. И. Галиев, М. Х. Минжасаров, Д. В. Липунов // Известия Транссиба. – 2023. – № 3(55). – С. 33-44.
7. ГОСТ Р 55513-2013. Локомотивы. Требования к прочности и динамическим качествам: национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : введен впервые: введен 2014-07-01 / разработан Научно-исследовательский и конструктор.-технолог. ин-т подвиж. состава. – М: Стандартинформ, 2014. – 41 с.

Красноярский институт железнодорожного транспорта

КрИЖТ ИрГУПС, г. Красноярск

Чабан Елена Анатольевна: к.т.н., доцент.

Андриевский Анатолий Геннадьевич: старший преподаватель.

УДК 629.488: 629.423.1 ГРНТИ 73.29.41

С. Г. Шантаренко, С. В. Савинкин, О. П. Супчинский

УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ЛОКОМОТИВОВ НОВЫХ СЕРИЙ

Аннотация. *В статье рассмотрены вопросы эффективности процессов управления жизненным циклом железнодорожного подвижного состава на стадии эксплуатации. Представлены результаты научных исследований динамических свойств экипажной части электровозов 2ЭС6 и разработки новых научно обоснованных решений в конструкции и технологических процессах ремонта локомотива, позволяющих повышать его эксплуатационную надежность за счет снижения интенсивности изнашивания и увеличения ресурса бандажей колесных пар на протяжении жизненного цикла.*

Ключевые слова: *управление жизненным циклом, кузовное подвешивание, поперечная связь, кузовная пружина, концевой виток, упор-ограничитель, возвращающий момент, боковая сила, износ гребня, эксплуатационная надежность.*

Жизненный цикл технической системы (ЖЦ) – это стадии процесса, охватывающие различные ее состояния начиная с момента появления и заканчивая полным выводом из эксплуатации, которые можно представить как идея, разработка, производство, эксплуатация, ликвидация [1].

Для железнодорожного подвижного состава ЖЦ определяется как «совокупность взаимосвязанных, последовательно осуществляемых процессов установления требований к потребительским свойствам и техническим параметрам железнодорожного подвижного состава, а также процессов его создания, применения и утилизации» [2].

Сложные технические системы проходят ЖЦ за десятки лет, управление которым есть стратегическое направление науки и технологической политики в промышленности и смежных секторах, позволяющим обеспечить сокращение затрат на разработку и производство наукоемкой продукции на 20…30 %; затрат, связанных с браком и устранением дефектов продукции, на 15…20 %; затрат в период эксплуатации продукции на 20…25 %; времени вывода на рынок новых образцов продукции на 60…70 % [3].

В начале двухтысячных годов под поддержкой жизненного цикла технического объекта (ЖЦТО) понимали в основном проектные и конструкторские работы, поскольку инструментальные средства были сосредоточены на автоматизированном проектировании и управлении данными. С ростом технической сложности изделий большую актуальность приобрело цифровое представление изделия на стадии эксплуатации (при выполнении ремонтов, технического обслуживания, закупки комплектующих). Таким образом, возникла необходимость планирования работ по техническому обслуживанию и ремонту (ТОиР) для обеспечения заданного уровня надежности изделия. Высокая конкуренция на рынке потребовала от предприятий сокращать время проектирования и подготовки производства изделий, а также затраты на эксплуатацию изделий, которые могли значительно превышать стоимость приобретения.

Стало очевидно, что разнообразные потребности в данных об изделии в цифровом формате могут быть обеспечены в полной мере только на основе системного подхода к информационной поддержке ЖЦ изделия [4].

В настоящее время можно утверждать, что поддержка (управление) ЖЦТО — это концепция, построенная на основе системных решений, обеспечивающих коллективную разработку, распространение и использование технических данных об изделии, а также управление ими, начиная с создания изделия и заканчивая его утилизацией. Поддержка жизненного цикла изделия обеспечивает интеграцию информации, персонала, бизнес-процессов, проектных, конструкторских, производственных и управленческих систем на всех стадиях жизненного цикла и объединяет в комплексную систему передовые подходы и опорные технологии, включая управление данными об изделии (PDM), коллективные разработки, визуализацию, цифровое производство, выбор стратегических поставщиков, управление соответствиями, их проверку и пр. [4].

Иными словами, управление жизненным циклом изделия - особая деятельность на стадиях разработки, производства, эксплуатации, ремонта и утилизации изделия, осуществляемая субъектами управления путем воздействия на конструкцию изделий, производственную среду, систему технической эксплуатации и собственно физические экземпляры изделий с целью повышения эффекта от создания и применения изделия, при максимально возможном снижении стоимости его ЖЦ [5].

Такое управление в общем случае включает в себя:

- установление значений контрольных параметров в предопределенных контрольных точках в процессах жизненного цикла;

- сбор и анализ информации и измерение значений контрольных параметров;

- реализацию управляющих воздействий.

Управление осуществляется циклически на основе обратных связей, образуемых за счет сбора информации и оценки значений контрольных параметров.

В реальной жизни управление ЖЦ тесно интегрировано в деятельность по разработке, производству и эксплуатации изделия и его выделение в отдельный подвид осуществляется условно, исключительно для удобства анализа и формирования необходимого методического, нормативного и технического инструментария [5].

Для железнодорожного подвижного состава эффективность процессов управления жизненным циклом на стадии эксплуатации достигается координацией решений, основанных на определении технического состояния объекта и знаниях о его обслуживании [6]. Подобная координация обеспечивает:

- полнофункциональное планирование и выполнение плановых текущих ремонтов и технического обслуживания на основе показателей эксплуатационной надежности и нормативных требований по техническому состоянию с учетом уровня технологической готовности ремонтных и сервисных предприятий;
- управление запасными частями и материалами с учетом выполняемых операций и обработки заказов на обслуживание;

- прослеживаемость финансов и активов;
- обучение и сертификация;
- мониторинг и прогнозирование технического состояния объектов жизненного цикла.

В период эксплуатации как самой продолжительной стадии жизненного цикла железнодорожного подвижного состава основными направлениями поддержки ЖЦ являются совершенствование и оптимизация технологических процессов эксплуатации и ремонта, конструктивных решений основных деталей, узлов и сборочных единиц, определяющих эксплуатационную надежность.

В последние годы в Омском государственном университете путей сообщения успешно развивается научное направление «Управление жизненным циклом и повышение эффективности использования локомотивов и вагонов новых серий», в рамках которого выполняемые учеными университета научные исследования по совершенствованию конструктивных решений, технологических процессов эксплуатации и ремонта локомотивов новых серий позволяют получать результаты по повышению эффективности процессов управления их жизненным циклом.

Оптимизация технологических процессов ремонта локомотивов. Экипажная часть (экипаж) является основной частью конструкции локомотива, обеспечивающей его движение в рельсовой колее, и представляет собой повозку с колёсными парами, в которой располагается необходимое энергетическое и вспомогательное оборудование. К экипажной части предъявляется ряд обязательных конструктивных требований и условий содержания при эксплуатации, таких как:

- способность двигаться на прямых и криволинейных участках пути, не вызывая перегрузок в элементах конструкции;
- сохранять прочность узлов и деталей в течение всего срока службы;
- защищать оборудование локомотива от вредного воздействия вибраций и внешней среды.

Кузовная ступень рессорного подвешивания (вертикальные упругие соединения) обеспечивает виброзащиту кузова, а улучшение плавности хода и снижение воздействия на путь – квазиупругие устройства поперечной связи – так называемые возвращающие устройства. Связи кузова с рамой тележки предназначены для передачи всех видов усилий между рамой кузова и тележкой. Кузовное подвешивание 2ЭС6 состоит из пружин типа «flexicoil» (рис. 1), гидравлических гасителей колебаний, упоров-ограничителей горизонтальных и вертикальных перемещений, а также наклонных тяг [7].

Поворот тележки относительно кузова в кривых участках пути вызывает поперечную деформацию концевых витков пружин до 91 мм в кривых участках радиусом до 80 – 100 м, при этом на тележку действует возвращающий момент от поперечной деформации пружин 11,75 кН·м/град, который в крутых кривых достигает 47 кН·м (поворот тележки до 4˚).

