

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНЧЕСКОГО ТРУДА
КАК ФАКТОР УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ
ТРАНСПОРТНОГО БИЗНЕСА**

**ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ
ОСАДОК ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА
АВТОМОБИЛЬНЫХ И ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

**ГЛАДКОСТЬ КОНТУРОВ ТЕЛ КАЧЕНИЯ
ПОДШИПНИКОВ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ РОЛИКАМИ
И РЕСУРС ИХ ЦИКЛИЧЕСКОЙ РАБОТЫ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИЗГИБНЫХ КОЛЕБАНИЙ
ЦЕЛЬНОСВАРНЫХ КУЗОВОВ ВАГОНОВ МЕТРОПОЛИТЕНА**

ТЕХНОЛОГИЯ МАКРОМОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛИГОНОВ

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ
БЕССТЫКОВЫХ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ ТОНАЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ**



Подписка на 2020 год.

Периодичность — 4 номера в год.

ф. СП-1



АБОНЕМЕНТ

на ~~газету~~
журнал

46463

(индекс издания)

Транспорт Урала

(наименование издания)

Количество комплектов:

на 2020 год по месяцам:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
X	X	X	X	X	X						

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)

ДОСТАВОЧНАЯ КАРТОЧКА

на ~~газету~~
журнал

46463

(индекс издания)

Транспорт Урала

(наименование издания)

Стоимость	подписки	руб. ___ коп.	Количество комплектов:
	переадресовки	руб. ___ коп.	

на 2020 год по месяцам:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
X	X	X	X	X	X						

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

1. Александр Галкин, д-р техн. наук, профессор, главный редактор журнала «Транспорт Урала», Екатеринбург, Россия
2. Александер Сладковски, д-р техн. наук, профессор, Силезский технический университет, Польша
3. Эдуард Горкунов, д-р техн. наук, профессор, академик РАН, Екатеринбург, Россия
4. Аксель Шмидер, д-р, «Сименс АГ», отраслевой сектор, департамент транспорта «Железнодорожное строительство», Эрланген, Германия
5. Эрки Хамалайнен, д-р экон. наук, университет Аалто, Школа экономики, Финляндия

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

1. Александров Александр Эрнстович, д-р техн. наук, доцент, научный редактор, Екатеринбург
2. Булаев Владимир Григорьевич, д-р техн. наук, доцент, Екатеринбург
3. Галиев Ильхам Исламович, д-р техн. наук, профессор, Омск
4. Козлов Петр Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, Москва
5. Комаров Константин Леонидович, д-р техн. наук, профессор, Новосибирск
6. Лапшин Василий Федорович, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
7. Ларин Олег Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Москва
8. Ледяев Александр Петрович, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербург
9. Румянцев Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, с.н.с., Екатеринбург
10. Сай Василий Михайлович, д-р техн. наук, профессор, зам. главного редактора, Екатеринбург
11. Смольянинов Александр Васильевич, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
12. Туранов Халибулла Туранович, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
13. Хоменко Андрей Павлович, д-р техн. наук, профессор, Иркутск
14. Шароглазов Борис Александрович, д-р техн. наук, профессор, Челябинск

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

1. Alexander Galkin, DSc, professor, editor-in-chief of the journal «Transport of the Urals», Ekaterinburg, Russia
2. Alexander Sladkowski, professor, Silesian University of Technology, Poland
3. Eduard Gorkunov, DSc, professor, academician of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia
4. Axel Schmieder, DSc, Siemens AG, Industry Sector, Mobility Division, Transportation Engineering, Erlangen, Germany
5. Erkki Hamalainen, DSc, Aalto University School of Economics, Finland

EDITORIAL BOARD

1. Alexandrov Alexander Ernstovich, DSc, associate professor, science editor, Ekaterinburg
2. Bulaev Vladimir Grigorievich, DSc, associate professor, Ekaterinburg
3. Galiev Ilkham Islamovich, DSc, professor, Omsk
4. Kozlov Petr Alexeyevich, DSc, professor, Moscow
5. Komarov Konstantin Leonidovich, DSc, professor, Novosibirsk
6. Lapshin Vasily Fedorovich, DSc, professor, Ekaterinburg
7. Larin Oleg Nikolayevich, DSc, professor, Moscow
8. Ledyaev Alexander Petrovich, DSc, professor, Saint-Petersburg
9. Rumyantsev Sergey Alexeyevich, DSc, senior staff scientist, Ekaterinburg
10. Say Vasily Mikhaylovich, DSc, professor, deputy editor-in-chief, Ekaterinburg
11. Smolyaninov Alexander Vasiliyevich, DSc, professor, Ekaterinburg
12. Turanov Khabibulla Turanovich, DSc, professor, Ekaterinburg
13. Khomenko Andrey Pavlovich, DSc, professor, Irkutsk
14. Sharoglazov Boris Alexandrovich, DSc in Engineering, professor, Chelyabinsk

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТРАНСПОРТА

С. В. Рачек, Я. В. Хоменко.
Оценка эффективности управленческого труда как фактор устойчивого развития транспортного бизнеса 3

Н. А. Устьян. **Инклинометрические измерения осадок земляного полотна автомобильных и железных дорог 9**

Б. А. Аржанников, Н. А. Афанасьева, И. А. Баева.
Экономическая эффективность организации движения одиночных и соединенных грузовых поездов 14

GENERAL TRANSPORT PROBLEMS

S. V. Rachek, Ya. V. Khomenko.
Assessment of managerial work efficiency as factor of transportation business sustainable development 3

N. A. Ustyayn. **Directional survey of depression in subgrade surface of roads and railways 9**

B. A. Arzhannikov, N. A. Afanasyeva, I. A. Baeva.
Economic efficiency of single and united freight trains operation 14

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ И ТЯГА

Л. Б. Цвик, А. А. Тармаев, И. С. Бочаров.
Гладкость контуров тел качения подшипников с цилиндрическими роликами и ресурс их циклической работы 20

А. П. Буйносов, А. Р. Динисламов.
Расчет теплового процесса поверхностного упрочнения стали деталей механической части железнодорожного подвижного состава при регламентированном нагреве равномерно распределенными источниками 28

А. А. Миронов, Д. Н. Салтыков, А. Э. Павлюков, П. И. Шалупина.
Диагностическая модель теплового контроля колес подвижного состава 36

ROLLING STOCK AND TRACTION

L. B. Tsvik, A. A. Tarmaev, I. S. Bocharov.
Smoothness of rolling elements contours of bearings with cylindrical rollers and their life time 20

A. P. Buynosov, A. R. Dinislamov.
Heat process calculation of steel surface hardening of rolling stock mechanical part components in case of regulated heating by evenly distributed sources 28

A. A. Mironov, D. N. Saltykov, A. E. Pavlyukov, P. I. Shalupina.
Diagnostic model for thermal control of rolling stock wheels 36

ВАГОНЫ И ВАГОННОЕ ХОЗЯЙСТВО

А. Н. Скачков, С. Л. Самошкин, С. Д. Коршунов.
Исследование параметров изгибных колебаний цельносварных кузовов вагонов метрополитена 41

RAILWAY CARS AND CARRIAGE EQUIPMENT

A. N. Skachkov, S. L. Samoshkin, S. D. Korshunov.
Research of flexural vibration parameters of all-welded bodies of subway cars 41

ГРУЗОВЫЕ И ПАССАЖИРСКИЕ ПЕРЕВОЗКИ

В. С. Колокольников, И. Г. Слободянюк.
Технология макро моделирования полигонов 48

CARGO AND PASSENGER TRANSPORTATION

V. S. Kolokolnikov, I. G. Slobodyanyuk.
Technology of polygons macromodelling 48

АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ

А. Н. Ковкин. **Практическая реализация логической обработки управляющих сигналов в дублированной безопасной системе с использованием преобразовательных схем 52**

В. А. Сисин, М. И. Шестаков.
Сравнительный анализ современных бесстыковых рельсовых цепей тональной частоты 59

Ю. В. Могильников. **Оценка эффективности рельсовых цепей и средств дефектоскопии при выявлении изломов и дефектов рельсов 64**

AUTOMATION, TELEMCHANICS AND COMMUNICATION

A. N. Kovkin. **Practical implementation of the logical processing of control signals in a duplicated safety system with the use of converter circuits 52**

V. A. Sisin, M. I. Shestakov.
Comparative analysis of modern jointless audio frequency track circuits 59

Yu. V. Mogilnikov. **Assessment of track circuits and defectoscopy tools efficiency in detection of rail failures and flaws 64**

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

В. Г. Булаев. **Перспективные системы очистки отработавших газов тепловозных дизелей 68**

TECHNOSPHERIC SAFETY

V. G. Bulaev. **Perspective exhaust fumes control systems of locomotive-type diesel engines 68**

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

А. Л. Каштанов, М. М. Никифоров, Д. А. Горбунова, М. Г. Медовик.
Применение токоограничивающего устройства на основе высокотемпературной сверхпроводимости для тяговых подстанций постоянного тока 74

И. П. Неугодников, Д. А. Ефимов.
Контроль нагрева проводов контактной подвески 80

А. Н. Смердин, А. С. Голубков, Е. А. Бутенко.
Исследование возможности применения устройств волоконной оптики для контроля параметров контактной сети 85

ELECTRIC SUPPLY

A. L. Kashtanov, M. M. Nikiforov, D. A. Gorbunova, M. G. Medovik.
Application of current limiting device based on high-temperature superconductivity for direct current traction substations 74

I. P. Neugodnikov, D. A. Efimov.
Thermal control of catenary suspension wires 80

A. N. Smerdin, A. S. Golubkov, E. A. Butenko.
Research of possibility of fiber optics devices application for monitoring catenary parameters 85

УДК 331.101.5

Светлана Витальевна Рачек, доктор экономических наук, профессор кафедры «Экономика транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,
Яна Владимировна Хоменко, аспирант кафедры «Экономика транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНЧЕСКОГО ТРУДА КАК ФАКТОР УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНОГО БИЗНЕСА

Svetlana Vitalyevna Rachek, DSc in Economics, Professor, Transport Economics Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,
Yana Vladimirovna Khomenko, postgraduate student, Transport Economics Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Assessment of managerial work efficiency as factor of transportation business sustainable development

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы повышения эффективности труда на основе оценки процесса управления трудовой деятельностью. Проведен комплексный анализ эффективности управленческого труда на примере технологического взаимодействия бизнес-единиц транспортной компании (ОАО «РЖД»). Рассмотрена модель технологического взаимодействия руководителей бизнес-единиц транспортной компании в конкретном регионе. Приведен пример формирования процесса построения взаимосвязи стратегических и операционных показателей. Разработан многоступенчатый порядок проведения оценки эффективности управленческого труда на основе анализа выполнения стратегических и операционных показателей, составления X-матрицы, анализа системы рисков и порядка проведения мониторинга.

Ключевые слова: управленческий труд, эффективность оценки, система операционных показателей, стратегические цели, транспортная компания, бизнес-единица, технологическое взаимодействие.

Summary

The paper considers issues of increasing labour efficiency on the basis of assessment of labour activity management process. It also includes a complex analysis of managerial work efficiency on an example of technological interaction of business units (the JSC Russian Railways). In the paper the authors discuss a model of technological interaction of transportation company business unit's senior officials in a specific region. An example of forming the process of creating interrelations between strategic and operational indicators is provided in the paper. As a result, a multi-stage procedure for assessing the managerial work efficiency based on analysis of strategic and operational indicators execution, a preparation of an X-matrix, analysis of a risk system and a procedure for monitoring.

Keywords: managerial work, assessment efficiency, system of operating results, strategic objectives, transportation company, business unit, technological interaction.

DOI: 10.20291/1815-9400-2019-3-3-8

В последнее время возрастающий интерес к оценке эффективности управленческого труда как неотделимого элемента менеджмента организации вызван необходимостью развития нового подхода в управлении трудовой деятельностью в условиях интеграционного изменения уровня территориально-функционального взаимодействия экономических структур и внедрения передовых информационных технологий и технических решений.

Ключевую роль в формировании содержания и содержательности управленческого труда сыграли теоретические исследования в области менеджмента, предложенные российскими и западными учеными. Основное место в этих работах отводилось изучению вопросов повышения эффективности труда путем оценки процесса управления трудовой деятельностью. В результате были сделаны определенные шаги в формировании специализации управленческого труда, изучены субъект и объект труда, рассмотрены функции и критерии оценки труда.

Научной основой исследования вопросов становления и развития управленческого труда стали работы Б. М. Генкина «Экономика и социология труда» [1], А. В. Давыдова «Инновационные методы и модели управления трудовой деятельностью персонала» [2], А. Я. Кибанова «Управление персоналом организации» [3], Ю. Г. Одегова и Л. В. Карташовой «Управление персоналом: оценка эффективности» [4], Н. М. Кузьминой «Эволюция концепции стратегического управления человеческими ресурсами и трудовая деятельность» [5], С. В. Рачек «Методологические основы эффективного использования трудового потенциала предприятия в современных условиях» [6], А. В. Шевчука «О будущем труда и будущем без труда» [7].

Однако, несмотря на большое количество теоретических и практических предложений в области исследования содержания эффективности управленческого труда, актуальным остается вопрос, связанный с определением роли руководителя в современной системе управления, учитывающей организационно-технологические изменения. В условиях развития инновационной экономики этот вопрос весьма заметно выявляется в научной среде из-за недостаточно

полной проработки современных подходов к изучению теории управления и приводит к необходимости формирования собственного практического инструментария в форме научного изучения процессов управления организацией как механизма повышения эффективности управленческого труда.

Актуальность и недостаточная изученность методов и концепций в области повышения эффективности управленческого труда определили выбор проблемы исследования.

Для рассмотрения обозначенных проблем и формирования соответствующего инструментария авторами выполнен комплексный анализ эффективности управленческого труда на примере технологического взаимодействия бизнес-единиц транспортной компании (ОАО «РЖД»).

В настоящее время формирование и внедрение эффективной модели управленческого труда при технологическом взаимодействии бизнес-единиц¹ является основной задачей производственно-экономической системы компании ОАО «РЖД».

Для ее решения целесообразно провести исследование процесса построения технологического взаимодействия бизнес-единиц транспортной компании в конкретном регионе путем применения методики оценки, состоящей из шести шагов.

На первом шаге необходимо оценить влияние стратегических показателей, которые являются определяющими для руководителей двух и более бизнес-единиц транспортной компании, взаимодействующих в рамках функционирования бизнес-блока², на уровень операционных показателей (рис. 1).

Решение этой задачи возможно путем определения доли влияния управленческого труда руководителей бизнес-единиц на итоговый стратегический показатель через формирование группы соответствующих операционных показателей, измеримых для выполнения оценки.

В качестве возможных вариантов целесообразно рассмотреть систему операционных показателей, состоящую из следующих примеров.

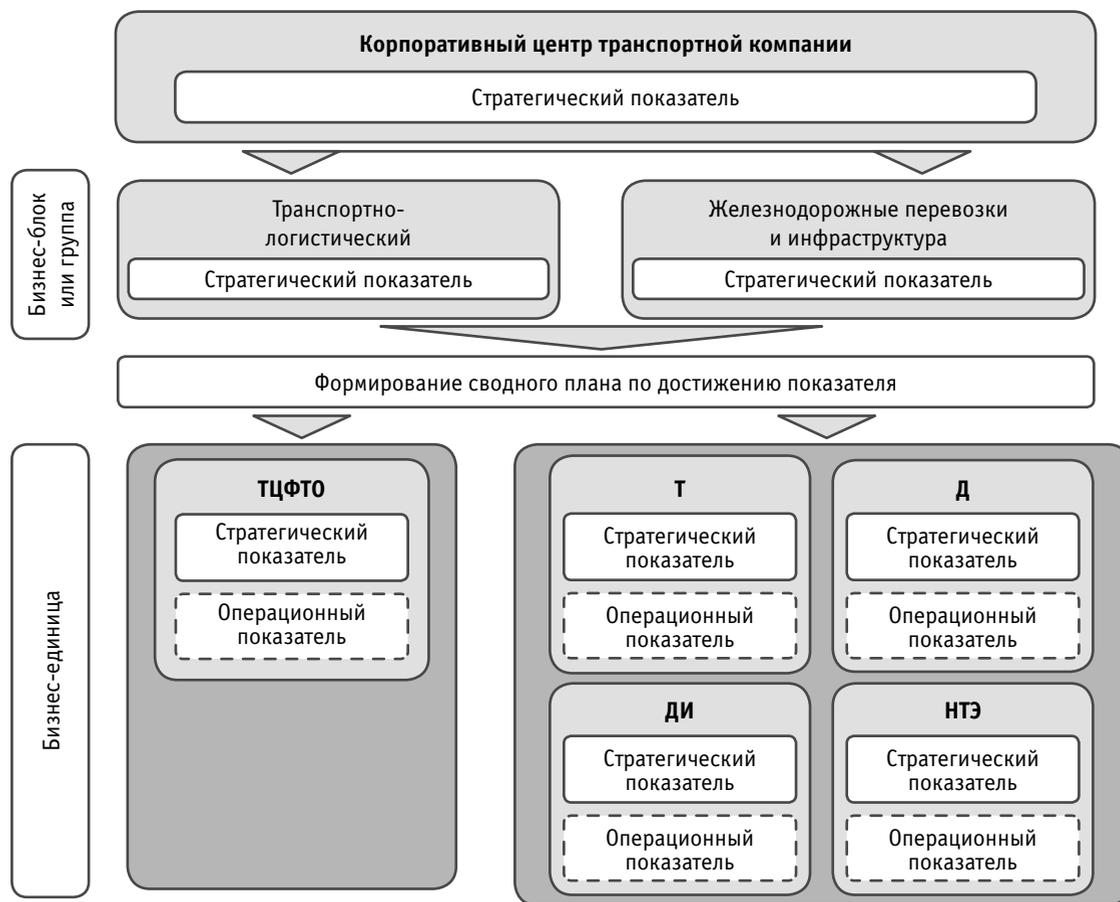


Рис. 1. Процесс построения взаимосвязи стратегических и операционных показателей

¹Бизнес-единицы — филиалы, структурные подразделения, ДЗО ОАО «РЖД» [8].