Палец упора-ограничителя 2 с пружиной 5 закреплены на боковине рамы в стакане 1 посередине тележки (рис. 2) и после регулируемого зазора 20 мм упирается в упорную плиту, закрепленную на обносном швеллере рамы кузова.

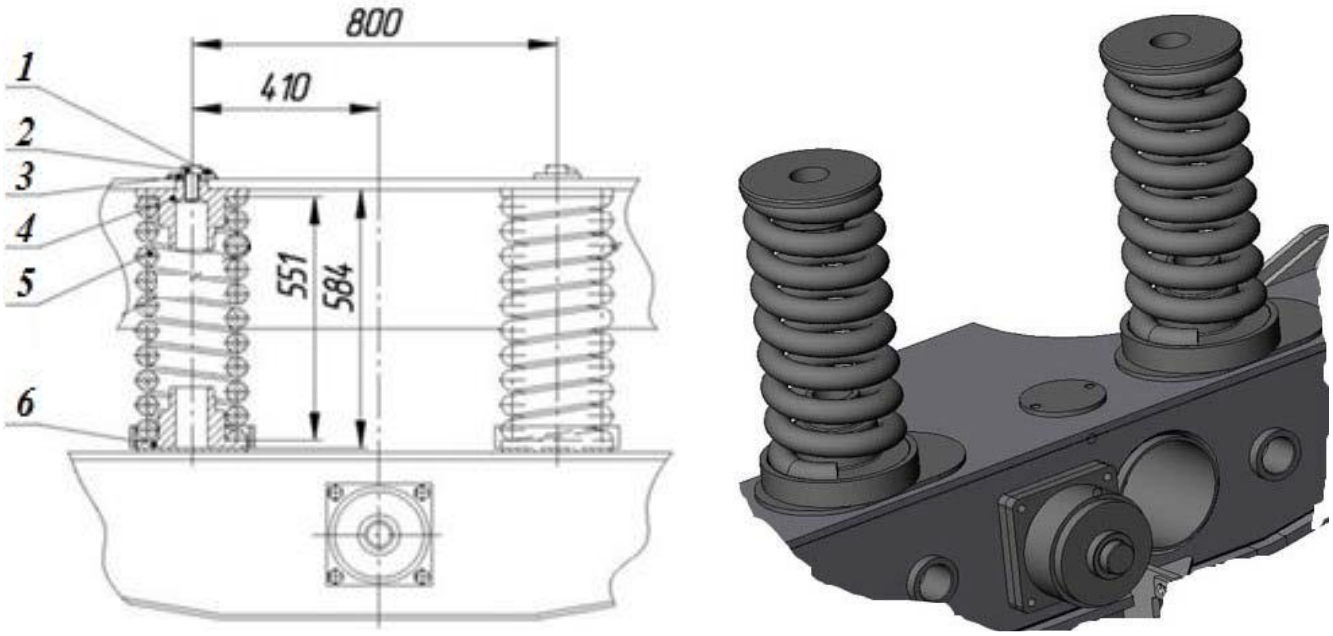


Рисунок 1 – Пружины «flexicoil» кузовного подвешивания электровоза 2ЭС6
1 – стопорная планка; 2 – стяжной болт; 3 – «бонка»; 4 – верхний стакан; 5 – пружина; 6 – направляющая чаша

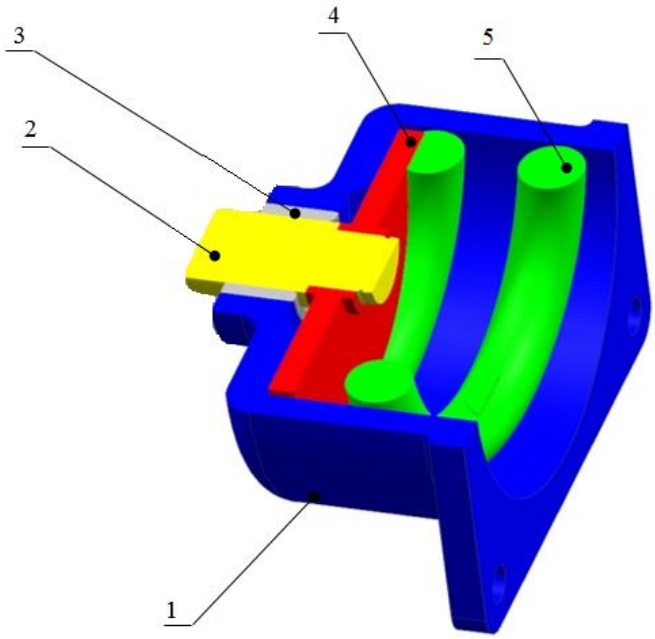
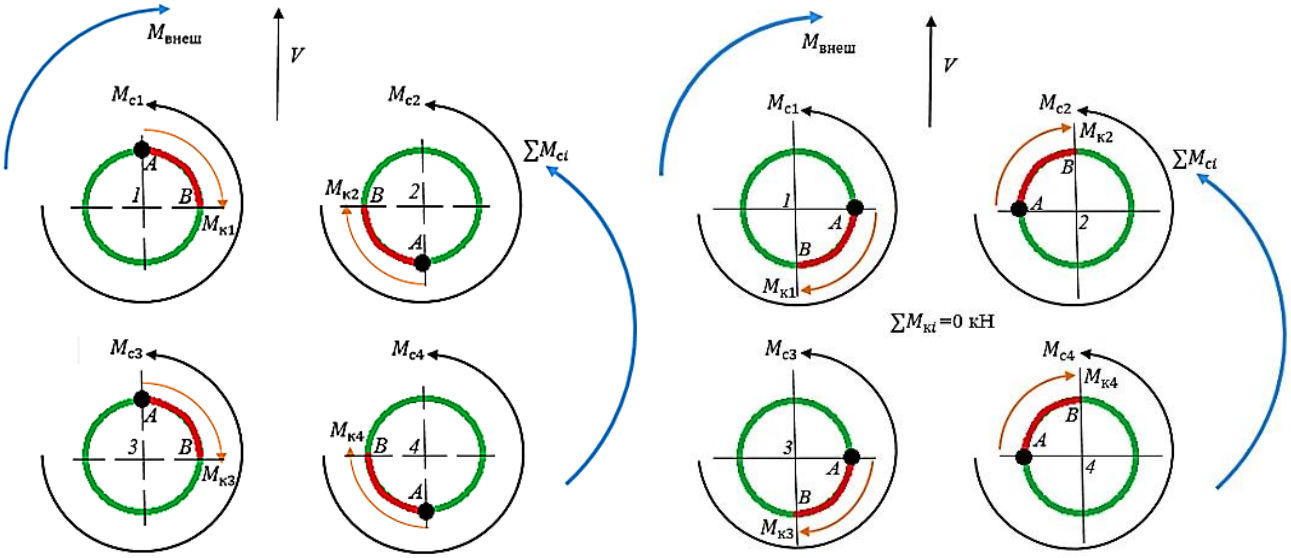


Рисунок 2 – Упор-ограничитель горизонтальных перемещений тележки
1 – стакан; 2 – палец; 3 – втулка; 4 – основание; 5 – пружина

Упоры-ограничители горизонтальных перемещений тележки, горизонтальные гидравлические гасители колебаний выполняют функцию стабилизации горизонтальных колебаний виляния и относа тележки.

В конструкторской документации электровоза 2ЭС6 регламентировано положение кузовных пружин с ориентированными наружу тележки концевыми витками. Возможны два варианта такой установки кузовных пружин (рис. 3).



а б

Рисунок 3 – Варианты установки кузовных пружин с ориентированными наружу тележки концевыми витками

Вариант на рисунке 3б отличается от варианта на рисунке 3а поворотом кузовных пружин на 90° по часовой стрелке относительно вертикальной оси.

Длина опорной поверхности концевого витка (дуга ВА – линия зеленого цвета) равна 3/4 длины рабочего витка [8] (точка В – окончание рабочего витка; точка А – окончание концевого витка).

Момент кручения $M_{кi}$ в дуге АВ возникает от воздействия вертикальной силы и направлен по часовой стрелке (правая навивка пружины) [9].

При вписывании тележки в кривую на гребень бандажа колесной пары воздействует боковая сила, создающая момент поворота $M_{внеш}$. За счёт поперечного перемещения концевых витков в пружинном комплекте на тележку действует суммарный возвращающий момент $\sum M_{ci} =$ 1,75 кН·м/град [7], направленный противоположно моменту поворота $M_{внеш}$.

Для исключения воздействия внутренних моментов кручения пружин $M_{кi}$, положение точки А подобрано таким образом, чтобы векторы $\vec{M}_{кi}$ в дуге АВ были направлены противоположно друг другу относительно боковин рам тележки, а их величины оставались одинаковыми независимо от направления кривой вписывания. Этого можно достичь только в одном случае, когда положение концевых витков соответствует схеме, приведенной на рисунке 3б. В любом другом положении концевых витков пружин это условие не выполняется, что способствует перекосу тележки в кривой и увеличению напряжений в пятне контакта гребня колеса с рельсом.

При вписывании электровоза в кривую на пружинный комплект кузовных пружин «flexicoil» в поперечном направлении действуют усилие от поворота Qφ и усилие от бокового сноса Qсв тележки.

Результирующей этих двух сил является сила Qm которая стремится повернуть тележку на угол φ (рис. 4).

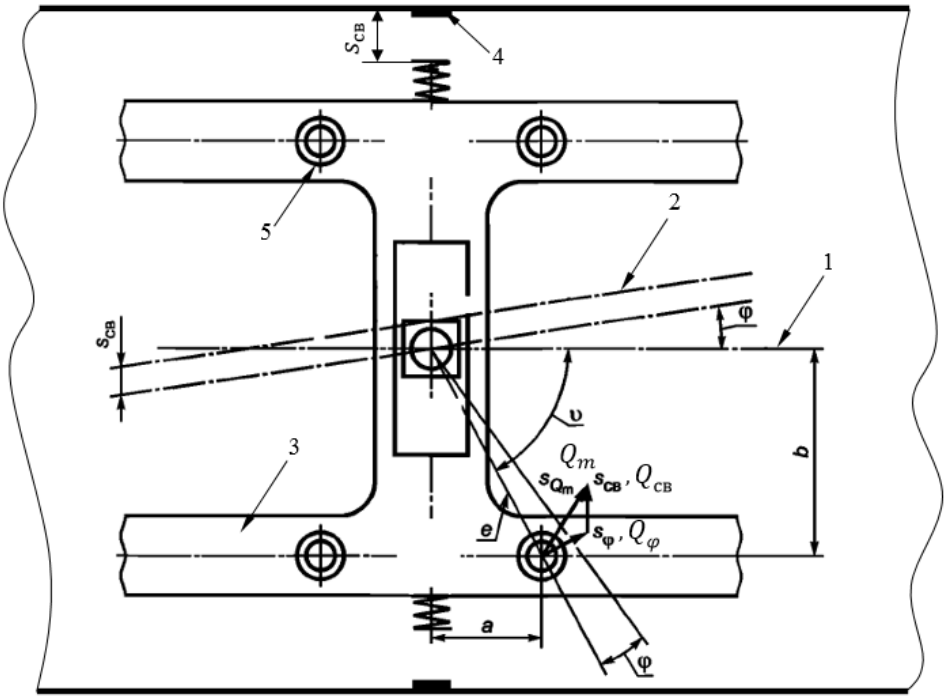


Рисунок 4 – Схема поперечных деформаций кузовных пружин при движении локомотива в кривой: 1 – продольная ось кузова, 2 – ось тележки при повороте и относе, 3 – рама тележки, 4 – упорная плита кузова, 5 – кузовная пружина

Для поиска оптимального положения концевых витков пружинного комплекта, при котором возвращающий момент тележки был бы симметричным, а влияние действия моментов кручения возникающих в рабочих витках пружин при воздействии вертикальной силы на параметры поперечной упругой связи тележки с кузовом минимальным, исследованы четыре расчётных случая: для двух направлений кривой рельсовой колей (радиуса 600 м) и двух вариантов положения концевых витков кузовных пружин «flexicoil» (рис. 3а и 3б).

Расчёты показали, что при установке концевых витков кузовных пружин согласно схеме на рисунке 3б угол поворота тележки в кривых разного направления будет практически одинаков и составлять $2{,}451^{\circ}$ при радиусе кривой 600 м, а на прямом участке пути тележка будет повернута влево на угол – $0{,}137^{\circ}$.

При положении концевых витков по схеме, приведенной на рисунке 3а, угол поворота тележки в кривой радиусом 600 м при правом направлении будет составлять $3{,}011^{\circ}$, а при левом направлении – $1{,}440^{\circ}$. На прямом участке пути тележка будет повернута вправо на угол $0{,}814^{\circ}$.

Результаты программного моделирования подтвердили отсутствие влияния ориентации концевых витков на статический прогиб пружин, а одинаковая навивка (правая) всех 4-х пружин пружинного комплекта при их оптимальной установке (по схеме на рис. 3б) не оказывает существенного влияния на сопротивляемость вписыванию тележки в кривые разного направления. В этом случае угловое перемещения концевых витков будет минимальным, а возвращающий момент от поперечной деформации пружин симметричен и одинаков по величине не зависимо от направления кривой.

Нами была выполнена оценка влияния сопротивления повороту тележки со стороны кузова на динамические качества локомотива (рамная и боковая сила)

посредством расчета боковой сила Fб, действующей на колесную пару в кривой и являющейся основополагающим фактором износа гребня бандажа [10].

Для варианта б (рис. 3) суммарный момент комплекта кузовных пружин $\sum M_{\text{к}i}$ равен нолю. Такое положение концевых витков пружин кузовного рессорного подвешивания снижает сопротивление повороту тележки при вписывании локомотива в кривую, что способствует уменьшению на 6 % (при сравнении с другим вариантом положения концевых витков) рамной силы и боковой силы Fб, которая, согласно расчету, будет равна 63 кН. При установке пружин по схеме на рис. 3а Fб = 67 кН.

Таким образом, установка пружин кузовного рессорного подвешивания с положением концевых витков по схеме на рис. 3б является оптимальным вариантом с точки зрения повышения динамических качеств электровоза 2ЭС6, что позволяет увеличить ресурс бандажа на 29 % (с 380 тыс. км до 490 тыс. км пробега до смены бандажа) и снизить интенсивность его изнашивания с 0,495 мм/10 тыс. км до 0,359 мм/10 тыс. км (на 38 %). Внесение соответствующих изменений по установке кузовных пружин (оптимальное положение концевых витков) в технологические процессы ремонта позволит повышать эксплуатационную надежность и снижать стоимость жизненного цикла электровоза 2ЭС6.

Совершенствование конструктивных решений элементов экипажной части локомотива. Конструкция локомотива оказывает существенное влияние на показатели надежности, предусмотренные при формировании технических требований и технического задания при разработке новых видов тягового подвижного состава, включая его приспособленность к техническому обслуживанию и ремонту. Свойство объекта, заключающееся в его приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособности путем технического обслуживания и ремонта, называется ремонтопригодностью (ГОСТ-Р 27.102-2021), которая является одним из инструментов управления жизненным циклом локомотива.

На ремонтопригодность большое влияние оказывают конструктивные факторы. Необходимо обеспечить простоту разборки и монтажа механизмов и агрегатов, в первую очередь обслуживаемых при ТО всех видов и текущих ремонтах, с широким применением агрегатирования и блочного исполнения отдельных узлов, не требующих высокой квалификации обслуживающего персонала при их замене [6].

Экспериментальным путем доказано, что амплитуда поперечных перемещений тележки при движении электровоза 2ЭС6 по прямым участкам пути достигает 20,5 мм, а в кривых радиусом 650 м – 27,4 мм [11]. Нормативный зазор между упором-ограничителем и упорной плитой рамы кузова составляет 20 мм, что обеспечивает ограничение горизонтальных перемещений тележки в прямом участке пути, не препятствует повороту тележки в пологих кривых, формирует регламентированную характеристику упругой поперечной связи в кузовном рессорном подвешивании при вписывании локомотива в кривые малого радиуса (менее 350 м) [7].