²Бизнес-блоки — структуры, включающие несколько бизнес-единиц и отвечающие за наиболее приоритетные бизнесы холдинга, такие как пассажирские перевозки, грузовые перевозки и инфраструктура [8].

I. Бизнес-блок «Транспортно-логистический» (см. рис. 1).
Ключевая бизнес-единица этого бизнес-блока — Территориальный центр фирменного транспортного обслуживания (ТЦФТО), руководитель которого должен быть ориентирован на выполнение операционного показателя «план перевозки грузов в разрезе существующей номенклатуры». Критерием оценки эффективности управленческого труда руководителя в рамках выполнения показателя будет служить своевременное формирование и доведение до работников плана перевозок по номенклатуре грузов.

II. Бизнес-блок «Железнодорожные перевозки и инфраструктура» (см. рис. 1).

К этому блоку относятся четыре бизнес-единицы, связанные единым технологическим процессом взаимодействия.

1. Дирекция управления движением (Д), руководитель которой обеспечивает выполнение операционного показателя «пропуск грузовых поездов по расписанию». Критерием оценки эффективности управленческого труда будет выполнение руководителем функций по своевременному обеспечению клиентов подвижным составом, качественной организации маневровой работы, бесперебойному пропуску и приему грузовых поездов.

2. Дирекция инфраструктуры (ДИ), руководитель которой в рамках своих обязанностей обеспечивает выполнение операционного показателя «состояние пути и устройств инфраструктуры». Критерием оценки управленческого труда руководителя служит выполнение работ по нормальному функционированию устройств системы централизации и блокировки, удовлетворительное содержание железнодорожного пути, исключение выхода из строя устройств инфраструктуры.

3. Дирекция тяги (Т), руководитель которой обеспечивает выполнение операционного показателя «содержание и предоставление тягового подвижного состава и локомотивных бригад». Критерием оценки эффективности управленческого труда будет выполнение руководителем функций по своевременному обеспечению клиентов тяговым подвижным составом с локомотивной бригадой, а также по обеспечению безопасности перевозочного процесса.

4. Дирекция по энергообеспечению (НТЭ), руководитель которой в рамках своих обязанностей обеспечивает выполнение операционного показателя «состояние работы устройств электроснабжения». Критерий оценки управленческого труда руководителя — выполнение работ, обеспечивающих нормальное функционирование устройств энергоснабжения, исключение выхода их из строя.

Вторым шагом будет применение одного из ключевых методологических подходов к оценке эффективности управленческого труда на основе построения X-матрицы [9], которая позволяет сбалансировать выполнение целевых показателей бизнес-единиц, связанных единым технологическим процессом (рис. 2).

X-матрица представляет собой структурированную модель, состоящую из таких четырех ключевых элементов, как:

- стратегические цели, которые определяют направления развития транспортной компании на длительный период (соответствующие программе развития ОАО «РЖД» до 2025 г. [10]);

- операционная деятельность, которая характеризуется формированием в рассматриваемом периоде ориентиров в виде тактических задач;
- ключевые показатели, связанные с проведением оценки эффективности управленческого труда руководителей бизнес-единиц;
- результат, выраженный в достижении целевого состояния путем оценки эффективности работы бизнес-процессов.

На третьем шаге определяются значения операционных показателей, которые являются целевыми для руководителя каждой бизнес-единицы и сбалансированными для эффективного функционирования бизнес-блока и транспортной компании в целом.

Оценка эффективности управленческого труда производится на основе выполнения руководителями операционных показателей в динамике с уровнем прошлого периода и целевым значением. При этом перечень операционных показателей, напрямую влияющих на стратегический показатель, определяется исходя из критериев оценки эффективности управленческого труда, закрепленных за каждым руководителем.

На четвертом шаге производится оценка соответствия значений показателей целевой метрике, включающей в себя диапазон возможных отклонений от установленного целевого значения.

Результативностью оценки управленческого труда руководителя служит обеспечение попадания значений достигнутых показателей в зеленую или желтую зоны, а неудовлетворительным — расхождение с данными, установленными диапазоном оценки.

Например, для Дирекции инфраструктуры одним из критериев оценки эффективности управленческого труда руководителя является выполнение работ, исключающих выход из строя устройств инфраструктуры, т.е. использование системы комплексной диагностики и внедрение новых материалов и конструкций [11]. Невыполнение этого показателя может привести к серьезным последствиям в виде отказов в работе технических средств, нарушению производственного процесса, формированию финансовых рисков, появлению непригодных потерь и др. [12].

На пятом шаге выполняется контроль достижения операционных показателей с помощью формирования графика оценки, отражающего уровень эффективности управленческого труда в зависимости от количества выполненных операционных показателей.

Функционирование значений операционного показателя происходит в зеленом, желтом и красном полях. При этом зеленое поле свидетельствует об эффективном применении управленческого труда и не предполагает участие руководителей в оценке детального исследования причин выполнения целевого значения. Особое внимание руководителей требуется при попадании показателей в красное поле, что свидетельствует о незамедлительном применении корректирующих мер путем внесения изменений в существующие текущие планы, а также в случае серьезных отклонений — в стратегические ориентиры, направленные на системное повышение эффективности управления бизнес-процессами компании.

Во избежание подобных случаев большинство предприятий используют риск-ориентированный подход — инструмент эффективного управления трудовой деятельностью для достижения запланированного результата, включающий в себя карту рисков.

При составлении карты рисков важно учесть все группы рискованных ситуаций, разбить их по направлениям работы, оценить масштаб возможных последствий, определить ответственных по каждому участку.

При использовании риск-ориентированного подхода в компании ОАО «РЖД» решаются следующие задачи [13]:

1) обеспечивается внедрение системы многоуровневого контроля в области производственно-финансовой деятельности бизнес-единиц;

2) формируются ключевые механизмы анализа, аудита, мониторинга и оценки выполнения показателей;

3) составляется и внедряется комплексная программа мер, направленных на снижение рискованных ситуаций, а также на обеспечение соблюдения экономических интересов компании;

4) создается эффективная система информационного обеспечения, позволяющая своевременно отслеживать отклонения в бизнес-процессах;

5) повышается уровень мотивации работников, внедряется система переподготовки управленческого персонала и др.

На заключительном шаге проводится комплексный анализ для принятия руководителями транспортной компании соответствующих управленческих решений, который включает в себя:

определение исследуемого операционного показателя;

оценку уровня достижения его целевому значению;

принятие мер по поощрению работников в случае его достижения или корректирующих мер в случае отклонения от цели;

при втором варианте развития событий — формирование информации для изучения причин отклонения показателей; принятие организационно-технических решений;

в случае достижения цели — архивацию данных, в случае отклонения от цели — создание рабочей группы для исключения подобных ситуаций в будущем;

оценку достижения цели.

Таким образом, разработка и внедрение пошагового алгоритма оценки эффективности управленческого труда на основе анализа результатов работы руководителей бизнес-единиц позволяет транспортной компании проводить своевременное, качественное и детальное исследование функционального взаимодействия подразделений в рамках одного и нескольких технологических бизнес-процессов.

При этом в условиях, когда управленческий труд приобретает новые механизмы организационного взаимодействия, очень важно обеспечить эффективность результатов труда. Для повышения уровня управленческого труда необходимо использовать современные подходы к исследованию и развитию моделей поведения руководителей, адаптированных к изменениям внешней и внутренней среды, реализовать эффективность взаимодействия управленческого труда и показателей эффективности, оценивающих деятельность компании. Основные пути повышения эффективности управленческого труда должны быть направлены на стратегическое развитие предприятия, изучение операционных целей и методов, необходимых для качественной организации работы по управлению существующими организационными изменениями, а также на системный контроль для решения целевых задач. Результатом этих управленческих действий станет достижение положительной динамики выполнения показателей, оценивающих эффективность управленческого труда.

Литература

1. Генкин Б. М. Экономика и социология труда : учебник для вузов / 2-е издание. Москва : Норма-Инфра, 1999. 384 с.
2. Инновационные методы и модели управления трудовой деятельностью персонала / А. В. Давыдов, А. П. Деметьев, В. С. Паршина, И. В. Дрожжина. Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2019. 144 с.
3. Кибанов А. Я. Управление персоналом организации : учебник. Москва : ИНФРА-М, 2002. 512 с.
4. Одегов Ю. Г., Карташова Л. В. Управление персоналом: оценка эффективности : учебное пособие для вузов. Москва : Экзамен, 2002. 256 с.
5. Кузьмина Н. М. Эволюция концепции стратегического управления человеческими ресурсами и трудовая деятельность // Нормирование и оплата труда в промышленности. 2015. № 7. С. 49–53. ISSN 2074–8728.
6. Рачек С. В. Методологические основы эффективного использования трудового потенциала предприятия в современных условиях : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора экономических наук. Москва, 2001. 54 с.
7. Шевчук А. В. О будущем труда и будущем без труда // Экономическая социология. 2005. Т. 6. № 3. С. 11–24. ISSN 1726–3247. URL: <http://ecsoc.msses.ru> (дата обращения: 13.04.2018).

References

1. Genkin B. M. Labour economics and sociology [Ekonomika i sotsiologiya truda] : textbook for universities / 2nd edition. Moscow : Norma-Infra, 1999. 384 p.
2. Innovative methods and models for managing labour activity of personnel [Innovatsionnye metody i modeli upravleniya trudovoy deyatelnost'yu personala] / A. V. Davydov, A. P. Demytyev, V. S. Parshina, I. V. Drozhzhina. Novosibirsk : Publishing House of STU, 2019. 144 p.
3. Kibanov A. Ya. Human resource management of organization [Upravlenie personalom organizatsii] : textbook. Moscow : INFRA-M, 2002. 512 p.
4. Odegov Yu. G., Kartashova L. V. Human resource management: efficiency assessment [Upravlenie personalom: otsenka effektivnosti] : manual for universities. Moscow : Exam, 2002. 256 p.
5. Kuzmina N. M. Evolution of the concept of human resources strategic management and labour activities [Evolutsiya kontseptsii strategicheskogo upravleniya chelovecheskimi resursami i trudovaya deyatelnost'] // Payment for labour and setting of work quotas in industry. 2015. No. 7. Pp. 49–53. ISSN 2074–8728.
6. Rachek S. V. Methodological bases of effective use of enterprise labour potential in modern conditions [Metodologicheskie osnovy effektivnogo ispol'zovaniya trudovogo potentsiala predpriyatiya v sovremennykh usloviyakh] : Synopsis of DSc in Economics Thesis. Moscow, 2001. 54 p.
7. Shevchuk A. V. Future of labor and future without labor [O budushhem truda i budushhem bez truda] // Journal of Economic Sociology. 2005. Vol. 6. No. 3. Pp. 11–24. ISSN 1726–3247. URL: <http://ecsoc.msses.ru> (access date: 13.04.2018).

8. Определение целевой бизнес-модели холдинга «РЖД». URL: <https://helpiks.org/7-86259.html> (дата обращения: 01.08.2019).
9. Джексон Т. Хосин канри — как заставить стратегию работать : перевод с английского / Институт комплексных стратегических исследований. Москва, 2008. 248 с.
10. Утверждена долгосрочная программа развития ОАО «Российские железные дороги» до 2025 года. URL: <http://government.ru/docs/> (дата обращения: 14.07.2019).
11. Инфраструктура. Инновационный дайджест. URL: <http://www.rzd-expo.ru/innovation/infrastructure/> (дата обращения: 27.07.2019).
12. Рачек С. В., Хоменко Я. В. Экономическая оценка упущенной выгоды ОАО «РЖД» от нарушений технологического взаимодействия бизнес-единиц на полигоне дороги // Управление экономическими системами. 2019. № 4 (122). ISSN 1999-4516. URL: <http://uecs.ru/ekonomicheskij-analiz/item/5467-2019-04-09-08-06-13> (дата обращения: 19.06.2019).
13. Иванов О. Б. Построение риск-ориентированной системы внутреннего контроля и аудита в крупной корпорации (на примере ОАО «Российские железные дороги») // Вестник Российского экономического университета имени Г. В. Плеханова. 2015. № 6 (84). С. 26-39. ISSN 2413-2829. URL: <https://doi.org/10.21686/2413-2829-2015-6-26-39> (дата обращения: 19.06.2019).
8. Determination of the Russian Railways Holding target business model [Opredelenie tsevoy biznes-modeli kholdinga «RZhD»]. URL: <https://helpiks.org/7-86259.html> (access date: 01.08.2019).
9. Jackson T. Hoshin kanri for the lean enterprise [Khosin kanri — kak zastavit' strategiyu rabotat'] : translated from English / Institute for Complex Strategic Studies. Moscow, 2008. 248 p.
10. Long-term development program of the JSC Russian Railways up to 2025 is approved [Uverzhdena dolgosrochnaya programma razvitiya OAO «Rossiyskie zheleznye dorogi» do 2025 goda]. URL: <http://government.ru/docs/> (access date: 14.07.2019).
11. Infrastructure. Innovative digest [Infrastruktura. Innovatsionnyy daydzhest]. URL: <http://www.rzd-expo.ru/innovation/infrastructure/> (access date: 27.07.2019).
12. Racheck S. V., Khomenko Ya. V. Economic assessment of lost profit of the JSC Russian Railways from violations of technological interaction of business units on railway polygon [Ekonomicheskaya otsenka upushhennoy vygoty OAO «RZhD» ot narusheniy tekhnologicheskogo vzaimodeystviya biznes-edinit na poligone dorogi] // Management of Economic Systems. 2019. No. 4 (122). ISSN 1999-4516. URL: <http://uecs.ru/ekonomicheskij-analiz/item/5467-2019-04-09-08-06-13> (access date: 19.06.2019).
13. Ivanov O. B. Designing risk-oriented system of internal control and audit in large corporation (illustrated by the JSC Russian Railways) [Postroenie risk-orientirovannoy sistemy vnutrennego kontrolya i audita v krupnoy korporatsii (na primere OAO «Rossiyskie zheleznye dorogi»)] // Vestnik of the Plekhanov Russian University of Economics. 2015. No. 6 (84). Pp. 26-39. ISSN 2413-2829. URL: <https://doi.org/10.21686/2413-2829-2015-6-26-39> (access date: 19.06.2019).

Объем статьи 0,72 авторских листа

УДК 625.731:625.122:550.8.08

Нагапет Амирханович Устьян, кандидат технических наук, заместитель главного инженера по особым проектам ООО «ГЕО-ПРОЕКТ», Санкт-Петербург, Россия

ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ОСАДОК ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА АВТОМОБИЛЬНЫХ И ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Nagapet Amirkhanovich Ustyan, PhD in Engineering, Deputy Chief Engineer for special projects, LLC «GEO-PROEKT», St. Petersburg, Russia

Directional survey of depression in subgrade surface of roads and railways

Аннотация

В статье освещаются вопросы измерения деформаций земляного полотна автомобильных и железных дорог (горизонтальных сдвигов и осадок) на слабых грунтовых основаниях геофизическим методом. Измерения выполняются с использованием портативных инклинометрических комплектов через инклинометрический канал, уложенный в основании насыпи. Дано описание нового метода, показаны его преимущества по сравнению с визуально-инструментальным и геодезическим методами в техническом (измерения проводятся проще, быстрее и с более высокой точностью), экономическом (дешевле в 3–5 раз) и технологическом (измерительная сеть не мешает производству работ при сооружении земляного полотна) аспектах. Однако, несмотря на неоспоримые преимущества, предлагаемый метод измерений (начиная с 2008 г.) не нашел отражения в нормативной документации по организации и проведению геомониторинга при строительстве и эксплуатации дорог и земляных сооружений. Вместе с тем использование принципов инклинометрии позволяет существенно расширить возможности получения информации о развитии деформаций основания и смещения откосов земляного полотна, повысить уровень достоверности результатов измерений и тем самым обеспечить безопасность и качество автомобильных и железных дорог.

Ключевые слова: инклинометрические измерительные системы, методы измерений, инклинометрический зонд, земляное полотно, слабое грунтовое основание, измерительный канал, автомобильные и железные дороги.

Summary

The paper considers issues of measuring subgrade deformations of roads and railways (horizontal displacements and depressions) on light ground bases by means of a geophysical method. The measurements are carried out with the use of portable directional assemblies through a directional channel set in the embankment bed. The paper also provides with a description of the new method and presents its advantages in comparison with visual-instrumental and geodesic methods in technical (measurements are carried out easier, faster and more precisely), economic (cost of measurements is 3–5 times lower) and technological (measuring net doesn't interfere with the production work in the construction of subgrade) aspects. However, the proposed method of measurement (since 2008) despite the undeniable advantages is not reflected in the standard documentation on organization and execution of geomonitoring in the construction and operation of roads and earth structures. Besides, the use of directional survey principles expands possibilities of obtaining information about development of support deformation and slopes displacement of the subgrade and increases measurement results reliability and thereby ensures safety and quality of roads and railways.

Keywords: directional survey systems, measuring methods, directional probe, subgrade, light ground base, measuring channel, roads and railways.

DOI: 10.20291/1815-9400-2019-3-9-13

Строительство автомобильных и железных дорог, других транспортных сооружений всегда связано с преодолением участков, имеющих сложные и слабые грунтовые основания. Возведение на них земляного полотна и обеспечение тех же эксплуатационных и прочностных характеристик, что и на участках с лучшими грунтовыми основаниями, является одной из актуальных задач.

Для решения этой задачи требуется применение различных материалов, более сложных инженерных технологий и методов возведения земляного полотна, чтобы сохранить его проектные, геометрические и прочностные параметры на весь срок эксплуатации. При строительстве дорог на участках в сложных условиях со слабыми грунтовыми основаниями необходимо контролировать такие показатели, как соответствие режима отсыпки насыпи расчетным срокам, динамика консолидации грунтов, величина осадки насыпи после отсыпки очередного слоя грунта. Все это очень важные показатели, пренебрежение которыми может привести к непоправимым последствиям, например к выпору основания насыпи при строительстве или даже при эксплуатации автомобильной дороги, обрушению откосов либо участка насыпи в целом.

Чтобы исключить подобные ситуации, проводят геотехнический мониторинг (наблюдение) участков дорог на слабых грунтовых основаниях в период строительства, а в ряде случаев и при эксплуатации [1, 2]. При этом необходимо наблюдать не только за осадками насыпи, но и за горизонтальными смещениями откосов. От своевременной и полной информации о состоянии слабого основания зависит ход строительства и предотвращение нештатных ситуаций, связанных с потерей прочности основания и устойчивости откосов насыпей.

В настоящее время для измерения деформаций земляного полотна насыпей наиболее часто используются визуально-инструментальные и геодезические методы. Измерения производятся с помощью нивелиров, теодолитов, тахеометров, сканеров (в том числе оптических, электронных, лазерных) и навигационных спутниковых систем. Для выполнения таких измерений требуется установка осадочных марок на основание насыпи

в начальный период ее отсыпки [3]. Это позволяет контролировать осадки земляного полотна на всем протяжении периода его возведения.

Как правило, для измерения одного поперечника в основании насыпи устанавливается по три марки с расстоянием между поперечниками через каждые 50 м (рис. 1).

Вместе с тем геотехнический мониторинг с использованием осадочных марок имеет ряд таких существенных недостатков:

- снижение темпов возведения земляного полотна вследствие затрудненных условий применения тяжелой техники на участках с марками;

- большая вероятность повреждения или уничтожения части установленных марок строительной техникой, необходимость их восстановления;

- ухудшение достоверности данных, полученных с восстановленных марок, так как при их восстановлении используется метод бурения, нарушающий целостность уплотненного грунта насыпи;

- получение данных только по трем контрольным точкам поперечного профиля земляного полотна (при обычной ширине основания насыпи от 20 до 40 м это дает очень приближенную оценку);
- невозможность проведения мониторинга насыпи после устройства дорожной одежды автомобильной дороги, в том числе при последующей эксплуатации.

В соответствии с перечисленными недостатками данные, полученные с использованием осадочных марок, могут быть неполными и приблизительными. Как следствие, оценка состояния земляного полотна и слабого основания насыпи может привести к неверным выводам, напрямую влияющим на безопасность строительства и эксплуатации дорог и сооружений.

Поэтому совершенствование методов измерений осадок земляного полотна, дающих более полную и достоверную информацию о состоянии слабых грунтов оснований, является актуальной проблемой.

Автором статьи предложен к внедрению новый геофизический метод, предназначенный для измерения осадок слабых грунтов оснований насыпей транспортных сооружений с применением принципов инклинометрии.

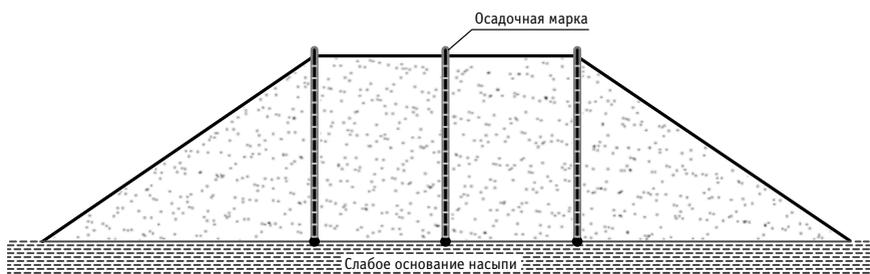


Рис. 1. Схема установки осадочных марок

Инклинометрия — это определение пространственного положения ствола скважины в грунтовом массиве с помощью инклинометров — приборов, выполняющих измерения искривлений, с последующим построением плана (инклинограммы) проекции оси скважины на горизонтальную плоскость. Инклинометрические измерения широко применяются в нефтегазовой отрасли для определения фактических координат и качества проводки буровых скважин.

Впервые предлагаемый метод был опробован в 2008 г. при строительстве кольцевой автодороги (КАД) вокруг Санкт-Петербурга [4]. В то время уже был известен метод инклинометрических измерений горизонтальных деформаций (смещений) откосов, однако измерение вертикальных деформаций (осадок) не производилось из-за отсутствия соответствующего инклинометра и методики измерений.

Границы применения инклинометрии в транспортном строительстве ограничиваются измерениями горизонтальных

и вертикальных смещений земляного полотна автомобильных и железных дорог, сдвигов прилегающих к дорогам склонов, а также дамб, обвалований, котлованов и других земляных сооружений.

На сегодняшний день отечественной промышленностью производятся горизонтальные инклинометры, выполненные в виде зонда с направляющими колесиками, которые можно использовать для измерения осадок насыпей автомобильных и железных дорог. Они входят в состав портативных инклинометрических измерительных комплектов с соответствующим программным обеспечением (рис. 2).

В то же время в нормативной документации до сих пор отсутствуют порядок проведения таких измерений и методика оценки их результатов для автомобильных и железных дорог. Например, действующие стандарты и своды правил [5–7] предусматривают инклинометрические измерения только горизонтальных смещений грунтового массива, а вертикальные измерения не рассматриваются.



Рис. 2. Портативный инклинометрический комплект УСМ-ИСП

В связи с важностью рассматриваемой проблемы в настоящее время в Росавтодоре ведется научно-исследовательская работа, направленная на совершенствование нормативной базы по организации и проведению геотехнического мониторинга земляного полотна автомобильных дорог. В частности, специалистами ООО «ГЕО-ПРОЕКТ» разрабатывается проект ОДМ «Организация и проведение геотехнического мониторинга при строительстве земляного полотна на слабых грунтах». Автор статьи является разработчиком проекта ОДМ «Методические рекомендации по измерению осадок оснований насыпей с применением принципов инклинометрии», первая редакция которого отправлена на рецензирование.

Предлагаемая методика позволяет измерять осадки насыпей по всей ширине основания земляного полотна в любой его точке с применением инклинометра и специально проложенного в основании насыпи инклинометрического измерительного канала (ИИК). Он монтируется из специальных инклинометрических труб с направляющими пазами, которые укладываются поперек оси дороги на ее основание до начала отсыпки насыпи по всей ширине через каждые 20–50 м (рис. 3).

Количество необходимых для измерений инклинометрических измерительных каналов определяется при составлении программы мониторинга в зависимости от характеристик грунтов основания и длины наблюдаемого участка. При монтаже



Рис. 3. Устройство инклинометрического измерительного канала на КАД Санкт-Петербурга в 2008 г.

ИИК в него вставляется протяжной шнур, предназначенный для протаскивания инклинометра внутри канала при измерениях. Концы труб закрываются заглушками.

После укладки ИИК засыпается для фиксации слоем грунта, и производится первичное измерение, которое является эталонным. С ним сравниваются все последующие измерения, и определяются величины осадок в каждой точке канала.

Суть измерения осадок методом инклинометрии состоит в том, что ИИК из пластиковых труб, уложенный поперек оси дороги при осадке насыпи, изгибается одновременно с массивом грунта.

Каждая точка его оси приобретает новое значение угла наклона α_i относительно вектора силы тяжести G (рис. 4).

При перемещении инклинометрического зонда внутри трубы с установленным шагом измеряется угол между вектором силы тяжести G и осью зонда в каждой точке измерения. Значения углов регистрируются считывающим устройством, обрабатываются программным комплексом портативного инклинометрического измерительного комплекта и выдаются в виде столбцов или готовых графиков на экран считывающего устройства.

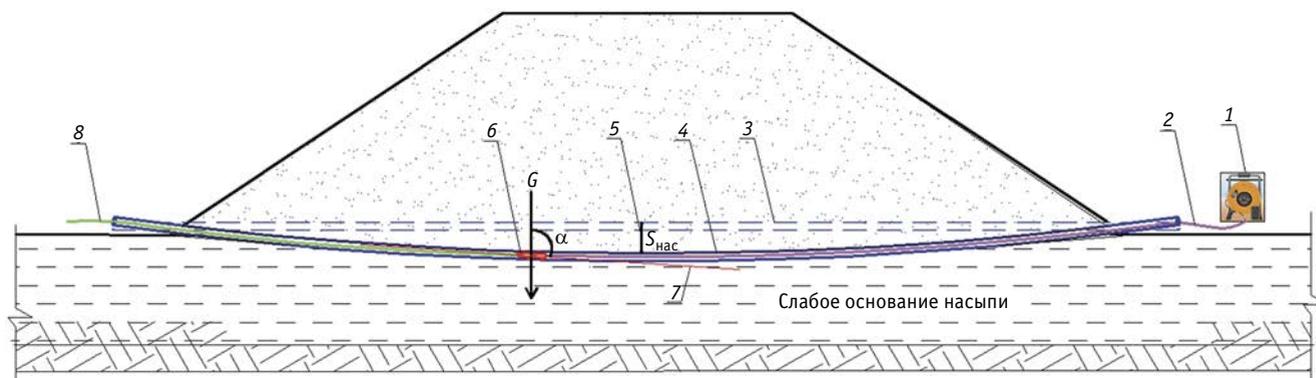


Рис. 4. Принципиальная схема измерения осадок портативным инклинометрическим измерительным комплектом:

- 1 — портативный инклинометрический измерительный комплект; 2 — кабель инклинометра;
3 — инклинометрический измерительный канал до осадки насыпи; 4 — инклинометрический измерительный канал после осадки насыпи;
5 — величина осадки насыпи $S_{нас}$; 6 — инклинометрический зонд; 7 — ось зонда; 8 — протяжной шнур

Величина осадки определяется путем сравнения полученных данных с эталонными, которые были измерены после укладки ИИК. Точность измерений составляет $\pm 0,05\%$ измерительного диапазона ($\pm 0,26$ мм/м для диапазона $\pm 30^\circ$), что соответствует требованиям ГОСТа 24846–2012 [5]. При практических измерениях осадок насыпи инклинометрическим измерительным каналом длиной 30 м ошибка составляет не более ± 3 мм.

Измерения рекомендуется производить силами двух специалистов — инженера-геофизика и техника. Для удобства передачи команд и указаний при производстве работ они пользуются портативными рациями.

Последовательность выполнения измерений следующая: по прибытии на место измерений снимаются заглушки с ИИК, проверяется его состояние и сохранность протяжного шнура; оборудование комплекта собирается в цепь, проверяется целостность соединений, производится тестирование инклинометра, после чего начинаются контрольные измерения.

Расстояние между точками контрольных измерений равны базовой длине инклинометрического зонда (50 см). В ходе измерений на каждой точке зонд выдерживается для фиксации своего положения (3–10 с), после чего с него снимаются показания. Инженер на экране считывающего устройства наблюдает за работой инклинометра и после фиксации данных измерений на очередной контрольной точке дает команду технику перетянуть зонд на следующую точку. Таким образом измеряются углы наклона по всей длине ИИК. По достижении последней точки инженер перетаскивает зонд к себе, отсоединяет его от кабеля, переворачивает и присоединяет к разъему с другой стороны зонда. После этого все измерения выполняются в обратную сторону для определения среднеквадратической ошибки. Данные измерений сохраняются в специальных электронных журналах наблюдений портативного комплекта и переводятся в формат Excel. Они могут обрабатываться прикладной программой считывающего устройства, либо их можно передать по Интернету на другой компьютер и обработать отдельно. Результаты выдаются в виде инклинограммы (рис. 5) или таблиц.

По окончании измерений оборудование убирают, протяжной шнур оставляют внутри трубы ИИК. Входное и выходное отверстия трубы ИИК закрывают заглушками, и специалисты переходят на следующий ИИК. Измерения одного канала (туда-обратно) в среднем занимают около 20–30 мин.

После обработки полученные данные сравниваются с эталонными. При этом определяются: величина осадки насыпи (достигнута или нет расчетная осадка), скорость прироста осадок за истекший срок и динамика консолидации грунтов в целом. На основании полученных данных могут быть

даны рекомендации о возможности отсыпки последующих слоев либо устройства дорожной одежды на наблюдаемом участке насыпи.

Предлагаемый метод позволяет измерять вертикальные деформации насыпи за короткий срок с большой точностью, что значительно сокращает затраты на проведение геотехнического мониторинга. К тому же он гораздо проще существующих в отношении и устройства измерительной системы, и проведения самого мониторинга.

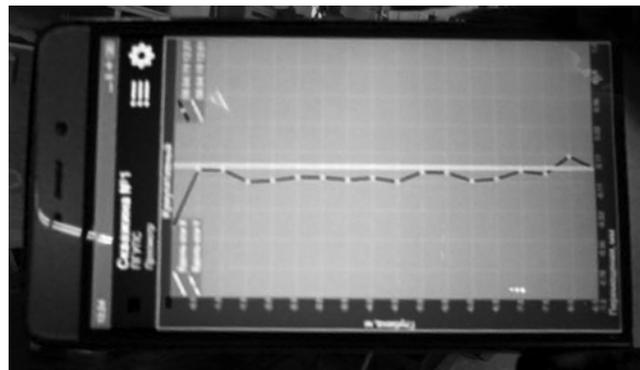


Рис. 5. Инклинограмма измерений на экране считывающего устройства

Благодаря этому намного легче прогнозировать состояние земляного полотна проблемных участков, так как метод позволяет получить подробные и наглядные графики в электронном виде по каждому участку за весь период наблюдений.

Устройство контрольно-измерительной базы на участках проведения геотехнического мониторинга по предлагаемому методу значительно проще и дешевле (в 3–5 раз), чем создание сети контрольных точек с применением осадочных марок. Кроме того, проведение измерений методом инклинометрии не снижает темпы производства работ по возведению насыпи, а точность измерений значительно повышается, так как ИИК находится в теле насыпи и практически не может быть поврежден строительной техникой. При необходимости измерения можно проводить в любое время — как при строительстве земляного полотна автомобильной дороги, так и после устройства дорожной одежды и даже при последующей эксплуатации участка.

В заключение следует отметить, что применение принципов инклинометрии существенно расширяет возможности получения информации о действительном состоянии развития осадок основания насыпей на любом этапе их жизненного цикла и по всей ширине оснований, что ведет к повышению уровня безопасности и качества дорог.

Литература

1. ГОСТ 33179–2014. Дороги автомобильные общего пользования. Изыскания мостов и путепроводов. Общие требования. Москва : Стандартинформ, 2017. 36 с.
2. ГОСТ 32868–2014. Дороги автомобильные общего пользования. Требования к проведению инженерно-геологических изысканий. Москва : Стандартинформ, 2015. 58 с.
3. Пособие по проектированию земляного полотна автомобильных дорог на слабых грунтах / Минтранс России. Москва, 2003. 218 с.
4. Отчет о проведении геотехнического мониторинга съезда № 2 на объекте «Автомобильная дорога Пискаревский проспект от ул. Руставели до КАД» по титулу «Строительство продолжения Пискаревского проспекта от ул. Руставели до КАД с устройством путепровода через ж.-д. пути ст. Ручьи транспортной развязки на КАД» / ООО «НТЦ «Геотехнологии СПб». Санкт-Петербург, 2008. 38 с.
5. ГОСТ 24846–2012. Грунты. Методы измерений деформаций оснований зданий и сооружений. Москва : Стандартинформ, 2014. 20 с.
6. СП 305.1325800.2017. Здания и сооружения. Правила проведения геотехнического мониторинга при строительстве / Минстрой России. Москва, 2017. 58 с.
7. СП 32–104–98. Проектирование земляного полотна железных дорог колеи 1520 мм / Госстрой России. Москва, 1999. 99 с.