В соответствии с нормами допусков и износов деталей механической части локомотива [12] зазор между пальцем упора-ограничителя и упорной плитой рамы кузова

при пробеге локомотива 600 тыс. км должен составлять 19 – 21 мм (допустимая интенсивность изнашивания – 1мм на 600 тыс. км пробега) (рис. 5).

Рисунок 5 – Новый упор-ограничитель после ремонта в объеме ТР-600

Для экспериментального определения интенсивности изнашивания пальца упора-ограничителя горизонтальных перемещений тележки, влияния качества сборки механической части на его эксплуатационный ресурс выполнены замеры зазора между пальцем и упорной плитой рамы кузова на контрольной группе локомотивов серии 2ЭС6, эксплуатируемых на полигонах Западно-Сибирской, Свердловской и Южно-Уральской железных дорог.

Анализ результатов показал, что при сборке механической части допускаются отклонения зазора от нормативного значения: минимальный зазор составлял 11 мм, максимальный – 27 мм.

Интенсивность изнашивания пальца упора-ограничителя

$$\sigma = \frac{\Delta L}{\Delta S} \cdot 10^4,$$

где:

ΔL – разница длины пальца упора между замерами нарастающим итогом от ТР-600, мм;

ΔS – линейный пробег локомотива между замерами нарастающим итогом от ТР-600, км.

Эксперимент показал, что в среднем износ пальца до браковочных параметров происходит при пробеге локомотива 79500 км. К пробегу 300 тыс. км износ достигает 3,8 мм. Максимальный износ 8 мм был зафиксирован при пробеге 258007 км, что составляет 1 мм за 32250 км (интенсивность изнашивания 0,31 мм/10 тыс. км). В тех случаях, когда при начальных условиях (ТР-600) зазор был менее 20 мм, интенсивность изнашивания пальца упора увеличивалась.

Таким образом работоспособность упора-ограничителя в реальных условиях эксплуатации локомотива серии 2ЭС6 не отвечает требованиям технических условий. Технологическим процессом ремонта замена упора-ограничителя с выкаткой тележки выполняется на текущем ремонте в объеме ТР-600. Для повышения работоспособности узла предложена усовершенствованная конструкция упора-ограничителя, представленная на рисунке 6 [13].

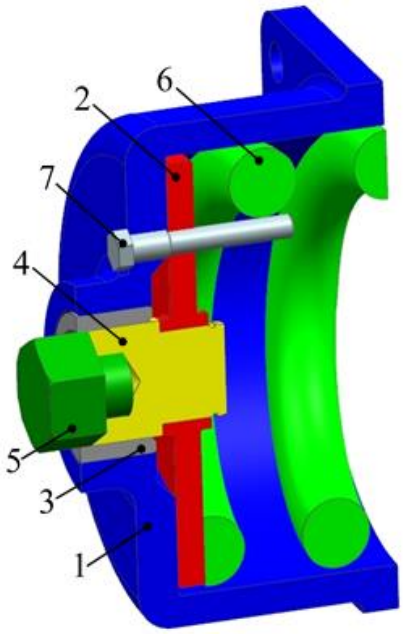


Рисунок 6 – Упор-ограничитель горизонтальных перемещений тележки измененной конструкции: 1 – стакан; 2 – основание; 3 – втулка; 4 – палец; 5 – съемный наконечник; 6 – пружина упора; 7 – фиксирующий винт

Фиксирующий винт используется для исключения проворота пальца при замене изношенного съемного наконечника пальца, установленного на резьбовом соединении. Возможна установка регулировочных шайб под наконечник пальца.

Усовершенствованная конструкция, которая позволяет регулировать зазор или заменять изношенную часть (съемный наконечник) пальца при проведении очередного текущего ремонта (ТР-30, ТР-300) при достижении пробега локомотивом 60 тыс. км без выкатки тележки из-под электровоза, обеспечивает поддержание нормативного зазора между пальцем и упорной плитой рамы кузова на протяжении всего жизненного цикла.

Применение предложенных научно обоснованных решений в конструкции и технологических процессах ремонта электровозов 2ЭС6 позволяет повышать его эксплуатационную надежность за счет снижения интенсивности изнашивания и увеличения ресурса бандажей колесных пар.

В период жизненного цикла локомотивов новых серий основными направлениями поддержки (управления) ЖЦ являются совершенствование и оптимизация технологических процессов эксплуатации и ремонта, конструктивных решений основных деталей, узлов и сборочных единиц, определяющих их эксплуатационную надежность, на основе выполнения комплексных научно-технических исследований и разработки новых научно обоснованных технических и технологических решений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жизненный цикл технических систем [Текст] : учеб.-метод. пособие / О. В. Грицкевич, А. В. Шабурова. – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. – 113 с. ISBN 978-5-907052-83-3.

2. ГОСТ Р 52944–2008. Цикл жизненный железнодорожного подвижного состава. Термины и определения.// Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 6 августа 2008 г. № 152-ст.

3. Яблочников Е. И., Фомина Ю. Н., Саломатина А. А. Компьютерные технологии в жизненном цикле изделия. Санкт-Петербург, СПбГУ ИТМО, 2010, 180 с.

4. Кузин Е. И., Кузин В. Е. Управление жизненным циклом сложных технических систем: история развития, современное состояние и внедрение на машиностроительном предприятии. Инженерный журнал: наука и инновации, 2016, вып. 1. С. 12–35. URL: http://engjournal.ru/catalog/mesc/meng/1457.html.

5. Ссудов, Е. В. О концепции управления жизненным циклом изделий Е. В. Ссудов, С. С. Кондрашина Электронный журнал «Технологии PLM и ИЛП». – Выпуск 6. – 2015. – С. 3–11.– [Электронный ресурс].

6. Гапанович, В. А. Ремонтопригодность – один из инструментов управления жизненным циклом железнодорожного подвижного состава. В. А. Гапанович, Ю. И. Попов, А. К. Тотиев//Техника железных дорог. – № 1 (69). – 2025. – С. 70–75.

7. Электровоз грузовой постоянного тока 2ЭС6 «Синара» с коллекторными тяговыми электродвигателями : руководство по эксплуатации. В 9 частях. Часть 6. Механическое оборудование и системы вентиляции. – Верхняя Пышма: ОАО «УЗЖМ», 2008. – 97 с.

8. ГОСТ 34628–2019. Пружины и комплекты пружинные рессорного подвешивания железнодорожного подвижного состава. Методы расчёта на прочность при действии продольных и комбинированных нагрузок. – Москва : Стандартинформ, 2020. – 24 с.

9. Шантаренко, С. Г. Влияние расположения концевых витков пружин кузовного рессорного подвешивания локомотива на параметры упругой поперечной связи кузова с тележкой / С. Г. Шантаренко, С. В. Савинкин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2. – С. 29–39.

10. Евенко, В. В. Критериальные уравнения движения локомотивов в кривых участках пути / В. В. Евенко // Вестник ВНИИЖТа - 1976. - № 4. – С. 26 – 31.

11. Савоськин, А. Н. Вероятностные методы в задачах динамики, прочности и безотказности рельсовых экипажей : Стереотипное издание / А.Н. Савоськин, Г.П. Бурчак, Д.А. Бондаренко. – Москва : Альянс, 2022. – 612 с. – ISBN 978-5-00106-528-9.

12. Электровоз грузовой постоянного тока 2ЭС6 «Синара» с коллекторными тяговыми электродвигателями : руководство по эксплуатации. В 9 частях. Часть 9. Техническое обслуживание. Текущий ремонт. Приложение Т. / ООО «Уральские локомотивы». – Екатеринбург, 2016. – 437-439 с.

13. Савинкин, С. В. Повышение работоспособности упора-ограничителя горизонтальных перемещений тележки электровозов серии 2ЭС6 / С. В. Савинкин. // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2 (58). – С. 128–134.

Шантаренко Сергей Георгиевич: д.т.н., профессор кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» ОмГУПС

Савинкин Сергей Владимирович: к.т.н., машинист эксплуатационного локомотивного депо Омск.