References

1. GOST 33179–2014. Automobile roads of general use. Survey of bridges and viaducts. General requirements [Dorogi avtomobil'nye obshhego pol'zovaniya. Izyskaniya mostov i puteprovodov. Obshhie trebovaniya]. Moscow : Standardinform, 2017. 36 p.
2. GOST 32868–2014. Automobile roads of general use. Requirements for carrying out of engineering geological survey [Dorogi avtomobil'nye obshhego pol'zovaniya. Trebovaniya k provedeniyu inzhenerno-geologicheskikh izyskaniy]. Moscow: Standardinform, 2015. 58 p.
3. Manual for road subgrade design on light soils [Posobie po proektirovaniyu zemlyanogo polotna avtomobil'nykh dorog na slabykh gruntakh] / Ministry of Transport of the Russian Federation. Moscow, 2003. 218 p.
4. Report on geotechnical monitoring of the 2nd intersection leg on the object of «Piskarevskiy avenue road from Rustaveli street to the ring road» under the title of «Construction of continuation of Piskarevskiy avenue from Rustaveli street to the ring road with overbridge over railway tracks of Ruchi station of the ring road traffic interchange» [Otchet o provedenii geotekhnicheskogo monitoringa s"ezda № 2 na ob"ekte «Avtomobil'naya doroga Piskarevskiy prospekt ot ul. Rustaveli do KAD» po titulu «Stroitel'stvo prodolzheniya Piskarevskogo prospekta ot ul. Rustaveli do KAD s ustroystvom puteprovoda cherez zh.-d. puti st. Ruch'i transportnoy razvyazki na KAD» / LLC «Scientific and technical center Geotechnology SPb». Saint Petersburg, 2008. 38 p.
5. GOST 24846–2012. Soils. Methods of measuring the strains of structure and building bases [Grunty. Metody izmereniy deformatsiy osnovaniy zdaniy i sooruzheniy]. Moscow : Standardinform, 2014. 20 p.
6. SP 305.1325800.2017. Building and structures. The rules of geotechnical monitoring under construction [Zdaniya i sooruzheniya. Pravila provedeniya geotekhnicheskogo monitoringa pri stroitel'stve] / Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation. Moscow, 2017. 58 p.
7. SP 32–104–98. Subgrade design of 1520 mm gauge railways [Proektirovanie zemlyanogo polotna zheleznykh dorog kolei 1520 mm] / The Russian Federation State Committee for Construction. Moscow, 1999. 99 p.

Объем статьи 0,61 авторских листа

УДК 621.331.3.024

Борис Алексеевич Аржанников, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Наталья Александровна Афанасьева, кандидат технических наук, доцент кафедры «Экономика транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Ирина Анатольевна Баева, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОРГАНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ ОДИНОЧНЫХ И СОЕДИНЕННЫХ ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДОВ

Boris Alexeyevich Arzhannikov, DSc in Engineering, Professor, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Natalya Alexandrovna Afanasyeva, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Economics Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Irina Anatolyevna Baeva, Senior Lecturer, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Economic efficiency of single and united freight trains operation

Аннотация

Проведено технико-экономическое сравнение организации движения двух одиночных грузовых поездов с заданным межпоездным интервалом и пропуска одного соединенного поезда. За основу взяты результаты тяговых и электрических расчетов системы тягового регулируемого электроснабжения участков Свердловской и Южно-Уральской железной дороги с различными по степени сложности профилями пути, типами локомотивов и скоростями движения. Полученные при выполнении расчетов затраты на движение позволили оценить экономическую эффективность вождения соединенных и одиночных поездов одинаковой массы.

Ключевые слова: электрифицированные участки, постоянный ток, соединенный поезд, одиночный поезд, затраты на движение, экономическая эффективность.

Summary

The paper considers an engineering and economic comparison of operation of two single freight trains with a specified train-to-train interval and operation of a united freight train. As the basis the authors took results of grade and electric computations of a traction power supply system of Sverdlovsk and South Ural Railways' sections with track grading of various difficulty, with different types of locomotives and driving speeds. Motive power costs obtained during computations allowed assessing economic efficiency of handling single and united freight trains of the same mass.

Keywords: electrified sections, direct current, united freight train, single freight train, motive power costs, economic efficiency.

DOI: 10.20291/1815-9400-2019-3-14-19

Для компании ОАО «РЖД» «развитие тяжеловесного движения является одним из инструментов, который позволит повысить провозные способности участков и направлений, создаст резерв пропускной способности сети... позволит повысить производительность локомотивов, локомотивных бригад, обеспечит сокращение потребления энергоресурсов на тягу поездов» [1]. Кроме использования вагонов повышенной грузоподъемности, увеличение пропускной способности участка обеспечивается за счет движения поездов по системе многих единиц тяги или за счет соединенных поездов (СП). Окончательное решение о применении соединенных грузовых поездов принимается по результатам расчета экономической эффективности с определением затрат на движение.

В статье рассматривается технико-экономическая эффективность вождения одного соединенного и двух одиночных поездов (ОП) с межпоездным интервалом 10 мин, имеющих одинаковую массу, по трем участкам Свердловской (Подволошная — Вогулка, Войновка — Богданович) и Южно-Уральской (Курган — Колчедан) железных дорог. Участки электрифицированы на

постоянном токе 3,0 кВ и различаются степенью сложности профиля пути.

Для определения удельного расхода электрической энергии (ЭЭ) в программном комплексе КОРТЭС по разработанной уточняющей методике [2, 3] проведены электрические расчеты системы тягового регулируемого электроснабжения (СТРЭ). В основу методики положен метод итерации, т.е. последовательное приближение расчетного значения $A_{\text{ЭПС}}$ к базовому значению $A_{\text{ЭПС, б}}$ за счет ограничения тока электровоза, полученного при выполнении тяговых расчетов, введением поправочных токовых коэффициентов $KI_{\text{СТ}} < 1$. За $A_{\text{ЭПС}}$ принят расход ЭЭ по счетчикам электроподвижного состава (ЭПС), полученный в результате электрических расчетов нерегулируемой системы тягового электроснабжения (СТЭ) с напряжением холостого хода $U_{\text{ХХ}} = 3500$ В, а за $A_{\text{ЭПС, б}}$ — расход, полученный по результатам электрического расчета СТРЭ при стабилизации напряжения на уровне $U_{\text{СТ}} = 3700$ В. Силовое оборудование, состав контактной подвески, профиль пути для исследуемых участков Подволошная — Вогулка, Войновка — Богданович и Курган — Колчедан представлены на рис. 1–3.

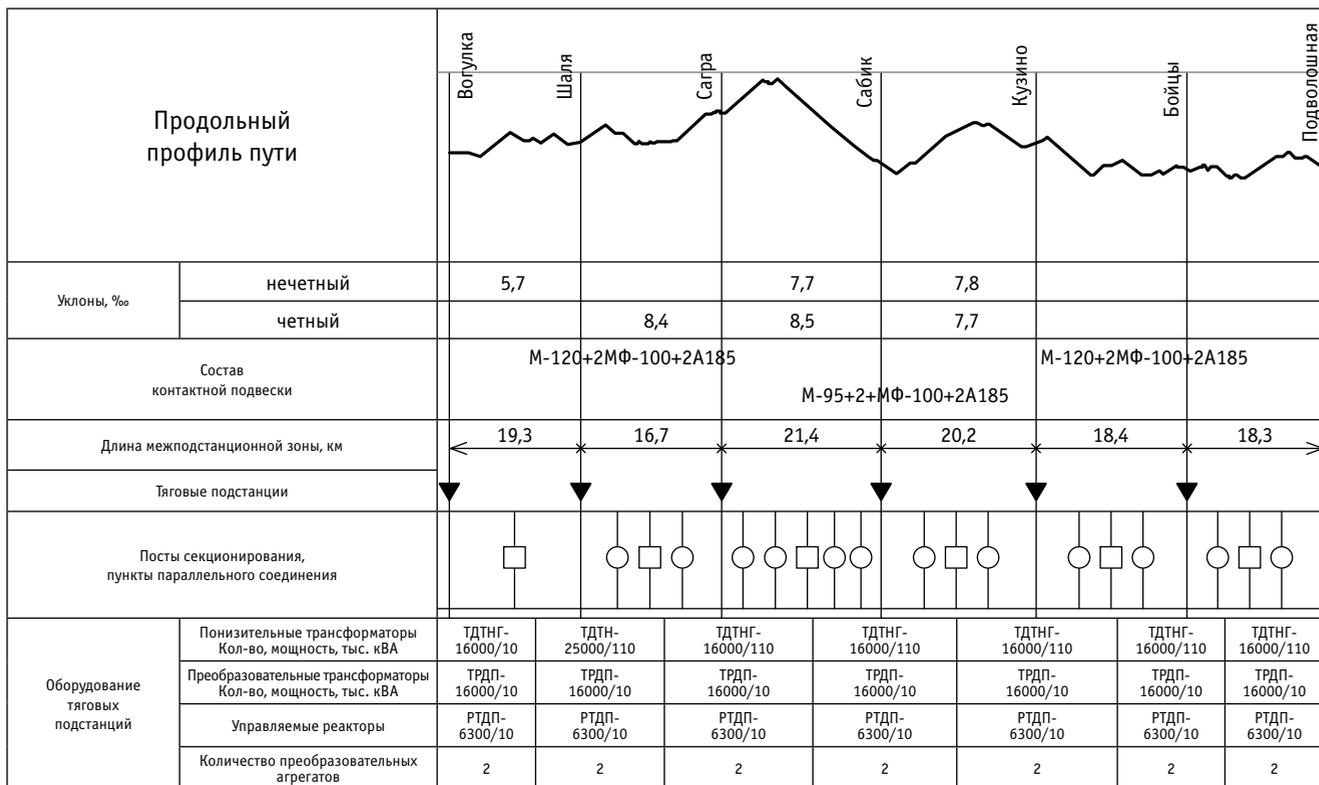


Рис. 1. Продольный профиль пути участка Подволошная — Волгулка

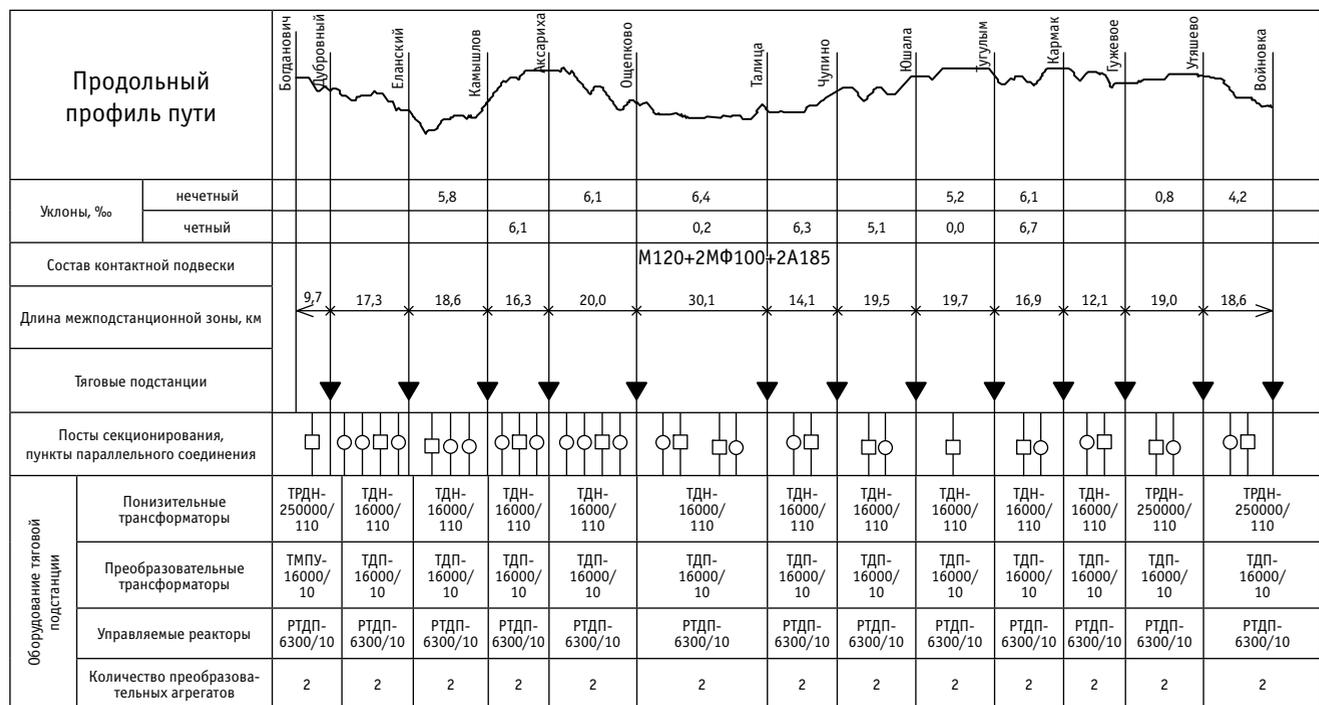


Рис. 2. Продольный профиль пути участка Войновка — Богданович

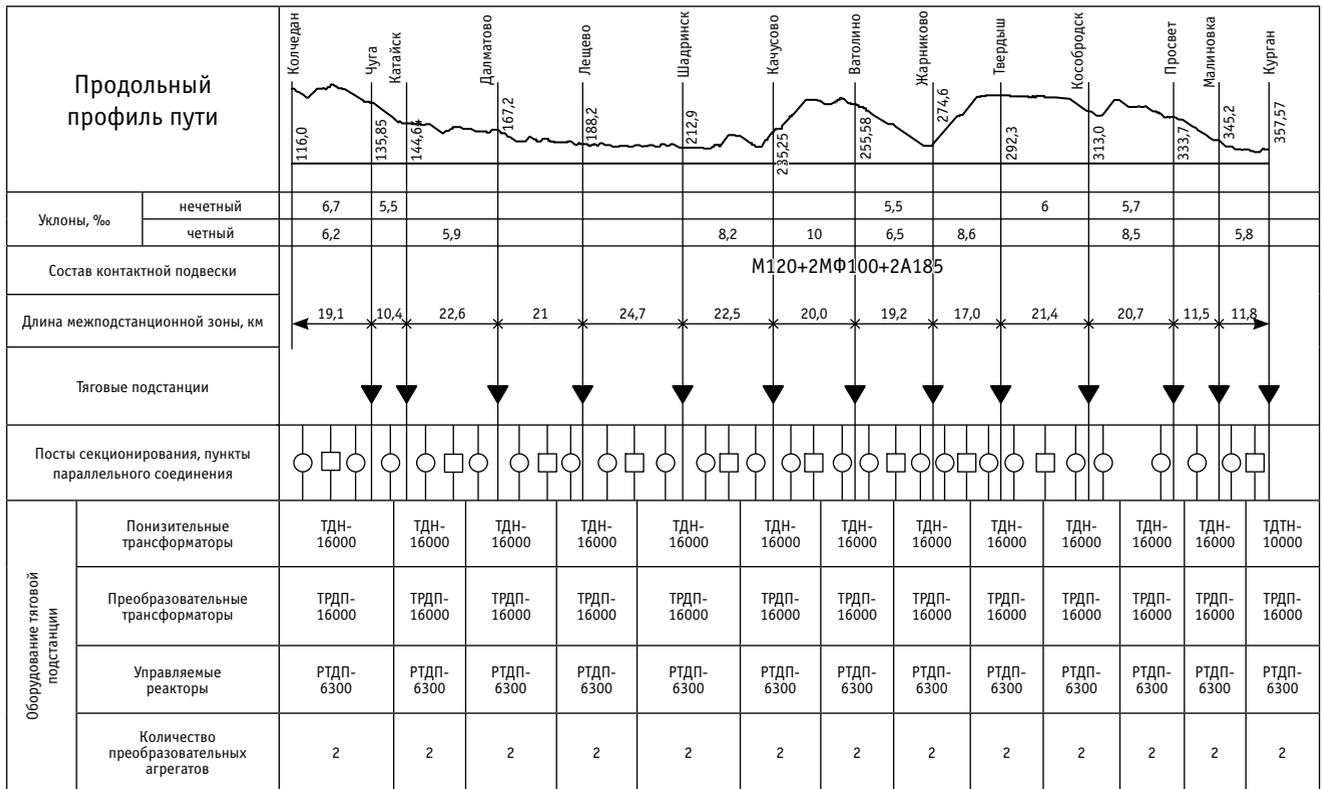


Рис. 3. Продольный профиль пути участка Курган — Колчедан

При одинаковой тонно-километровой работе и скорости движения одного СП и двух ОП затрачивается одна и та же механическая работа, следовательно, расход $A_{\text{элс}}$ тоже одинаков. Как показали электрические расчеты в программном комплексе КОРТЭС, при пропуске одного СП расход $A_{\text{элс}}$ ниже, чем при пропуске двух ОП (суммарный ток двух электропоездов СП снижает напряжение на токоприемнике электровоза и скорость движения, а соответственно и расход ЭЭ по счетчикам ЭПС).

Для повышения расхода $A_{\text{элс}}$ при пропуске СП до базового значения $A_{\text{элс, б}}$ при пропуске двух ОП необходимо величину тока электровоза, полученного в результате выполнения тяговых расчетов, умножить на поправочный токовый коэффициент $KI_{\text{хх}} > 1$, т.е. увеличивающий ток электропоездов СП. Методика расчета основана на методе итерации. Приведение базовой величины к расчетной выполняют с заданной погрешностью не более 1 %.

Условия для проведения электрических расчетов СТЭ:

отсутствие движения в четном направлении и движение в нечетном направлении двух ОП массой по 6000 т с межпоездным интервалом 10 мин или одного СП;

продолжительность расчета — от момента отправки первого поезда со станции отправления до момента прихода последнего вагона на станцию прибытия;

скорость движения поездов от 50 до 100 км/ч;

локомотивы для участка Курган — Колчедан — 2×ВЛ10, Войновка — Богданович — 2ЭС6, Подволошная — Вогулка — 2ЭС10.

Результаты электрических расчетов СТЭ представлены в табл. 1 и на рис. 4.

Таблица 1

Удельный расход электрической энергии СТЭ при отсутствии движения в четном направлении и движении в нечетном направлении двух ОП массой по 6000 т с межпоездным интервалом 10 мин и одного СП

V , км/ч	Поезд массой, тыс. т	Удельный расход ЭЭ на тягу $a_{\text{ТП}}$, кВт·ч/10 ⁴ т·км, по участкам		
		Курган — Колчедан	Войновка — Богданович	Подволошная — Вогулка
50	ОП 6–6	112,6	109,3	136,1
	СП [6 + 6]	114,9	111,5	140,8
60	ОП 6–6	117,0	109,2	141,3
	СП [6 + 6]	119,4	111,2	147
70	ОП 6–6	119,8	106,5	143,1
	СП [6 + 6]	122,1	110,2	152,2
80	ОП 6–6	125,5	114,2	149,7
	СП [6 + 6]	130,1	118,9	158,7
90	ОП 6–6	123,8	118,7	151,6
	СП [6 + 6]	129	124,7	160,5
100	ОП 6–6	137,4	125,1	146,5
	СП [6 + 6]	142,6	130,2	156,1

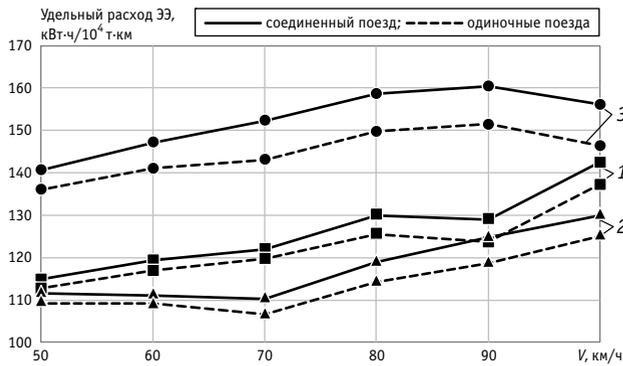


Рис. 4. Удельный расход электрической энергии при движении двух одиночных грузовых поездов (пунктир) по 6000 т с межпоездным интервалом 10 мин и одного соединенного поезда (сплошная линия) на участках Курган — Колчедан (1), Войновка — Богданович (2), Подволошная — Вогулка (3) при напряжении стабилизации на тяговых подстанциях 3700 В

Электрические расчеты СТРЭ показывают, что удельные расходы ЭЭ тяговых подстанций на рассматриваемых участках увеличиваются при движении соединенного поезда по сравнению с движением двух одиночных поездов.

При введении на участках движения соединенных грузовых поездов определяющими факторами повышения удельного расхода ЭЭ являются потери электроэнергии в тяговой сети и трансформаторах.

Для принятия окончательного решения об использовании технологии СП выполнен технико-экономический расчет [4] организации движения одиночных и соединенных грузовых поездов.

Расходы, связанные с пропуском грузовых поездов по вариантам в зависимости от пробега, рассчитываются по следующей формуле [5], руб.:

$$E = E_{\text{ваг-км}} + E_{\text{лок-км}} + E_{\text{лок-ч}} + E_{\text{бр-ч}} + E_{\text{т-км}} + E_{\text{э/т}} + E_{\text{ман-ч}} + E_{\text{го}}, \quad (1)$$

где $E_{\text{ваг-км}}$ — переменные расходы, зависящие от пробега грузовых вагонов;

$E_{\text{лок-км}}$ — переменные расходы, зависящие от линейного пробега локомотивов;

$E_{\text{лок-ч}}$ — переменные расходы, зависящие от времени работы поездных локомотивов;

$E_{\text{бр-ч}}$ — переменные расходы, зависящие от времени работы локомотивных бригад;

$E_{\text{т-км}}$ — переменные расходы, зависящие от объема перевозок;

$E_{\text{э/т}}$ — переменные расходы, зависящие от расхода электрической энергии на тягу поездов;

$E_{\text{ман-ч}}$ — переменные расходы, зависящие от времени работы маневровых локомотивов;

$E_{\text{го}}$ — переменные расходы, зависящие от нахождения грузовых отправок в пути следования.

Расчеты по формуле (1) выполнены с использованием соответствующих расходных ставок [6] и значений измерителей [7].

При формировании и пропуске соединенного грузового поезда у ОАО «РЖД» появляются следующие дополнительные расходы, руб.:

$$E_{\text{соед}} = E_{\text{ф-р}} + E_{\text{под.пгс}} + E_{\text{зад}} + E_{\text{ман}} + E_{\text{инфр}} + E_{\text{доп}}, \quad (2)$$

где $E_{\text{ф-р}}$ — дополнительные расходы, связанные с формированием и расформированием соединенных поездов;

$E_{\text{под.пгс}}$ — дополнительные расходы, связанные с подготовкой одиночных грузовых поездов для соединения;

$E_{\text{зад}}$ — дополнительные расходы, связанные с задержкой поездов различных категорий из-за формирования и расформирования соединенных поездов на станциях полигона;

$E_{\text{ман}}$ — дополнительные расходы, связанные с увеличением потребного числа маневровых локомотивов при занятии стационных путей формированием и расформированием соединенных поездов (эти расходы возникают в результате уменьшения суточного бюджета времени работы маневровых локомотивов из-за враждебности маршрутов на станциях полигона);

$E_{\text{инфр}}$ — дополнительные расходы, связанные с подготовкой железнодорожной инфраструктуры к пропуску грузовых соединенных поездов (в основном они единовременные, складываются из стоимости работ, материалов и оборудования);

$E_{\text{доп}}$ — дополнительные расходы, связанные с пропуском грузовых соединенных поездов.

Дополнительные расходы, связанные с формированием и расформированием соединенных поездов, в расчете на соединенный поезд определяются следующим образом, руб.:

$$E_{\text{ф-р}} = N_{\text{одн}} \cdot (\sum Nt_{\text{ф}} + \sum Nt_{\text{р}}) \cdot E_{\text{пч}}, \quad (3)$$

где $N_{\text{одн}}$ — число одиночных грузовых поездов в составе СП, равное 2;

$\sum Nt_{\text{ф}} + \sum Nt_{\text{р}}$ — сумма затрат поездо-часов на соединение и разъединение составов СП по железнодорожным станциям рассматриваемого полигона, поездо-ч;

$E_{\text{пч}}$ — укрупненная расходная ставка на поездо-час простоя грузового поезда соответствующего вида тяги, руб./поездо-ч.

Затраты поездо-часов для конкретной железнодорожной станции определяются как произведение числа соединяемых и разъединяемых составов СП на норму времени, заложенную в технологическом процессе работы данной станции.

Дополнительные расходы, связанные с подготовкой одиночных грузовых поездов для соединения, рассчитываются по формуле, руб.:

$$E_{\text{подг.пгс}} = N_{\text{одн}} \cdot \sum Nt_{\text{подг.пгс}} + E_{\text{пч}} + t_{\text{м.подг.пгс}} \cdot e_{\text{ман-ч}}, \quad (4)$$

где $\sum Nt_{\text{подг.пгс}}$ — сумма затрат поездо-часов на подготовку одного одиночного грузового поезда для соединения, принимается в соответствии с технологическим процессом работы станции, поездо-ч;

$t_{\text{м.подг.пгс}}$ — время работы маневрового локомотива на подготовку одиночных грузовых поездов для соединения, принимается в соответствии с технологическим процессом работы станции, ч;

$e_{\text{ман-ч}}$ — расходная ставка работы маневрового локомотива, руб./лок-ч.

В табл. 2 приведены условия расчета экономической эффективности вождения соединенных поездов СП [6 + 6] по сравнению с организацией тяжеловесного движения одиночными поездами ОП 6–6 для трех рассматриваемых участков пути. В расчете используются единичные и укрупненные расходные ставки, предназначенные для решения экономических задач ОАО «РЖД» по перевозочным видам деятельности [6]. Возможные пени за просрочку доставки грузов в случае задержки грузовых поездов в пути следования и отставления их от движения приняты равными нулю. Кроме того, приня-

то, что привлечение дополнительных маневровых локомотивов не требуется, а также что другие поезда на станциях в связи с формированием соединенных поездов дополнительно не задерживаются.

Результаты расчета экономической эффективности вождения СП и ОП на рассматриваемых участках при отсутствии движения в четном направлении и движении в нечетном направлении двух ОП массой по 6000 т с межпоездным интервалом 10 мин и двух соединенных между собой одиночных грузовых поездов массой по 6000 т [6000 т + 6000 т] с введением устройств регулирования напряжения системой БАРН на уровне 3700 В приведены в табл. 3.

Таблица 2

Условия расчета экономической эффективности вождения СП и ОП для рассматриваемых участков пути

Параметр	Войновка — Богданович		Курган — Колчедан		Подволошная — Вогулка	
	ОП 6–6	СП [6 + 6]	ОП 6–6	СП [6 + 6]	ОП 6–6	СП [6 + 6]
Протяженность участка, км	231,9	231,9	241,6	241,6	114,3	114,3
Расходная ставка на вагону-километр грузового вагона парков различной принадлежности, руб./ваг-км	0,12	0,12	0,09	0,09	0,12	0,12
Расходная ставка на локомотиво-километр поездных электровозов парка ОАО «РЖД», руб./лок-км	32,09	32,09	33,51	33,51	32,09	32,09
Техническая скорость движения грузовых поездов, км/ч	83,7	83,7	83,7	83,7	83,7	83,7
Время простоя поездного локомотива, приходящееся на 1 км его общего пробега, ч	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Расходная ставка на локомотиво-час поездных электровозов парка ОАО «РЖД», руб./лок-ч	500,91	500,91	341,44	341,44	500,91	500,91
Расходная ставка на бригадо-час электровозной бригады, руб./бр-ч	1271,51	1271,51	1202,34	1202,34	1271,51	1271,51
Время вспомогательной работы локомотивных бригад, ч	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
Расходная ставка, руб./1000 т-км бр	12,34	12,34	6,08	6,08	12,34	12,34
Удельный расход ЭЭ на тягу, кВт-ч/10 ⁴ т-км	118,7	124,7	123,8	129	151,6	160,5
Стоимость электроэнергии, руб./кВт-ч	3,72	3,72	3,49	3,49	3,72	3,72
Время формирования СП, мин [8]	0	33	0	33	0	33
Время расформирования СП, мин [8]	0	14	0	14	0	14
Время, связанное с подготовкой одинарных грузовых поездов для соединения, мин [8]	0	34	0	34	0	34
Укрупненная расходная ставка на поезд-час простоя грузового поезда соответствующего вида тяги, руб./поездо-ч	0	2094,81	0	1959,18	0	2094,81
Расходная ставка на локомотиво-час работы маневрового локомотива, руб./лок-ч	0	995,54	0	995,54	0	995,54

Таблица 3

Результаты расчета экономической эффективности вождения СП и ОП

Затраты, руб.	Войновка — Богданович		Курган — Колчедан		Подволошная — Вогулка	
	ОП 6–6	СП [6 + 6]	ОП 6–6	СП [6 + 6]	ОП 6–6	СП [6 + 6]
Затраты, связанные с пробегом грузовых вагонов	3952	3952	3088	3088	1948	1948
Расходы, связанные с линейным пробегом локомотивов	14883	14883	16192	16192	7336	7336
Расходы, связанные с временем работы поездных локомотивов	5099	5099	3621	3621	2513	2513
Расходы, связанные с временем работы локомотивных бригад	14712	14712	14494	14494	7251	7251
Расходы, связанные с тонно-километровой брутто работой вагонов и локомотивов	34340	34340	17627	17627	16926	16926
Затраты, связанные с расходом электроэнергии на тягу поездов	122878	129090	125263	130525	77352	81893
Затраты, связанные с формированием и расформированием соединенных поездов	0	6564	0	6139	0	6564
Затраты, связанные с подготовкой одинарных грузовых поездов для соединения	0	2938	0	2785	0	2938
Расходы на движение	195864	211577	180285	194470	113325	127368
Увеличение расходов на движение после введения СП, %	7,4		7,3		11,0	

Как видно из табл. 3, расходы на движение соединенных поездов в сравнении с организацией движения одиночных поездов на участке Курган — Колчедан увеличиваются на 7,3 %, на участке Войновка — Богданович — на 7,4 %, на участке Подволошная — Вогулка — на 11,0 %.

Таким образом, по результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

электрические расчеты СТРЭ для трех типов профилей пути показали, что удельный расход электрической энергии по счетчи-

кам ЭПС с учетом ее потерь в тяговой сети и трансформаторах тяговых подстанций увеличивается при пропуске одного соединенного поезда по сравнению с пропуском двух одиночных поездов; при технико-экономическом сравнении вариантов организации движения одиночных и соединенных грузовых поездов установлено, что затраты на движение ОП ниже, чем на СП, на всех трех рассмотренных участках (Курган — Колчедан на 7,3 %, Войновка — Богданович — на 7,4 %, Подволошная — Вогулка — на 11,0 %).

Литература

1. ОАО «РЖД» развивает движение тяжеловесных грузовых поездов. URL: http://press.rzd.ru/news/public/ru?STRUCTURE_ID=654&id=84155&layer_id=4069 (дата обращения: 30.07.2019).
2. Аржанников Б. А., Баева И. А. Влияние организации движения соединенных грузовых поездов на повышение пропускной способности участков, электрифицированных на постоянном токе // Известия Транссиба. 2018. № 2 (34). С. 50–64. ISSN 2220–4245.
3. Аржанников Б. А., Баева И. А. Влияние регулирования напряжения на пропускную способность электрифицированных участков постоянного тока и на расход электрической энергии на тягу поездов // Транспорт Урала. 2017. № 4 (55). С. 71–75. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-4-71-75. ISSN 1815–9400.
4. Осьминин А. Т., Сотников Е. А. Эффективность формирования и вождения соединенных поездов // Железнодорожный транспорт. 2016. № 4. С. 8–11. ISSN 0044–4448.
5. Технология вождения соединенных грузовых поездов с использованием системы ISAVP-RT локомотивными бригадами ТЧЭ-15 на участке Курган — Каменск-Уральский — Седельниково : утверждена Свердловской дирекцией тяги — филиалом ОАО «РЖД» 25.05.2015 г. Екатеринбург, 2015. 13 с.
6. Комплексная методика оценки технологической и экономической эффективности тяжеловесного движения и вождения соединенных поездов на железнодорожных линиях, учитывающая их влияние на стоимость жизненного цикла объектов инфраструктуры и тягового подвижного состава : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 22.12.2016 г. № 2628р.
7. Порядок определения эффективности формирования и вождения соединенных поездов во всех видах движения на основе критериев экономической целесообразности, состояния и загрузки инфраструктуры и безопасности движения : утвержден распоряжением ОАО «РЖД» от 28.12.2015 г. № 3109р.
8. Методические рекомендации по расчету единичных и укрупненных расходных ставок для использования в экономических задачах ОАО «РЖД» по перевозочным видам деятельности : утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 07.06.2019 г. № 1137р.