Супчинский Олег Павлович: к.т.н., доцент кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» ОмГУПС.

УЧАСТНИКИ ПЛЕНАРНОГО ЗАСЕДАНИЯ НПК

ZHANCHENG GAO, BEIJING XINCHUANG CHUNSHU RECTIFIER, Китай

SI WEI, JIANGSUH.Y.TIMES ELECTRONIC, Китай.

АБОЛМАСОВ Алексей Александрович: к.т.н. руководитель центра разработки и сопровождения ПИИТ, Москва.

АБРАМОВ Вячеслав Викторович, директор филиала «Красноярский» ООО «ЛокоТех-Сервис», Красноярск.

АНДРИЕВСКИЙ Анатолий Геннадьевич, старший преподаватель КРИЖТ, Красноярск.

БАЛУНОВ Ярослав Григорьевич, генеральный директор Желдорконсалтинг, Москва.

БАТУРИН Роман Александрович, начальник отдела ДЦВ Красноярской ж.д.

БЕЛОХВАСТОВ Дмитрий Борисович, начальник отдела ДЦВ Красноярской ж.д.

БОКАРЕВ Виталий Викторович, генеральный директор КрЭВРЗ, Красноярск.

БООК Александр Фридрихович, заместитель генерального директора по техническому развитию ПАО «Электровыпрямитель», Саранск.

БЫЧЕК Владимир Владимирович, начальник отдела ДЦВ Красноярской ж.д., Хабаровск.

ВАСЕКИН Александр Иванович, к.т.н., НИИАС, Москва.

ВОЛЧЕК Татьяна Витальевна, к.т.н., доцент КРИЖТ, Красноярск.

ГАЙДЫШЕВ Владимир Александрович, начальник отдела ДЦВ Красноярской ж.д.

ГРАЧЕВ Владимир Васильевич, д.т.н., профессор ПГУПС, Санкт-Петербург.

ГРИГОРЕНКО Павел Владимирович, аспирант ИрГУПС, Иркутск.

ГРИГОРЬЕВ Александр Геннадьевич, начальник отдела ДЦВ Красноярской ж.д., Тайшет.

ДМИТРИЕВ Виталий Константинович, генеральный директор ТПО «РИЛ», Санкт-Петербург.

ЕПИШКИН Андрей Николаевич, директор по внешнеэкономической деятельности ТПО «РИЛ», Санкт-Петербург.

ИВАНОВ Вячеслав Александрович, заместитель главного инженера Красноярской ж.д.

ИВАХНЕНКО Дмитрий Леонидович, советник генерального директора ПКП "ИРИС", Ростов-на-Дону.

ИЛЬИН Евгений Сергеевич, к.т.н., заместитель директора по научной работе и информации КРИЖТ, Красноярск.

КОРОБАНОВ Александр Сергеевич, заместитель генерального директора по производству ДЦВ Красноярской ж.д.

КОСМОДАМИАНСКИЙ Андрей Сергеевич, д.т.н., заведующий кафедрой РУТ, Москва.

КУКИШЕВ Роман Валерьевич, главный инженер Красноярской ж.д.

КУЛИЧЕНКО Олег Викторович, НИИАС, Москва.

ЛАЗАРЧУК Павел Александрович, начальник управления технологического развития производства и цифровизации ЛокоТех, Москва.

ЛАКИН Игорь Капитонович, д.т.н., начальник ситуационно-аналитического центра мониторинга и реагирования Трансмашхолдинг (ТМХ), учёный секретарь НПК, Москва.

ЛУКИН Олег Николаевич, директор дирекции по маркетингу и логистике ПАО «Электровыпрямитель», Саранск.

МАЛЫШКО Алена Андреевна, начальник отдела ДЦВ Красноярской ж.д.

МЕЛЬНИЧЕНКО Олег Валерьевич, д.т.н., заведующий кафедрой ИрГУПС, Иркутск.

МИТРОФАНЕНКОВ Роман Анатольевич, генеральный директор ОЦВ, Москва.

МИШУРЕНКО Александр Сергеевич, директор департамента производства филиала «Красноярский» ЛокоТех-Сервис, Красноярск.

МОРОЗ Жанна Михайловна, к.ф.-м.н., заведующий кафедрой КРИЖТ, Красноярск.

МОСКВИЧЕВ Владимир Викторович, научный руководитель, кафедра техносферной экологичной безопасности, доцент, Красноярский филиал ФИЦ ИВТ СО РАН.

ОСТЯНКО Андрей Евгеньевич, коммерческий директор ТОКСТЭЛ, Красноярск.

ПАШКОВ Николай Владимирович, начальник МТО ДЦВ Красноярской ж.д.

ПРОКОПОВИЧ Евгений Владимирович, начальник СЛД «Боготол-Сибирский» ЛокоТех-Сервис.

ПУСТОВОЙ Илья Владимирович, к.т.н., заместитель директора ПИИТ, Москва.

РОМАНОВ Вячеслав Анатольевич, начальник отдела ДЦВ Красноярской ж.д.

САВЧЕНКО Евгений Евгеньевич, д.э.н., директор КРИЖТ, Красноярск.

САМАРИН Сергей Игоревич, начальник отдела ДЦВ Красноярской ж.д.

САМОЙЛОВА Анастасия Сергеевна, учебный мастер ИрГУПС, Иркутск.

СЕМЕНОВ Александр Павлович, д.т.н., генеральный директор НПЦ ПРОМТЕХ, Москва.

СЕМЕНОВА Татьяна Владимировна, заместитель генерального директора НПЦ ПРОМТЕХ, Москва.

СЕМЧЕНКО Виктор Васильевич, к.т.н., генеральный директор ДЦВ Красноярской ж.д.

СЕРЕНКО Николай Викторович, директор филиала «Западно-Сибирский» ЛокоТех-Сервис, Новосибирск.

СИДОРУК Александр Михайлович, консультант ДЦВ Красноярской ж.д., Боготол.

СТАЛЬНОЙ Иван Иванович, директор проектно-конструкторско-технологического бюро по нормированию – филиала ОАО «РЖД» (ПКТБ Н), Москва.

СТЕПАНОВ Виктор Федорович, генеральный директор ДЦВ Западно-Сибирской ж.д., Новосибирск.

СУМКИН Владимир Николаевич, начальник СЗЦ ДЦВ Красноярской ж.д.

ТОМИЛОВ Вячеслав Станиславович, к.т.н., доцент КРИЖТ, Красноярск.

ТУРСУНОВ Михаил Николаевич, начальник отдела ДЦВ Красноярской ж.д.

ТУРСУНОВ Сергей Николаевич, начальник отдела ДЦВ Красноярской ж.д.

ФРОЛОВ Илья Сергеевич, инженер-конструктор второй категории АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва», Железногорск Красноярского края.

ФРОЛОВ Сергей Геннадьевич, главный инженер ДЦВ Красноярской ж.д.

ФРОЛОВА Наталья Михайловна, начальник ПЭО ДЦВ Красноярской ж.д.

ХУДОРОЖКО Виктор Александрович, управляющий директор Инжинирингового центра – филиала АО «Желдорреммаш», г. Москва.

ЧАБАН Елена Анатольевна, к.т.н., доцент КРИЖТ, Красноярск.

ЧЕМАРИНА Нина Геннадьевна, специалист отдела кадров ДЦВ Красноярской ж.д.

ЧЕРНОВА Лариса Викторовн, начальник отдела кадров ДЦВ Красноярской ж.д.

ЧМИЛЁВ Иван Евгеньевич, начальник дирекции по ремонту ТПС Красноярской ж.д.

ЧУЛЕНКОВ Алексей Игоревич, Старший электромеханик ДЦВ Красноярской ж.д.

ШАНТАРЕНКО Сергей Георгиевич, д.т.н., профессор ОмГУПС, Омск.

ШМАРЛОВСКИЙ Евгений Владимирович, начальник отдела ДЦВ Красноярской ж.д.

ЩЕРБАКОВА Екатерина Ивановна, корреспондент.

Всего на пленарных заседаниях НПК участвовало более 80 человек, включая 8 докторов и 9 кандидатов наук. Было представлено 29 организаций из 15 городов. Дополнительно 14 человек приняли участие в пленарном заседании дистанционно в режиме online.

ПЛЕНАРНОЕ СОВЕЩАНИЕ 28 МАРТА 2025 ГОДА

09:00: Красноярск. Бизнес-центр «Европа». Регистрация участников НПК.

10:00: И. К. Лакин, д.т.н., учёный секретарь НПК. Статистика. Открытие заседания.

10:10: Р. В. Кукишев, главный инженер Красноярской ж.д. Приветствие.

10:20: Я. Г. Балунов. Генеральный директор Желдорконсалтинг. Приветствие.

10:30: Е. Е. Савченко, д.э.н., директор КРИЖТ. Приветствие.

10:40: В. В. Семченко к.т.н., генеральный директор ДЦВ Красноярской ж.д.

Перспективные формы сервисного ТОиР. Опыт ДЦВ Красноярской ж.д.

11:20: А. П. Семенов, д.т.н., генеральный директор НПЦ ПРОМТЕХ. Опыт компании по техническому оснащению предприятий, производящих ТОиР.

11:30: Zhancheng Gao, д.т.н., генеральный директор Beijing Xinchuang Chunshu Rectifier (КНР). Опыт создания силовых установок на базе тиристоров для подвижного состава железных дорог Китая и России. Перевод: Si Wei.

11:45: А. И. Васекин, к.т.н., НИИАС. Модель сбалансированного повышения пропускной и провозной способности участков железной дороги.

12:00: Перерыв.

13:00: А. Ф. Боок, заместитель генерального директора по техническому развитию ПАО «Электровыпрямитель», г. Саранск. Перспективная продукция компании.

13:15: И. В. Фролов, инженер-конструктор АО «Решетнёв». Перспективы применения спутниковой системы связи «Экспресс-РВ» в интересах РЖД.

13:30: И. К. Лакин: д.т.н., учёный секретарь. Итоги проведения стендовых докладов.

14:00: Работа круглого стола. Выступления членов экспертной научной комиссии:

В. В. Грачёв, д.т.н., профессор ПГУПС (Санкт-Петербург);

А. С. Космодамианский, д.т.н., заведующий кафедрой РУТ (Москва);

С. Г. Шантаренко, д.т.н., профессор ОмГУПС (Омск);

О. В. Мельниченко, д.т.н., заведующий кафедрой ИрГУПС (Иркутск).

15:00: Выступления аспирантов кафедры «ЭПС» ИрГУПС по теме их диссертаций: А. С. Самойлова, В. Н. Знаенок, П. В. Григоренко.

16:00: А. Г. Андириевский, старший преподаватель КРИЖТ. Доклад по диссертации.

16:20: В. В. Москвичев, Красноярский филиал ФИЦ ИВТ СО РАН. Безопасность и управление рисками.

16:40: В. В. Семченко, сопредседатель НПК. Подведение итогов работы НПК.

17:00: Поздравления участников НПК с 25-летием компании ДЦВ Красноярской ж.д.

Завершение пленарного заседания 28.04.2025.

РЕШЕНИЕ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

1. 2-я Всероссийская с международным участием научно-практическая конференция «Техническое обслуживание и ремонт подвижного состава» (НПК ТОиР) организована и проведена Дорожным центром внедрения Красноярской железной дороги (ДЦВ Красноярской ж.д.) и Красноярским институтом железнодорожного транспорта (КРИЖТ) – филиалом Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС) и посвящена 25-летию ДЦВ Красноярской ж.д. Участникам предлагались следующие направления работы: системы ТОиР и их экономическое обоснование, автоматизированные системы управления ТОиР (АСУ ТОиР), бортовые микропроцессорные системы управления (МСУ), силовые преобразователи, автоматизированные системы технического диагностирования (АСТД) и др. Сопредседатели НПК: директор КРИЖТ д.э.н. Е. Е. Саченко и генеральный директор ДЦВ Красноярской ж.д. к.т.н. В. В. Семченко. Учёный секретарь НПК: д.т.н. И. К. Лакин. НПК проводилась при содействии департамента технической политики ОАО «РЖД» (куратор: О. А. Терегулов), Красноярской железной дороги (куратор: главный инженер Р. В. Кукишев) и ОЦВ (куратор: Р. А. Митрофаненков). Для оценки научного уровня НПК создана экспертная комиссия в составе: д.т.н. В. В. Грачёв (ПГУПС, Санкт-Петербург), д.т.н. А. С. Космодамианский (РУТ, Москва), д.т.н. Н. Г. Шабалин (НИИАС), д.т.н. С. Г. Шантаренко (ОмГУПС, Омск), д.т.н. О. В. Мельниченко (ИрГУПС, Иркутск), к.т.н. И. В. Пустовой (ПИИТ, Москва), от КРИЖТ (Красноярск): к.т.н. Е. С. Ильин, к.ф.-м.н. Ж. М. Мороз, к.т.н. В. С. Томилов.

2. Первый этап НПК – электронные стендовые доклады, которые проводились дистанционно в течение марта 2025 года. На первой НПК в 2020-м году с большим успехом прошли очные стендовые доклады. В 2025-м году решено пойти дальше и в рамках Цифровой Трансформации ОАО «РЖД» провести электронные стендовые доклады, для чего создан рабочий сайт npk.dcv.ru и разработано соответствующее программное обеспечение. В течение месяца проведения стендовых докладов каждый зарегистрированный участник НПК в удобное для него время мог войти на сайт npk.dcv.ru, разместить статью, просмотреть другие статьи, задать авторам вопросы, ответить на вопросы по своей статье, высказать своё мнение, а также поставить одну из четырёх возможных оценок: «Очень понравилось», «Понравилось», «Не понравилось, но имеет место быть», «Категорически не понравилось».

3. На предложение принять участие в электронных стендовых докладах откликнулось 23 компании и организации, из них 9 вузов: ПГУПС (Санкт-Петербург), РУТ (Москва), БГУТ (Брянск), ОмГУПС (Омск), КРИЖТ (Красноярск), ИрГУПС (Иркутск), ЗабИЖТ (Чита), ДВГУПС (Хабаровск) и даже БелГУТ (Гомель, Беларусь). Приняли участие ведущие научные организации: ВНИИЖТ, НИИАС, ПКБ ЦТ, ПКТБ Н, ПИИТ, НИИТКД, ПРОМТЕХ и др. Были представлены ведущие компании в

области ТОиР: ОАО «РЖД», Трансмашхолдинг, ЛокоТех, ЛокоТех-Сервис, Желдорреммаш, Электровыпрямитель, две компании из КНР и др. Всего был представлен 41 доклад. Общее число участников – 106 человек, из них докторов технических и экономических наук – 25, кандидатов физико-математических и технических наук – 33. Темы электронных стендовых докладов: ТОиР, диагностика, моделирование, управление транспортом. Экспертная комиссия в составе профессоров ПГУПС, РУТ, ОмГУПС, ИрГУПС выполнила оценку докладов.

4. Практически по всем докладам были оставлены комментарии, заданы вопросы, на которые авторы дали ответы. По некоторым докладам даже состоялась дискуссия. Всего было оставлено более 80 комментариев 15-ю участниками НПК. Самые активные участники – д.т.н., профессор ПГУПС (Санкт-Петербург) В. В. Грачёв и д.т.н., заведующий кафедрой ИрГУПС (Иркутск) О. В. Мельниченко. Опыт показал недостаточность одного месяца – в дальнейшем предлагается срок проведения стендовых докладов сделать не менее 3-х месяцев. Также желательна б′ольшая активность при обсуждении. Требует доработки программное обеспечение сайта для более дружественного интерфейса, в т.ч. для удобства поиска информации.

5. Все доклады были оценены – выставлено от 3-х до 14 оценок. Всего за месяц было выставлено более 240 оценок. В среднем 5 докладов оценены как низкого уровня, 9 – удовлетворительного, 22 – хорошего, 5 – отличного. Таким образом, уровень докладов можно признать высоким. Все они опубликованы в настоящем сборнике трудов. Что касается интегральной оценки докладов, то предложенная формула возможно нуждается в доработке. Целесообразно выводить на экран статистику полученных оценок по каждой из четырёх категорий: .