References

1. JSC Russian Railways develops operation of heavy-load trains [OAO «RZhD» razvivaet dvizhenie tyazhelovesnykh gruzovykh poezdov]. URL: http://press.rzd.ru/news/public/ru?STRUCTURE_ID=654&id=84155&layer_id=4069 (access date: 30.07.2019).
2. Arzhannikov B. A., Baeva I. A. Influence of the organization of the movement of the united freight trains on the increasing of the capacity of the plots electrified on a DC [Vliyaniye organizatsii dvizheniya soedinennykh gruzovykh poezdov na povyseniye propusknoy sposobnosti uchastkov, elektrifitsirovannykh na postoyannom toke] // Journal of Transsib Railway Studies. 2018. No. 2 (34). Pp. 50–64. ISSN 2220–4245.
3. Arzhannikov B. A., Baeva I. A. The effect of voltage regulation on capacity of electrified DC sections and on the consumption of electric energy on the traction of trains [Vliyaniye regulirovaniya napryazheniya na propusknyuyu sposobnost' elektrifitsirovannykh uchastkov postoyannogo toka i na raskhod elektricheskoy energii na tyagu poezdov] // Transport of the Urals. 2017. No. 4 (55). Pp. 71–75. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-4-71-75. ISSN 1815–9400.
4. Osminin A. T., Sotnikov E. A. The efficiency of the formation and driving of the united trains [Effektivnost' formirovaniya i vozheniya soedinennykh poezdov] // Railway Transport. 2016. No. 4. Pp. 8–11. ISSN 0044–4448.
5. Technology of handling united freight trains using ISAVP-RT system by TChE-15 engine crews on Kurgan — Kamensk Uralskiy — Sedelnikovo railway section [Tekhnologiya vozheniya soedinennykh gruzovykh poezdov s ispol'zovaniem sistemy ISAVP-RT lokomotivnymi brigadami TChE-15 na uchastke Kurgan — Kamensk-Ural'skiy — Sedel'nikovo] : approved by the Sverdlovsk Directorate of Traction — branch of the JSC Russian Railways 25.05.2015. Ekaterinburg, 2015. 13 p.
6. Complex method for technological and economic assessment of handling heavy-load and united freight trains on railway lines that considers their influence on life cycle cost of infrastructure objects and traction rolling stock [Kompleksnaya metodika otsenki tekhnologicheskoy i ekonomicheskoy effektivnosti tyazhelovesnogo dvizheniya i vozheniya soedinennykh poezdov na zheleznodorozhnykh liniyakh, uchityvayushhaya ikh vliyaniye na stoimost' zhiznennogo tsikla ob'ektov infrastruktury i tyagovogo podvizhnogo sostava] : approved by Order of JSC Russian Railways dated 22.12.2016. No. 2628r.
7. Procedure for determining efficiency of making-up and handling united freight trains in all types of movement based on economic feasibility criteria, conditions and loading of infrastructure and security of train operation [Poryadok opredeleniya effektivnosti formirovaniya i vozheniya soedinennykh poezdov vo vseh vidakh dvizheniya na osnove kriteriev ekonomicheskoy tselesoobraznosti, sostoyaniya i zagruzki infrastruktury i bezopasnosti dvizheniya] : approved by Order of JSC Russian Railways dated 28.12.2015. No. 3109r.
8. Guidelines for calculation of unit and integrated expenditure rates for the use in economic tasks for transportation activities of JSC Russian Railways [Metodicheskie rekomendatsii po raschetu edinichnykh i ukрупnennykh raskhodnykh stavok dlya ispol'zovaniya v ekonomicheskikh zadachakh OAO «RZhD» po perevozochnym vidam deyatel'nosti] : approved by Order of JSC Russian Railways dated 07.06.2019. No. 1137r.

Объем статьи 0,72 авторских листа

УДК 531.311:621.822

Лев Беркович Цвик, доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС), Иркутск, Россия,

Анатолий Анатольевич Тармаев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС), Иркутск, Россия,

Игорь Сергеевич Бочаров, студент Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС), Иркутск, Россия

ГЛАДКОСТЬ КОНТУРОВ ТЕЛ КАЧЕНИЯ ПОДШИПНИКОВ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ РОЛИКАМИ И РЕСУРС ИХ ЦИКЛИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

Lev Berkovich Tsvik, DSc in Engineering, Professor, Railway Cars and Rolling Stock Department, Irkutsk State Transport University (ISTU), Irkutsk, Russia,

Anatoliy Anatolyevich Tarmaev, PhD in Engineering, Associate Professor, Railway Cars and Rolling Stock Department, Irkutsk State Transport University (ISTU), Irkutsk, Russia,

Igor Sergeevich Bocharov, student, Irkutsk State Transport University (ISTU), Irkutsk, Russia

Smoothness of rolling elements contours of bearings with cylindrical rollers and their life time

Аннотация

Описана разработка конструктивных рекомендаций, направленных на увеличение ресурса работы роликовых подшипников букс железнодорожных вагонов. Анализируется упругое объемное напряженно-деформированное состояние несущих элементов рассматриваемых подшипников. Численный анализ соответствующих математических моделей выполнен с помощью метода конечных элементов в программной среде NX NASTRAN. Показано, что вблизи края ролика с фаской-скруглением возникает концентрация напряжений, вызванная недостаточной гладкостью линии контура осевого сечения ролика. Такая концентрация вызвана тем, что линия этого контура имеет (в случае использования рассматриваемых фасок) конечную заданную кривизну на участке, соответствующем фаске, и практически нулевую кривизну на смежном прямолинейном участке, соответствующем цилиндрической поверхности ролика. Контур профиля осевого сечения ролика имеет при этом разрыв кривизны, а функция, описывающая линию контура, — разрыв производной второго порядка. Показано, что применение более гладких линий контура с непрерывно и плавно изменяющейся кривизной позволяет существенно (в рассматриваемом случае — более чем вдвое) снизить максимальное значение интенсивности напряжений в краевой зоне ролика, снизить образование контактно-усталостных раковин и повысить циклический ресурс работы подшипника. Предложенное сглаживание линии рассматриваемого контура дает возможность не только разгрузить край ролика, но и снизить контактные давления в средней части его поверхности качения. Напряженно-деформированное состояние ролика становится более равномерным за счет одновременного повышения плавности линии контура в зоне края ролика и за счет снижения необходимой степени бомбинирования (бочкообразности) его цилиндрической поверхности.

Ключевые слова: численное моделирование, напряженно-деформированное состояние, усталостные повреждения, интенсивность напряжений, ресурс работоспособности, роликовый подшипник, букса.

Summary

The paper describes the development of constructive recommendations aimed at increasing the life time of roller bearings of railway car axle-boxes. In the paper the authors analyse the elastic volumetric stress-strain state of supporting members of bearings under consideration. The numerical analysis of the corresponding mathematical models was carried out using the finite element method in the NX NASTRAN software environment. It showed that a stress concentration arises near the edge of the roller with chamfer-rounding, which is caused by insufficient smoothness of the roller axial section contour line. This concentration is caused by the fact that the contour line has (in the case of using the chamfers under consideration) a finite specified curvature on the section corresponding to the chamfer and an almost zero curvature on the adjacent straight section corresponding to the cylindrical surface of the roller. The axial section profile contour of the roller has a discontinuity of curvature, and the corresponding function describing the contour line has the second order derivative discontinuity. The application of smoother contour lines with a continuously and smoothly changing curvature enables a significant (in the considered case — more than twice) reduction of the maximum stress intensity in the edge zone of the roller. At the same time, it respectively reduces the formation of contact-fatigue cavities and increases the life time of the bearing. The proposed smoothing of the contour line enables not only the roller edge unloading, but also the reduction of the contact pressure in the middle part of the rolling surface. The stress-strain state of the roller becomes more uniform due to the simultaneous increase in the smoothness of the contour line in the area of the roller edge and decrease in the required degree of barreling of its cylindrical surface.

Keywords: numerical modelling, stress-strain state, fatigue damage, stress intensity, life time, roller bearing, axle-box.

DOI: 10.20291/1815-9400-2019-3-20-27

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

В настоящее время происходят заметные изменения условий эксплуатации колесных пар железнодорожных вагонов. Наибольший вклад в эти изменения вносит увеличение скоростей движения и веса составов [1]. При этом для обеспечения надежности работы колесных пар определяющее значение имеет повышение эксплуатационной надежности колес и элементов буксовых узлов — роликов и колец подшипников [2–7]. Одним из эффективных путей совершенствования указанных элементов является поиск рациональных конструктивных вариантов, основанный на использовании математических моделей их напряженно-деформированного состояния (НДС) и экспериментально выверенных критериев оценки их долговечности [8–10]. В условиях циклической работы высоко-

нагруженных несущих элементов конструкций таким критерием, как правило, служит интенсивность напряжений σ_i [11–20].

ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЕГО МОДЕЛИРОВАНИЕ

Рассмотрим конструктивную схему сопряжения ролика подшипника и его колец на примере одного из типовых буксовых узлов (рис. 1) [21].

Долговечность элементов буксового узла во многих случаях определяется моментом появления контактно-усталостных раковин [22] поверхностей контакта тел качения подшипников и их внутренних и наружных колец (рис. 2). Ключевым фактором возникновения усталостных повреждений является повышенный уровень интенсивности напряжений σ_i в возможном очаге повреждения.

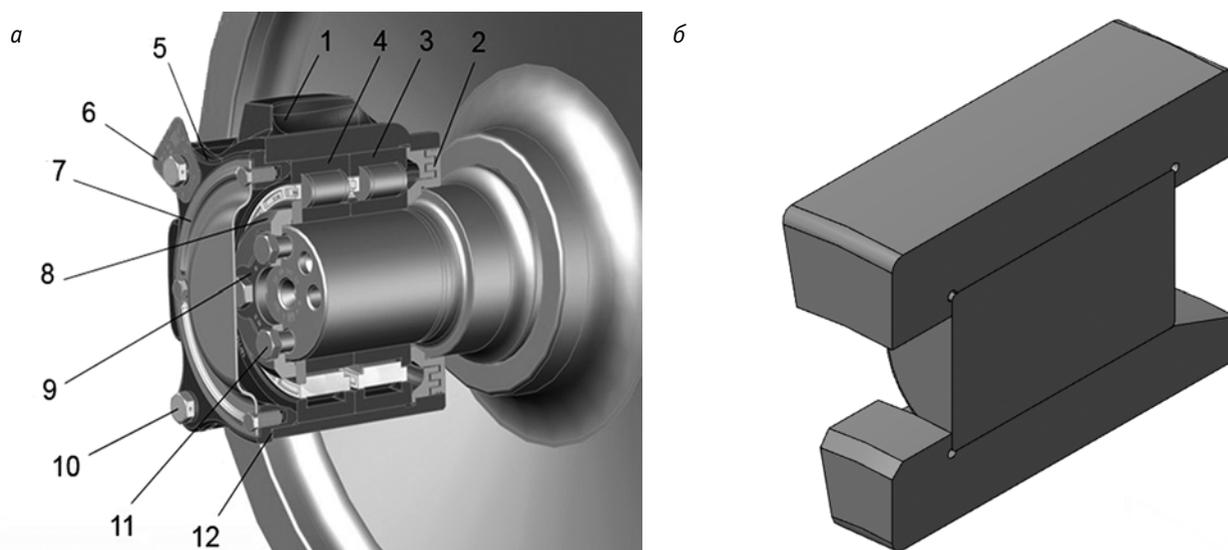


Рис. 1. Конструктивная схема сопряжения ролика подшипника и его колец:

а — конструктивная схема типового буксового узла грузового вагона; *б* — осевое сечение фрагмента заднего подшипника буксового узла, соответствующего одному ролику; 1 — корпус буксы; 2 — лабиринтное кольцо; 3 — задний подшипник; 4 — передний подшипник; 5 — крышка крепительная; 6 — бирка; 7 — крышка смотровая; 8 — шайба тарельчатая; 9 — шайба стопорная; 10 — болт М20 крышки крепительной; 11 — болт М12 крышки смотровой; 12 — кольцо уплотнительное

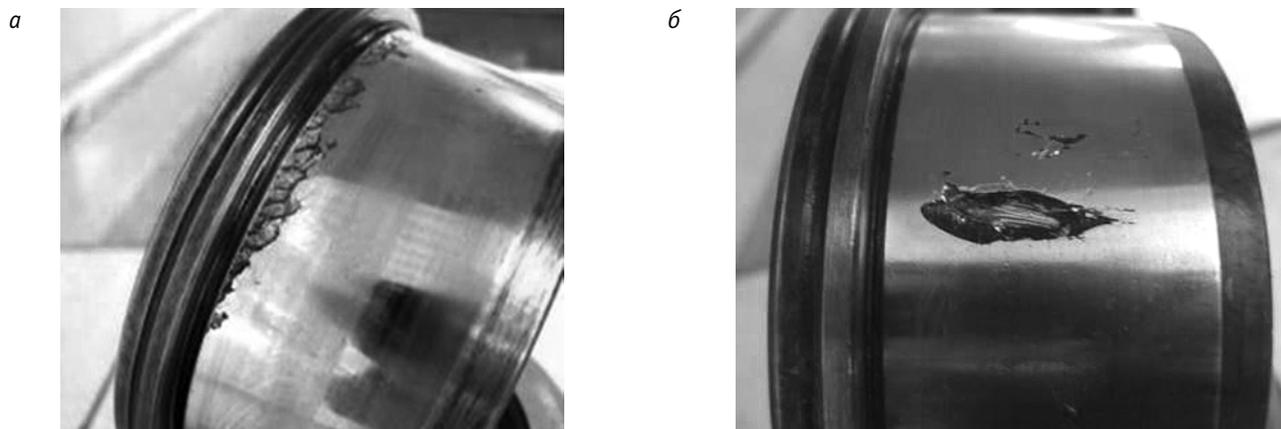


Рис. 2. Контакт-усталостные раковины на поверхности внутреннего кольца подшипника:

а — в зоне контакта края ролика и кольца; *б* — в зоне контакта средней части ролика и кольца

Для качественной расчетной оценки этого фактора может быть использована математическая модель упругого деформирования элементов буксового узла. В случае однородного изотропного материала рассматриваемого тела такая модель описывается дифференциальными уравнениями равновесия теории упругости

$$Lu = (\lambda + \mu)\text{grad div } \mathbf{u} + \Delta \mathbf{u} = 0, \quad (1)$$

где L — дифференциальный оператор теории упругости [23];

λ, μ — коэффициенты, определяющие механические свойства однородного изотропного материала элементов конструкции (параметры Ламе);

\mathbf{u} — искомый вектор перемещений в точках области D , занимаемой деформируемыми элементами конструкции.

Уравнения (1) рассматриваются в области D , ограниченной поверхностью $S = S_u + S_\sigma + S_{u\sigma}$ при краевых условиях:

$$\mathbf{u}|_{S_u} = \boldsymbol{\varphi}(M) \text{ при } M \in S_u; (\mathbf{v} \cdot \mathbf{T})|_{S_\sigma} = \mathbf{F}(M) \text{ при } M \in S_\sigma; \quad (2)$$

$$(\mathbf{u} \cdot \mathbf{v})|_{S_{u\sigma}} = \varphi_v(M), (\mathbf{v} \cdot \mathbf{T} \cdot \boldsymbol{\tau})|_{S_{u\sigma}} = 0 \text{ при } M \in S_{u\sigma} \quad (3)$$

где $S_u, S_\sigma, S_{u\sigma}$ — поверхности рассматриваемых деталей, на которых заданы поверхностные перемещения, поверхностные силы и смешанные (контактные) краевые условия соответственно;

\mathbf{T} — тензор напряжений;

$\boldsymbol{\varphi}(M), \varphi_v(M)$ — заданные векторная и скалярная функции точки M соответственно;

$\mathbf{F}(M)$ — вектор поверхностных сил, заданный на поверхности S_σ ;

$\mathbf{v}, \boldsymbol{\tau}$ — единичные векторы, определяющие нормальное и касательное направления к поверхности S в точке M .

МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Численное решение задачи (1)–(3) осуществляли с помощью метода конечных элементов (МКЭ), основанного на предварительной дискретизации исследуемой деформируемой системы [24–28]. При этом соотношения МКЭ рассматривали с позиций вариационного подхода, в соответствии с которым узловые перемещения дискретного аналога деформируемых деталей буксового узла находили из условия минимизации ее потенциальной энергии

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_V \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\sigma} dV - \mathbf{U}^T \mathbf{R}, \quad (4)$$

где $\boldsymbol{\varepsilon}$ — вектор деформаций в точках рассматриваемой деформируемой системы (T — символ транспонирования), образованный из компонент тензора деформаций;

$\boldsymbol{\sigma}$ — аналогичный вектор напряжений;

\mathbf{U} — вектор перемещений узлов дискретизации деформируемой конструкции буксового узла, V — ее объем;

\mathbf{R} — вектор внешних узловых воздействий на дискретизованную деформируемую систему элементов.

В пределах конечного элемента вектор перемещений \mathbf{u} может быть представлен с помощью матрицы интерполирующих функций N

$$\mathbf{u} = N\mathbf{d}, \quad (5)$$

где \mathbf{d} — вектор узловых перемещений в конечном элементе (КЭ).

Вектор перемещений $\mathbf{u} = \{u(x, y, z), v(x, y, z), w(x, y, z)\}^T$ рассматривали в глобальной для деформируемой системы декартовой системе координат. При построении дискретной модели деформирования использовали линейные КЭ, перемещения в пределах которых интерполировали функциями, зависящими от координат x, y, z . Вектор деформаций вычисляли в пределах КЭ через вектор \mathbf{d} по соотношению

$$\boldsymbol{\varepsilon} = B\mathbf{d}, \quad (6)$$

в котором B — соответствующая матрица дифференциальных операторов (матрица деформаций), определяемая равенством

$$B = AN^T, \quad (7)$$

а матрица операторов A определяет переход от перемещений к деформациям

$$\boldsymbol{\varepsilon} = A^T \mathbf{u}. \quad (8)$$

Используя соотношения (5)–(8), представим рассматриваемую потенциальную энергию через вектор \mathbf{U} — глобальный вектор узловых перемещений дискретизованной деформируемой системы:

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_V \mathbf{U}^T \mathbf{B}^T D B \mathbf{U} dV - \mathbf{U}^T \mathbf{R}, \quad (9)$$

где D — матрица упругих констант материала: $\boldsymbol{\sigma} = D\boldsymbol{\varepsilon}$.