6. В стендовых докладах приняло участие 29 докторов наук, 30 кандидатов наук. Самые активные участники по числу докладов: ИрГУПС (6), КРИЖТ (5), ПГУПС (3), РУТ (3), ДВГУПС (3), ОмГУПС (3), ИЦ ЖТ (2). Активность участия в стендовых докладах может быть увеличена посредством заблаговременного распространения информации не только адресными письмами-приглашениями, но и рассылками информационных писем электронной почтой. Предложенную технологию проведения докладов на НПК по мнению экспертной комиссии и организаторов НПК следует признать успешной и перспективной. Более того, она продемонстрировала явное преимущество перед сложившейся практикой проведения конференций, на которых апробация научных работ часто носит формальный характер. В качестве недостатка новой формы проведения НПК следует отметить отсутствие у молодых учёных практики публичных выступлений.

7. Второй этап проведения НПК – очные пленарные заседания, которые прошли 27 – 29 марта 2025 г. В первый день пленарного заседания участники посетили

учебный полигон КРИЖТ, Красноярский офис и производственный участок ДЦВ. Была продемонстрирована в действии модель ТОиР электронного оборудования электровозов. Проведена экскурсия по достопримечательностям Красноярска. Второй день был полностью посвящён выступлениям и подведению итогов стендовых докладов. На третий день конференции участники посетили легендарную Красноярскую ГЭС. Очную трёхдневную часть НПК ТОиР также следует считать удачно проведённой.

8. Во время работы НПК констатированы следующие проблемы и перспективы развития ТОиР отечественного подвижного состава:
   8.1. Технические и технологические процессы ТОиР нуждаются в совершенствовании, научной поддержке и модернизации. Следует повышать надёжность подвижного состава, в т.ч. за счёт совершенствования ТОиР, применения автоматизированных систем технического диагностирования (АСТД), использования результатов математического моделирования в виде методов. Сервисные предприятия, осуществляющие ТОиР локомотивов, нуждаются в существенном обновлении станочного парка, стендового оборудования.
   8.2. ТОиР следует развивать как современное производство со специализацией по видам оборудования, созданием центров компетенции, во взаимодействии с производителями продукции, созданием центров компетенции, во взаимодействии с производителями продукции. Сервисное депо должно объединять в себе совокупность сервисных подразделений.
   8.3. Необходима автоматизация процессов управления ТОиР и технического диагностирования (АСУ) по принципам киберфизических производственных систем (Cyber Physical Production Systems) с использованием математических методов управления, принципов ISO, с реализацией принципа постоянного улучшения (цикла PDCA).
   8.4. АСУ ТОиР нуждается в инкапсулированных математических и логических методах управления, планирования, диагностирования технического состояния и оценки остаточного ресурса.
   8.5. Следует усиливать в ТОиР роль бортовых АСТД.
   8.6. Производителям техники, сервисным компаниям, ОАО «РЖД» следует активней привлекать к разработке методов и средств ТОиР, инкапсулированных математических методов учёных вузов.
   8.7. Следует комплексно пересмотреть программу обучения в вузах в части усиления обучения современным технологиям ТОиР, методам управления надёжностью и обеспечения качества технологических процессов.

9. По итогам проведения электронных стендовых докладов и очного пленарного заседания следует:
   9.1. Признать саму НПК ТОиР успешно состоявшейся как имеющую полноценное научное и профессиональное представительство, многосторонние доклады, обсуждение основных проблем отрасли.
   9.2. Одобрить все представленные стендовые доклады и опубликовать их в виде статей в сборнике трудов конференции (с ISBN), разместить их в дальнейшем на сайте eLibrary.ru.
   9.3. Признать перспективным форму проведения НПК в виде электронных стендовых докладов с размещением на сайте статей с возможностью ознакомиться с представленным материалом и выставлением оценок. Рекомендовать ДЦВ Красноярской ж.д. доработать сайт в части совершенствования интерфейса. Рекомендовать транспортным вузам применить предложенную в ДЦВ форму проведения НПК.
   9.4. Признать перспективным практику привлечения к работе НПК ведущих учёных в качестве научных экспертов электронных стендовых докладов. Объявить благодарность экспертам, принявшим активное участие в оценке стендовых докладов.
   9.5. Рекомендовать ДЦВ Красноярской ж.д. оставить в течение года доступ к материалам конференции на сайте npk.dcv.ru.

10. Признать перспективным представленную со стороны ДЦВ Красноярской ж.д. модель сервисного обслуживания электронного оборудования локомотивов как состоящую из полигонных опорных центров с высокотехнологичным оборудованием и высококвалифицированными кадрами для обслуживания, диагностирования, испытания, восстановления работоспособности и комплектования ремонтных комплектов для опорных пунктов на базе ПТОЛ для осуществления крупно-агрегатного ТОиР. Подтверждением является выполненное по итогам эксплуатации вероятностно-статистическое технико-экономическое обоснование эффективности модели. Следует рекомендовать модель к тиражированию как для микропроцессорного и силового электронного оборудования, так и для других видов сложного оборудования локомотивов.

11. Признать целесообразным в перспективе проводить НПК по техническому обслуживанию и ремонту (ТОиР) подвижного состава железных дорог на регулярной основе.

12. Всем участникам НПК продолжить свою научно-практическую деятельность.

ОГЛАВЛЕНИЕ

В. В. Семченко 25 ЛЕТ РАЗВИТИЯ ДЦВ КРАСНОЯРСКОЙ Ж.Д, 5

ФОТООТЧЁТ КОНФЕРЕНЦИИ 21

ЭЛЕКТРОННЫЕ СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ (СТАТЬИ УЧАСТНИКОВ КОНФЕРЕНЦИИ) 37

Gao Zhancheng ADVANTAGES OF HIGH-POWER THYRISTORS IN LOCOMOTIVE RECTIFIER CABINETS REPLACING SERIES/PARALLEL SMALL-POWER THYRISTORS WITH FULLY CRIMPED HIGH-POWER THYRISTORS 38

在机车整流柜用全压接大功率晶闸管替代小功 率晶闸管串并联的优势 46

ПРЕИМУЩЕСТВА ЗАМЕНЫ МАЛОМОЩНЫХ ТИРИСТОРОВ, СОЕДИНЁННЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО И ПАРАЛЛЕЛЬНО, НА ПОЛНОСТЬЮ ОБЖАТЫЕ ВЫСОКОМОЩНОСТНЫЕ ТИРИСТОРЫ В ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ ШКАФАХ ЛОКОМОТИВОВ 52

Д. А. Бирюкова ЛАЗЕРНАЯ МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕТАЛЛОВ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ АГРЕГАТОВ И УЗЛОВ ТЕПЛОВОЗОВ 62

А. Ф. Боок, А. А. Курганов, Т. М. Сергунина, А. А. Хапугин, Д. Ю. Немаев, Р. Ш. Биктиев, А. В. Гришанин ВЫПРЯМИТЕЛЬНО-ИНВЕРТОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЭЛЕКТРОВОЗОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА НОВОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЕ 69

А. Т. Бормотов, М. А. Тогаев, Д. В. Пышков, В. Г. Мускатиньев, А. В. Гришанин IGBT МОДУЛИ ДЛЯ КОМПЛЕКТАЦИИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА С АСИНХРОННЫМИ ТЯГОВЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ 75

А. В. Бородкин АКТУАЛЬНОСТЬ РАЗРАБОТКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО И ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ЛОКОМОТИВНЫХ ПРИЕМНЫХ КАТУШЕК АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛОКОМОТИВНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ 80

А. В. Бублик, В. В. Бублик, Н. В. Есин, О. В. Гателюк, Д. И. Попов СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ АСИНХРОННЫХ МАШИН 88

А. А. Будаев, Е. А. Третьяков, А. В. Раздобаров МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ И РАЗЛИЧНЫХ СОСТОЯНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОВОЗОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ОТКАЗОВ В ПУТИ СЛЕДОВАНИЯ 96

С. М. Васильев, А. В. Нагибина СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АКТИВНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ НА РЕФРИЖЕРАТОРНОМ ПОДВИЖНОМ СОСТАВЕ 105