Условия минимизации величины Π имеют вид

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \mathbf{U}} = \left\{ \frac{\partial \Pi}{\partial U_1}, \frac{\partial \Pi}{\partial U_2}, \dots, \frac{\partial \Pi}{\partial U_{N_u}} \right\}^T = 0 \quad (10)$$

и приводят к системе линейных алгебраических уравнений

$$K\mathbf{U} = \mathbf{R}, \quad (11)$$

в которой K — глобальная матрица жесткости рассматриваемой дискретизованной конструкции буксового узла,

$$K = \int_V \mathbf{B}^T D B dV. \quad (12)$$

Матрица K строится в процессе реализации МКЭ ассемблированием матриц жесткостей отдельных конечных элементов, вычисляемых по равенству

$$\frac{1}{2} d_e^T F_e = \frac{1}{2} \int_{V_e} \varepsilon_e^T \sigma_e dV_e \quad (13)$$

где V_e — объем конечного элемента номер e в общем массиве номеров КЭ дискретизованной конструкции рассматриваемого узла в целом (глобальный номер КЭ, далее указатель e в приводимых соотношениях, относящихся к отдельному КЭ, опускается).

Матрица жесткости конечного элемента k определяется соотношением

$$F = kd, \quad (14)$$

в котором d — вектор узловых перемещений рассматриваемого КЭ;

F — соответствующий вектор узловых сил.

Используя соотношения (13)–(14), для матрицы жесткости отдельного КЭ получаем

$$k = \int_{V_e} B^T DB dV_e. \quad (15)$$

Приведенные соотношения (4)–(15) полностью определяют построение системы (11) — системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), определяющей приближенное решение задачи (1)–(3). Учет краевых перемещений, задаваемых в узлах дискретизации рассматриваемой конструкции буксы, позволяет общую систему (11) заменить на редуцированную СЛАУ

$$K_{red}U = R_{red}, \quad (16)$$

определитель которой отличен от нуля, и представить искомое приближенное решение поставленной задачи в виде

$$U = (K_{red})^{-1} R_{red}. \quad (17)$$

Реализацию МКЭ применительно к решению задачи об определении НДС элементов буксового узла колесной пары осуществляли в программной среде NX NASTRAN. В этой же системе строили необходимые геометрические модели, осевое сечение которых представлено на рис. 3–5.

ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Оценку достоверности результатов численного моделирования осуществляли их сопоставлением на двух последовательных дискретизациях. При этом каждая последующая дискретизация образовывалась из предыдущей равномерным измельчением разбивки с уменьшением размеров конечных элементов вдвое. Достигнутую точность численного моделирования принимали приемлемой, если различие уровня напряжений, определенных в двух последовательных приближениях, не превышало заданного уровня. При оценке максимального уровня интенсивности напряжений σ_p , возникающих в элементах подшипника, рассматривали относительное различие указан-

ного уровня. Достигаемую при измельчении разбивки точность принимали приемлемой, если относительная величина различия приближений не превышала 3 %. Близость получаемых при измельчении разбивки приближений в общем случае может не совпадать с погрешностью численного результата. Решение модельной контактной задачи — задачи Герца — показало, что относительная погрешность соответствующего численного решения также не превысила 3 %. Такая точность моделирования была достигнута при использовании КЭ, наименьший размер которых в рассматриваемых зонах контактов роликов и колец составил 0,04 мм, а сами КЭ имели форму гексаэдра. Указанные размер и тип КЭ были использованы для получения представленных ниже результатов численного моделирования.

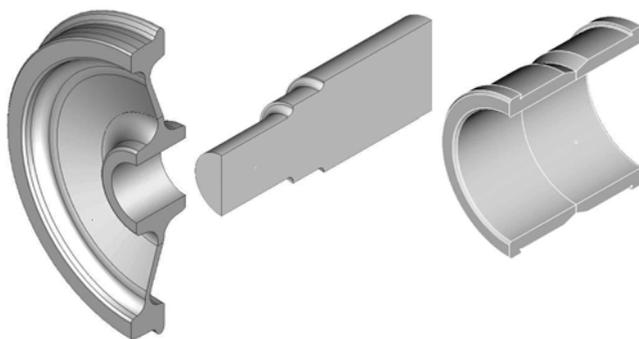


Рис. 3. Геометрические модели цельнокатаного колеса, оси колесной пары и внутренних колец подшипника

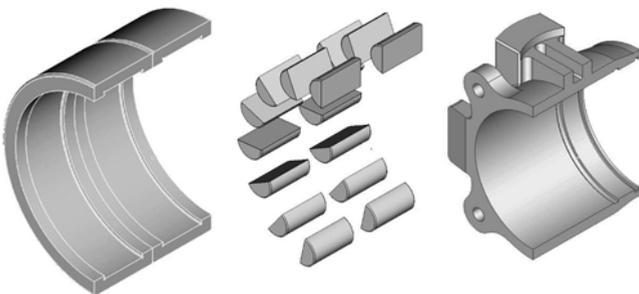


Рис. 4. Геометрические модели наружных колец, роликов подшипников и корпуса буксы

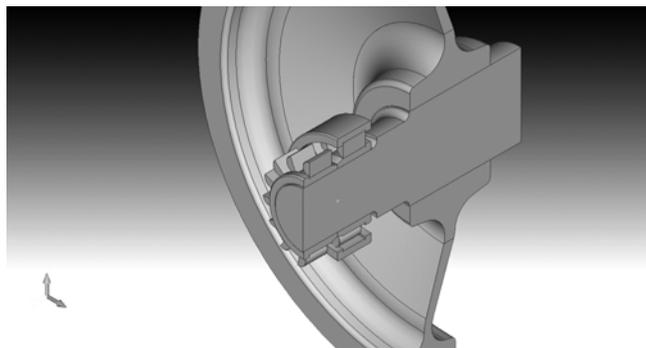


Рис. 5. Расположение роликов в переднем подшипнике буксы

В процессе моделирования принималось, что на упорные поверхности корпуса буксы действует вертикальная равномерно распределенная расчетная нагрузка, равная $5 \cdot 10^5$ Н. Общая картина распределения интенсивности напряжений σ_z , возникающих в роликах подшипников буксы под этой нагрузкой, представлена на рис. 6. Из него видно, что в роликах заднего подшипника уровень напряжений выше, чем в роликах переднего. При этом наибольшую нагрузку испытывает третий (при отсчете от вертикального осевого сечения буксового узла) ролик заднего подшипника, что соответствует известным результатам численного моделирования, приведенным в [2, 3].

При рассмотрении особенностей контакта и колец для достижения необходимой точности моделирования использовали предварительную разбивку роликов и колец подшипников на фрагменты (рис. 7а). Каждый из фрагментов разбивали при этом на КЭ независимо, с нарастающим по мере приближения к поверхности контакта сгущением разбивки и равномерно в пределах фрагмента (рис. 7б). Независимость КЭ-разбивок фрагментов позволила существенно упростить управление степенью дискретизации роликов и колец, чтобы обеспечить необходимую точность моделирования в зоне максимального уровня интенсивности напряжений σ_z рассматриваемого конструктивного узла.

Напряженно-деформированное состояние в пределах конструктивных элементов буксового узла существенно неравномерно. Так, размер зоны концентрации интенсивности напряжений σ_z в ролике зависит от глубины расположения точки максимума интенсивности напряжений σ_z^{\max} под поверхностью контакта ролика. Этот размер определяет глубину контактно усталостных раковин (см. рис. 2), появляющихся на поверхностях контакта в процессе эксплуатации подшипника, и составляет согласно результатам численного моделирования порядка 0,25 мм (рис. 8).

Предварительно выделенные фрагменты роликов и колец, представленные на рис. 7, при этом рассматривались как отдельные деформируемые тела, решения в которых сопрягались следующим образом. На внутренних (не относящихся к поверхностям контакта роликов и колец) поверхностях фрагментов осуществлялось сопряжение решений, соответствующее полному сцеплению (в программной среде NX NASTRAN использовалась опция Contact-glue — склейка решений в соприкасающихся подобластях) фрагментов. На поверхностях контакта роликов и колец задавались условия сопряжения, соответствующие идеальному контакту сопрягаемых поверхностей (контакту без трения). Описанный прием позволил использовать во фрагментах, примыкающих к поверхностям контакта роликов и колец, достаточно малые конечные элементы, имеющие форму гексаэдра, размер которых не превышает 0,04 мм. Соответствующая КЭ-разбивка привела к необходимости рассмотрения СЛАУ с числом искомым узловых перемещений, превышающим 2 000 000. Описанная дискретная модель позволила обеспечить необходимую точность моделирования на вычислительной технике (центральный процессор Intel Xeon E5, оперативная память 64 Гб).

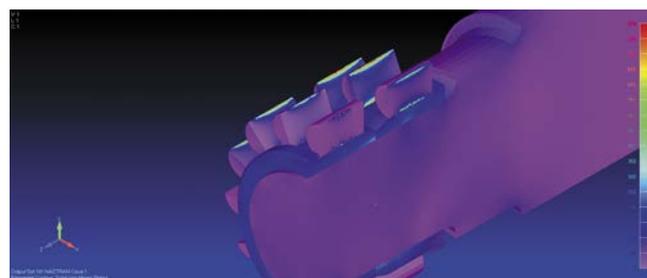


Рис. 6. Картина распределения интенсивности напряжений σ_z , возникающих при контактном взаимодействии роликов с кольцами подшипника при приложении расчетной нагрузки

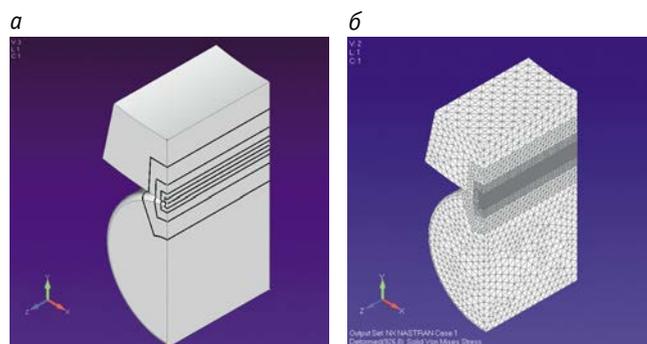


Рис. 7. Фрагментирование дискретной модели контактного взаимодействия ролика и колец подшипника:
а — схема фрагментирования;
б — конечно-элементная разбивка со ступенчатым сгущением

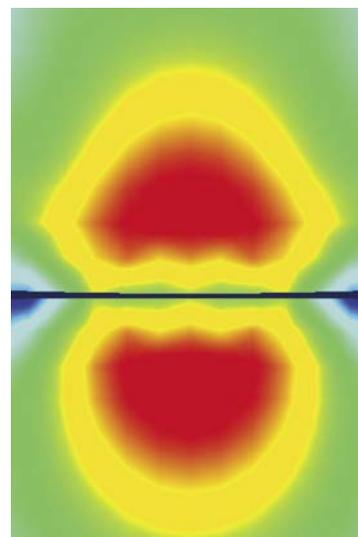


Рис. 8. Распределение интенсивности напряжений σ_z под поверхностями контакта ролика и кольца подшипника

Профили контактирующих поверхностей цилиндрического ролика с круговым профилем осевого сечения (ролика с фаской-скруглением), соответствующего стандарту [29], и наружного кольца подшипника схематически представлены на рис. 9а.

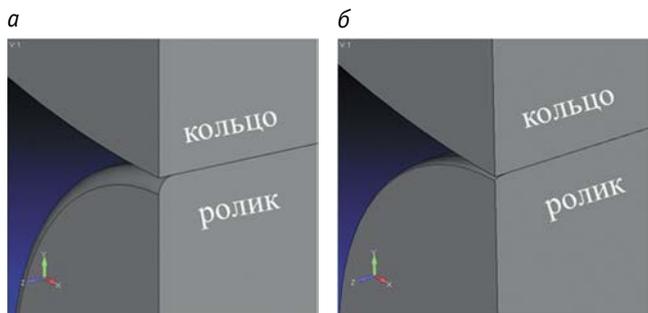


Рис. 9. Профили осевого сечения роликов:

а — ролик с фаской-скруглением;

б — ролик с эллиптическим профилем фаски

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Так как интенсивность напряжений σ_i является критерием возникновения контактно-усталостных повреждений, то существенный интерес представляет ее распределение в зоне контакта ролика и кольца подшипника. Результаты моделирования для ролика с прямолинейной образующей (без бомбинирования) и фаской-скруглением представлены на рис. 10а. Из него видно, что вблизи края ролика наблюдается значительная концентрация напряжений. Для снижения максимального уровня интенсивности напряжений в рассматриваемой зоне контакта в настоящее время используется бомбинирование — бочкообразность формы ролика с разностью диаметров в его средней части, составляющей порядка 14 мкм. Бомбинирование существенно снижает максимальный уровень интенсивности напряжений σ_i в зоне края ролика. Вычислительное моделирование, осуществленное по описанной выше схеме, показало, что для ролика типовой буксы, представленной на рис. 1, рассматриваемое снижение, обусловленное бомбинированием, уменьшает максимальный уровень σ_i практически вдвое (с 2400 до 1200 МПа).

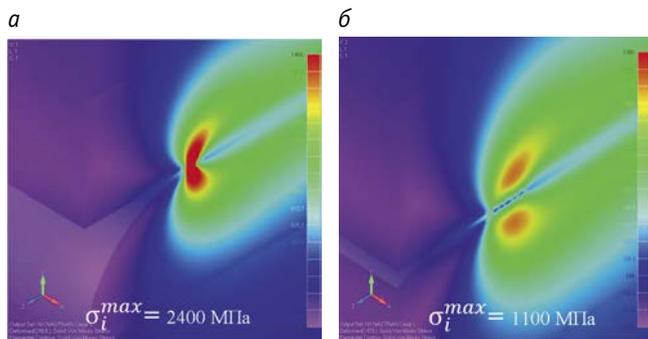


Рис. 10. Распределение интенсивности напряжений σ_i в осевом сечении подшипника вблизи края наиболее нагруженного ролика:

а — ролик с радиальной формой контура осевого сечения фаски;

б — ролик с эллиптической формой контура осевого сечения фаски

Необходимо отметить, что такой конструктивный прием, как бомбинирование, не устраняет причины концентрации напряжений вблизи краев роликов и приводит к заметному увели-

чению интенсивности напряжений σ_i в средней части боковой поверхности (по результатам вычислительного моделирования — более чем на 125 МПа). Это обстоятельство на практике приводит к появлению контактно-усталостных раковин не только вблизи краев роликов (см. рис. 2а), но и в их средней части (см. рис. 2б).

Проанализируем причины концентрации напряжений вблизи края ролика. В рассматриваемом случае такой причиной является недостаточная гладкость контура профиля ролика (контура профиля осевого сечения ролика). Так, в зоне сопряжения контура фаски-скругления и прямолинейной образующей цилиндрической поверхности ролика скачком изменяется кривизна линии контура ролика: в пределах фаски эта линия имеет заданную постоянную кривизну, отличную от нуля, а кривизна прямолинейной образующей равна нулю. Отметим, что кривизна кривой пропорциональна второй производной функции, описывающей линию контура. С математической точки зрения линия контура профиля с фаской-скруглением имеет разрыв второй производной указанной функции, что снижает гладкость решения задачи (1)–(3), отыскиваемого в области, ограниченной поверхностью с рассматриваемой линией контура [30]. Из этого следует, что использование более плавных линий контура профиля ролика может привести к существенному снижению уровня интенсивности напряжений вблизи края ролика.

Для проверки сформулированного положения было выполнено моделирование НДС ролика, фаска которого имела в осевом сечении вместо скругления с постоянным радиусом кривизны (см. рис. 9а) форму эллипса с соотношением полуосей 1:10 (см. рис. 9б). Кривизна соответствующего контура осевого сечения ролика изменяется значительно более плавно, чем в рассмотренных выше случаях. Результаты моделирования интенсивности напряжений для ролика с эллиптической формой профиля фаски представлены на рис. 10б. Отметим, что использование более гладкого профиля ролика позволило снизить максимальный уровень интенсивности напряжений значительно (с 2400 до 1100 МПа), чем бомбинирование.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного исследования показали, что применение тел качения с плавно изменяющейся кривизной линии профиля осевого сечения позволяет значительно снизить максимальную величину интенсивности напряжений σ_i вблизи края ролика и соответственно повысить усталостный ресурс его работы. Полученные данные могут быть использованы и для совершенствования формы профиля бомбинированных роликов. При этом существенно, что предложенное сглаживание линии контура профиля осевого сечения ролика позволяет не только разгрузить край ролика, но и снизить контактные давления в его средней части. Напряженно-деформированное состояние ролика при этом становится более равномерным за счет повышения плавности линии контура в зоне края ролика и одновременного снижения степени бомбинирования его цилиндрической поверхности.