Т. В. Волчек, В. С. Томилов ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ И ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ БДИТЕЛЬНОСТИ МАШИНИСТОВ ЛОКОМОТИВОВ 110

Т. В. Волчек, В. С. Томилов АНАЛИЗ СПОСОБОВ КОНТРОЛЯ КОММУТАЦИИ КОЛЛЕКТОРНЫХ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВОЗОВ 115

В. В. Грачев, А. В. Грищенко, Ф. Ю. Базилевский, Ю. Ю. Шумилов, Ю. С. Федоров КОНТРОЛЬ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТОПЛИВОПОДАЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ТОПЛИВОПОДАЧЕЙ ТЕПЛОВОЗНОГО ДИЗЕЛЯ ПО ДАВЛЕНИЮ В КОЛЛЕКТОРЕ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ 119

В. В. Грачев, А. В. Грищенко, Ф. Ю. Базилевский, Ю. Ю. Шумилов ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ХОЛОДНОЙ ПРОКРУТКИ МНОГОЦИЛИНДРОВОГО ТЕПЛОВОЗНОГО ДИЗЕЛЯ НА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ 127

П. В. Григоренко, О. В. Мельниченко, А. С. Самойлова ПОВЫШЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОВОЗА СЕРИИ «ЕРМАК» В РЕЖИМЕ ТЯГИ 140

В. Н. Знаенок, О. В. Мельниченко, А. Ю. Портной, А. О. Линьков РАЗРАБОТКА СПОСОБА ПОДВОДА ТОКА К ПЛЕЧАМ ВИП ЭЛЕКТРОВОЗА НА БАЗЕ IGBT-ТРАНЗИСТОРОВ С КОЛЛЕКТОРНЫМИ ТЭД 145

К. С. Капитонов АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ЗАПРАВКИ БУКС МОТОРНО-ОСЕВЫХ ПОДШИПНИКОВ ЭЛЕКТРОВОЗОВ И ИХ НЕДОСТАТКОВ 152

К. С. Капитонов О ФОРМИРОВАНИИ ЕДИНОГО ПОЛЯ КОМПЕТЕНЦИЙ В СФЕРЕ АКТУАЛЬНЫХ ИННОВАЦИЙ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ 157

С. А. Кахаев, О. В. Мельниченко, А. Ю. Портной, А. О. Линьков ИННОВАЦИОННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВОЙ ЦЕПИ ЭЛЕКТРОВОЗА В ЭКСПЛУАТАЦИИ 164

А. Ю. Коньков, И. Д. Конькова, К. К. Демаков ОСОБЕННОСТИ СИГНАЛА СКОРОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ВНУТРИЦИЛИНДРОВОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОЗНОГО ДИЗЕЛЯ 172

А. С. Космодамианский, О. В. Измеров, А. Е. Карпов ТЕХНИЧЕСКАЯ ИННОВАЦИОНИКА И ДИАГНОСТИКА УЗЛОВ И СИСТЕМ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА 183

А. С. Космодамианский, В. И. Воробьев, О. В. Измеров, А. Е. Карпов ТЕХНИЧЕСКАЯ ИННОВАЦИОНИКА И ПОВЫШЕНИЕ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ ТЯГОВОГО ПРИВОДА 189

И. И. Лакин КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ ОБСЛУЖИВАНИЕМ И РЕМОНТОМ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА 198

И. И. Лакин ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОиР РЕСУРСАМИ КАК ЗАДАЧА ТЕОРИИ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ 208

И. К. Лакин АНАЛИЗ ТИПОВЫХ ОШИБОК ПРИ ВНЕДРЕНИИ АСУ ТОиР ТЯГОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА 218

И. О. Лобыцин, С. О. Литвинцев, Е. Ю. Дульский, Т. В. Волчек, В. С. Томилов ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕМЕНТА КРЕПЛЕНИЯ ЩЕТОЧНОГО АППАРАТА ТЭД С ПРИМЕНЕНИЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ КОНВЕЙЕРНЫХ ЛИНИЙ 226

О. А. Малышева, Синьюй Ян, В. А. Ковалев, Л. В. Бузмакова ДИАГНОСТИКА НЕИСПРАВНОСТЕЙ СИЛОВОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ 230

О. В. Мельниченко, А. В. Коновалов, А. О. Линьков, А. Ю. Портной АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ IGBT-МОДУЛЕЙ ТЕХНОЛОГИИ PRESS-PACK ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА 237

К. В. Менакер ПРИБОР ДЛЯ ПРОЗВОНКИ ЖИЛ СИГНАЛЬНЫХ КАБЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВОЗОВ НА ОСНОВЕ ОДНОПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ КОНТРОЛЬНОГО СИГНАЛА 243

А. К. Пляскин, А. А. Потапов К ВОПРОСУ ОБ ОЦЕНКЕ СОВОКУПНОГО (ИНТЕГРАЛЬНОГО) СОСТОЯНИЯ ЛОКОМОТИВА 247

В. А. Поморцев, В. С. Томилов, Т. В. Волчек ФОРМИРОВАНИЕ БАЗИСА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УДАЛЕННОЙ ДИАГНОСТИКИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВОЗОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА 256

И. В. Пустовой, А. А. Аболмасов, И. К. Лакин АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ СЕРВИСНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ 260

Н. С. Русаков ОСОБЕННОСТИ СРЕДНЕГО И КАПИТАЛЬНОГО РЕМОНТА АСИНХРОННЫХ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ 271

А. С. Самойлова, О. В. Мельниченко, П. В. Григоренко УЛУЧШЕНИЕ РЕГУЛИРОВОЧНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫПРЯМИТЕЛЬНО-ИНВЕРТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОВОЗА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В РЕЖИМЕ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ 275

А. П. Семенов, В. А. Смирнов ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛОКОМОТИВОРЕМОНТНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВ И ВНЕДРЕНИЯ ГИБКИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ 280

В. В. Семченко ПЕРСПЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ТОиР ДЦВ КРАСНОЯРСКОЙ Ж.Д. 288

А. В. Ставцев СОВРЕМЕННЫЕ СИЛОВЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА 303

А. С. Туманин, Н. Г. Шабалин, А. И. Васекин, Ж. М. Мороз МОДЕЛЬ СБАЛАНСИРОВАННОГО ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ И ПРОВОЗНОЙ СПОСОБНОСТИ УЧАСТКОВ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ 316

И. С. Фролов ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ «ЭКСПРЕСС-РВ» В ИНТЕРЕСАХ РОССИЙСКИХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОМПАНИЙ 326

Е. А. Чабан, А. Г. Андриевский ОЦЕНКА ДЕЙСТВИЯ ВИБРАЦИОННОЙ НАГРУЗКИ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КОЖУХА ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОВОЗА 334

Е. А. Чабан, А. Г. Андриевский ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА КОЖУХА ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОВОЗА 340

С. Г. Шантаренко, С. В. Савинкин, О. П. Супчинский УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ЛОКОМОТИВОВ НОВЫХ СЕРИЙ 346

УЧАСТНИКИ ПЛЕНАРНОГО ЗАСЕДАНИЯ НПК 356

ПЛЕНАРНОЕ СОВЕЩАНИЕ 28 МАРТА 2025 ГОДА 359

РЕШЕНИЕ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ 360

ОГЛАВЛЕНИЕ 364

Научное издание

Техническое обслуживание и ремонт подвижного состава

Труды второй всероссийской с международным участием
научно-практической конференции (НПК ТОиР)
(март 2025 года, г. Красноярск)

ISBN 978-5-905401-11-4

Издательство АО «ДЦВ Красноярской ж.д.»
660099, г. Красноярск, ул. Обороны, д. 21а
http://dcv.ru office@dcv.ru

Подписано в печать 25.04.2025. Формат А5
Бумага офсетная 70 гр./м^2. Печать цифровая.
Печ.л. 23. Тираж 500 экз.

Отпечатано в типографии ИП И.Д.Дворядкиной
Россия, г. Красноярск, Академгородок, 50/28
ИНН 246401208424 +7-391-290-7232 darma@akadem.ru