Литература

1. Стратегия развития транспортного машиностроения Российской Федерации на период до 2030 года : утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 17.08.2017 г. № 1756-р.
2. Бородин А. В., Иванова Ю. А., Гриц Д. Б. Влияние распределения радиальной нагрузки на ресурс буксового подшипника грузового вагона // Омский научный вестник. 2014. № 2 (130). С. 35–37. ISSN 1813–8225.
3. Невмержицкая Г. В., Шлюшенков А. П. Расчетная оценка надежности подшипника буксы вагона по критерию усталостного выкрашивания // Динамика, прочность и надежность транспортных машин : сборник научных трудов. Брянск, 2002. С. 113–117.
4. Проектирование профиля железнодорожных колес методом равномерного поиска в пространстве радиусов галтельных переходов / Л. Б. Цвик, Е. В. Зеньков, Д. В. Запольский, В. К. Еремеев // Транспорт Урала. 2015. № 3(46). С. 67–70. ISSN 1815–9400.
5. Hassan M., Bruni S. Experimental and numerical investigation of the possibilities for the structural health monitoring of railway axles based on acceleration measurements // Structural health monitoring. 2019. Vol. 18. No. 3. Pp. 902–919. doi: 10.1177/147592171878642.
6. Martua L., Keong Ng A., Sun G. Prediction of rail rolling contact fatigue crack initiation life via three-dimensional finite element analysis // International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT). Singapore, 2018.
7. Dynamic investigation on railway vehicle considering the dynamic effect from the axle box bearings / L. Tao, S. Wei, M. Zhichao, et al. // Advances in mechanical engineering. 2019. Vol. 11. No. 3. doi: 10.1177/1687814019840503.
8. Бородин А. В., Иванова Ю. А., Гриц Д. Б. Буксовый узел грузового вагона с повышенной жесткостью шейки оси // Омский научный вестник. 2016. № 4 (148). С. 5–8. ISSN 1813–8225.
9. Бородин А. В., Кулинич Е. Н., Иванова Ю. А. Усовершенствование роликовой буксы грузового вагона // Известия Транссиба. 2010. № 2. С. 15–20. ISSN 2220–4245.
10. Petrov G., Tarmaev A. Modeling of railway vehicles movement having deviations in the content of running parts // Proceedings of the International Conference Aviamechanical Engineering and Transport (AVENT 2018). Atlantis Press: Series Advances in Engineering Research. 2018. Vol. 158. Pp. 410–415. doi: 10.2991/avent-18.2018.79.
11. Махутов Н. А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. Ч. 1. Новосибирск : Наука, 2005. 494 с.
12. Невмержицкая Г. В., Ольшевский А. А., Сакало В. И. Компьютерное моделирование распределения контактных давлений в подшипнике грузового вагона и оценка его долговечности // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2006. № 2. С. 18–21. ISSN 1810–7206.
13. Томашевский С. Б. Влияние упругопластических деформаций на результаты решения контактных задач железнодорожного транспорта // Вестник БГТУ. 2011. № 3. С. 17–23. ISSN 1999–8775.
14. Томашевский С. Б. Колесная пара — буксовый узел: модели напряжений // Мир транспорта. 2011. № 1. С. 38–42. ISSN 1992–3252.
15. Томашевский С. Б. Уточнение решения контактных задач на примере расчета деталей железнодорожного транспорта // Транспорт Урала. 2011. № 2 (29). С. 66–70. ISSN 1815–9400.

References

1. Strategy of the development of transport mahinery of the Russian Federation for the period up to 2030 [Strategiya razvitiya transportnogo mashinostroeniya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda]: approved by the Order of the Government of the Russian Federation of 17.08.2017 No. 1756-r.
2. Borodin A. V., Ivanova Yu. A, Grits D. B. The influence of distribution of radial load on bearing pedestal resource of wagon [Vliyanie raspredeleniya radial'noy nagruzki na resurs buksovogo podshipnika gruzovogo vagona] // Omsk Scientific Bulletin. 2014. No. 2 (130). Pp. 35–37. ISSN 1813–8225.
3. Nevmerzhitskaya G. V., Shlyushenkov A. P. Reliability assessment of car axle-bearing according to criterion of corrective pitting [Raschetnaya otsenka nadezhnosti podshipnika buksy vagona po kriteriyu ustalostnogo vykrashivaniya] // Dynamics, strength, and reliability of transport machines : collection of scientific papers. Bryansk, 2002. Pp. 113–117.
4. Design of railway wheel profile uniform search in fillet radius space [Proektirovanie profilya zheleznodorozhnykh koles metodom ravnovernogo poiska v prostranstve radiusov galte'nykh perekhodov] / L. B. Tsvik, D. V. Zapolskiy, E. V. Zenkov, V. K. Eremeev // Transport of the Urals. 2015. No. 3(46). Pp. 67–70. ISSN 1815–9400.
5. Hassan M., Bruni S. Experimental and numerical investigation of the possibilities for the structural health monitoring of railway axles based on acceleration measurements // Structural health monitoring. 2019. Vol. 18. No. 3. Pp. 902–919. doi: 10.1177/147592171878642.
6. Martua L., Keong Ng A., Sun G. Prediction of rail rolling contact fatigue crack initiation life via three-dimensional finite element analysis // International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT). Singapore, 2018.
7. Dynamic investigation on railway vehicle considering the dynamic effect from the axle box bearings / L. Tao, S. Wei, M. Zhichao, et al. // Advances in mechanical engineering. 2019. Vol. 11. No. 3. doi: 10.1177/1687814019840503.
8. Borodin A. V., Ivanova Yu. A., Grits D. B. Freight car axle unit with increased rigidity of axis neck [Buksovyy uzel gruzovogo vagona s povyshennoy zhestkost'yu sheyki osi] // Omsk Scientific Bulletin. 2016. No. 4 (148). Pp. 5–8. ISSN 1813–8225.
9. Borodin A. V., Kulnich E. N., Ivanova Yu. A. Improvement of a roller axle box of the freight car [Usovershenstvovanie rolikovoy buksy gruzovogo vagona] // Journal of Transsib Railway Studies. 2010. No. 2. Pp. 15–20. ISSN 2220–4245.
10. Petrov G., Tarmaev A. Modeling of railway vehicles movement having deviations in the content of running parts // Proceedings of the International Conference Aviamechanical Engineering and Transport (AVENT 2018). Atlantis Press: Series Advances in Engineering Research. 2018. Vol. 158. Pp. 410–415. doi: 10.2991/avent-18.2018.79.
11. Makhutov N. A. Structural strength, resource and technogenic safety [Konstruktsionnaya prochnost', resurs i tekhnogennaya bezopasnost']. Part 1. Novosibirsk : Science, 2005. 494 p.
12. Nevmerzhitskaya G. V., Ol'shevskiy A. A., Sakalo V. I. Computer simulation of contact pressure distribution in a freight car bearing and assessment of its durability [Komp'yuternoe modelirovanie raspredeleniya kontaktnykh davleniy v podshipnike gruzovogo vagona i otsenka ego dolgovechnosti] // Herald of computer and information technologies. 2006. No. 2. Pp. 18–21. ISSN 1810–7206.
13. Tomashevskiy S. B. Effect of elastic-plastic deformations on the results of the calculation of contact problems of railway transport [Vliyanie uprugoplasticheskikh deformatsiy na rezul'taty resheniya kontaktnykh zadach zheleznodorozhnogo transporta] // Bulletin of Bryansk State Technical University. 2011. No. 3. Pp. 17–23. ISSN 1999–8775.
14. Tomashevskiy S. B. Wheel pair and axle box: tension models [Kolesnaya para — buksovyy uzel: modeli napryazheniy] // World of Transport and Transportation. 2011. No. 1. Pp. 38–42. ISSN 1992–3252.
15. Tomashevskiy S. B. Decision specification of contact problems by the example of railway transport components calculation [Utochnenie resheniya kontaktnykh zadach na primere rascheta detaley zheleznodorozhnogo transporta] // Transport of the Urals. 2011. No. 2 (29). Pp. 66–70. ISSN 1815–9400.

16. Томашевский С. Б. Численное моделирование упрочнения деталей машин поверхностным пластическим деформированием // Наука и техника транспорта. 2011. № 2. С. 60–68. ISSN 2074–9325.
17. Molodova M., Li Z., Núñez A., Dollevoet R. Validation of a finite element model for axle box acceleration at squats in the high frequency range // Computers & Structures. 2014. Vol. 141. Pp. 84–93.
18. Wang Q., Zhao Y., Wang H. Experiments and characterization of the probabilistic fatigue lives and strength of D 1 railway wheel steel // Journal of Mechanical Engineering. 2014. Vol. 50. No. 14. Pp. 51–55. doi: 10.3901/JME.201414.050.
19. Yang Zh., Deng X., Li Z. Numerical modeling of dynamic frictional rolling contact with an explicit finite element method // Tribology International. 2018. Vol. 11. Pp. 214–231. doi: 10.1016/j.triboint.2018.08.028.
20. An improved complementary ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise and its application to rolling element bearing fault diagnosis / Ch. Yao, W. Zhiwei, Ch. Bingyan, et al. // ISA Transactions. 2019. doi: 10.1016/j.isatra.2019.01.038.
21. ГОСТ 18572–2014. Подшипники качения. Подшипники буксовые роликовые цилиндрические железнодорожного подвижного состава. Технические условия. Москва : Стандартинформ, 2015. 79 с.
22. Классификатор дефектов и повреждений подшипников качения (ЦВТ-22) / ОАО «РЖД». Москва, 2007. 119 с.
23. Партон В.З., Перлин П.И. Методы математической теории упругости. Москва : Наука, 1981. 688 с.
24. Лурье А.И. Теория упругости. Москва : Наука, 1970. 940 с.
25. Мухелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / 5-е издание. Москва : Наука, 1966. 512 с.
26. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. Москва : Наука, 1979. 482 с.
27. Трехмерные задачи математической теории упругости и термоупругости / В.Д. Купрадзе, Т.Г. Гегелиа, М.О. Башелейшвили, Т.В. Бурчуладзе. Москва : Наука, 1976. 664 с.
28. Bathe K-J., Wilson E. L. Numerical methods in finite element analysis. Prentice Hall, 1976. 544 p.
29. ГОСТ 22696–2013. Подшипники качения. Ролики цилиндрические. Технические условия. Москва : Стандартинформ, 2014. 17 с.
30. Владимиров В.С. Уравнения математической физики. Москва : Наука, 1981. 512 с.
16. Tomashevskiy S. B. Numerical modelling of machine parts hardening by surface plastic deformation [Chislennoe modelirovanie uprochneniya detaley mashin poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem] // Science and technology in transport. 2011. No. 2. Pp. 60–68. ISSN 2074–9325.
17. Molodova M., Li Z., Núñez A., Dollevoet R. Validation of a finite element model for axle box acceleration at squats in the high frequency range // Computers & Structures. 2014. Vol. 141. Pp. 84–93.
18. Wang Q., Zhao Y., Wang H. Experiments and characterization of the probabilistic fatigue lives and strength of D 1 railway wheel steel // Journal of Mechanical Engineering. 2014. Vol. 50. No. 14. Pp. 51–55. doi: 10.3901/JME.201414.050.
19. Yang Z., Deng X., Li Z. Numerical modeling of dynamic frictional rolling contact with an explicit finite element method // Tribology International. 2018. Vol. 11. Pp. 214–231. doi: 10.1016/j.triboint.2018.08.028.
20. An improved complementary ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise and its application to rolling element bearing fault diagnosis / Ch. Yao, W. Zhiwei, Ch. Bingyan, et al. // ISA Transactions. 2019. doi: 10.1016/j.isatra.2019.01.038.
21. GOST 18572–2014. Rolling bearings. Axle box cylindrical roller bearings for rolling stock. Specification [Podshipniki kacheniya. Podshipniki buksovye rolikovye tsilindricheskie zhelezнодорожного подвижного состава. Tekhnicheskie usloviya]. Moscow : Standardinform, 2015. 79 p.
22. Classifier of defects and damages of rolling bearings (TsVT-22) [Klassifikator defektov i povrezhdeniy podshipnikov kacheniya (TsVT-22)] / JSC Russian Railways. Moscow, 2007. 119 p.
23. Parton V. Z., Perlin P. I. Methods of the mathematical theory of elasticity [Metody matematicheskoy teorii uprugosti]. Moscow : Science, 1981. 688 p.
24. Lur'e A. I. Theory of elasticity [Teoriya uprugosti]. Moscow : Science, 1970. 940 p.
25. Muskhelishvili N. I. Some basic problems of the mathematical theory of elasticity [Nekotorye osnovnye zadachi matematicheskoy teorii uprugosti] / 5th edition. Moscow : Science, 1966. 512 p.
26. Timoshenko S. P., Gud'er G. Theory of elasticity [Teoriya uprugosti]. Moscow : Science, 1979. 482 p.
27. Three-dimensional problems of the mathematical theory of elasticity and thermoelasticity [Trehmernye zadachi matematicheskoy teorii uprugosti i termouprugosti] / V. D. Kupradze, T. G. Gegelia, M. O. Basheleyshvili, T. V. Burchuladze. Moscow : Science, 1976. 664 p.
28. Bathe K-J., Wilson E. L. Numerical methods in finite element analysis. Prentice Hall, 1976. 544 p.
29. GOST 22696–2013. Rolling bearings. Cylindrical rollers. Specifications [Podshipniki kacheniya. Roliki tsilindricheskie. Tekhnicheskie usloviya]. Moscow : Standardinform, 2014. 17 p.
30. Vladimirov V. S. Equations of mathematical physics [Uravneniya matematicheskoy fiziki]. Moscow : Science, 1981. 512 p.

Объем статьи 1,04 авторских листа

УДК 621.785:629.4.023

Александр Петрович Буйносов, доктор технических наук, профессор кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Альберт Рифович Динисламов, аспирант кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

РАСЧЕТ ТЕПЛООВОГО ПРОЦЕССА ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ СТАЛИ ДЕТАЛЕЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПРИ РЕГЛАМЕНТИРОВАННОМ НАГРЕВЕ РАВНОМЕРНО РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ

Alexander Petrovich Buynosov, DSc in Engineering, Professor, Electric Traction Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Albert Rifovich Dinislamov, postgraduate student, Electric Traction Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Heat process calculation of steel surface hardening of rolling stock mechanical part components in case of regulated heating by evenly distributed sources

Аннотация

Исследуются вопросы упрочнения стали деталей механической части железнодорожного подвижного состава при регламентированном нагреве равномерно распределенными источниками с использованием сканирующего теплового источника, создающего равномерное температурное поле. Разработана математическая модель процесса упрочнения. Ее использование позволит снизить затраты на проведение экспериментов и на создание технологии упрочнения деталей механической части тепловозов и электровозов в ремонтном (сервисном) локомотивном депо на железнодорожном транспорте общего пользования.

Ключевые слова: подвижной состав, механическая часть, деталь, поверхность, упрочнение, нагрев, регламент, равномерно распределенный источник, тепло, процесс, расчет.

Summary

The paper considers the issues of steel hardening of the railway rolling stock mechanical part components in case of the regulated heating by evenly distributed sources with the use of scanning heat source that creates uniform temperature field. The authors have developed a mathematical model of the hardening process of the railway rolling stock component by heat source. The model allows reducing costs on experiments and development of technology for diesel and electric locomotives mechanical part components hardening in repair (service) locomotive depot on the railway transport of public traffic.

Keywords: rolling stock, mechanical part, component, surface, hardening, heating, regulations, evenly distributed source, heat, process, calculation.

DOI: 10.20291/1815-9400-2019-3-28-35

ВВЕДЕНИЕ

Детали механической (экипажной) части железнодорожного подвижного состава (ПС) — это ответственные элементы, от надежной работы которых зависит безопасность перевозочного процесса и эффективность функционирования отрасли. Результаты исследований, проведенных по всей сети железных дорог Российской Федерации, показывают, что детали ПС не обеспечивают заданную ОАО «РЖД» нормативную долговечность, ресурс. Для увеличения жизненного цикла деталей механической части ПС в сервисных локомотивных депо и на ремонтных заводах применяют технологию упрочнения. Использование инновационных технологий (плазменная, лазерная и индукционная закалка током высокой частоты) позволяет получить наилучшие характеристики для динамически нагруженных деталей механической части на всех этапах жизненного цикла ПС [1]. При воздействии плазменной дуги (струи) или при индуктивном нагреве поверхностного слоя на поверхности детали ПС протекают структурные изменения с появлением более твердой мартенситной структуры. Импульсная лазерная обработка неподвижным точечным строчно-сканирующим источником используется для упрочнения различных деталей механической части локомотивов из углеродистых сталей [2–4].

В Уральском государственном университете путей сообщения накоплен большой статистический материал по использованию плазменной закалки [1, 5–7], однако математическая модель процесса нагрева строчно-сканирующим источником тепла отсутствует. Разработанные и применяемые в настоящее время математические модели описывают в основном процессы упрочнения с образованием пиков проплавления поверхности детали [8, 9].

Использование математической модели процесса нагрева деталей ПС тепловым строчно-сканирующим источником позволит сократить временные и экономические затраты на проведение комплекса экспериментов и создать оптимальную технологию упрочнения.

ВЫБОР МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Строчно-сканирующие источники имеют одномерное нормальное распределение энергии, которое можно привести к равномерному распределению [10]. В [11] при описании процесса упрочнения и использования импульсной термообработки сделан вывод о возможном решении одномерной задачи теплопроводности, которое применяется для нагрева и охлаждения полосовым тепловым источником под действием одиночного импульса прямоугольной формы. Такое утверждение является аподиктическим по отношению к обработке всей поверхности детали, когда распределение температуры по всей площади близко к равномерному, что доказывают результаты экспериментов [12, 13]. Однако авторы работы [11] решение полученного интегрального уравнения свели к вычислению стохастических безразмерных переменных.

При определении температуры нагрева детали можно использовать известное уравнение для мгновенного плоского источника теплоты [1, 14]:

$$T = \frac{Q}{c\gamma\sqrt{4at}} \cdot e^{-\frac{z^2}{4at}}, \quad (1)$$

где Q — плотность энергии, Дж/см²;
 c — удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С);
 γ — плотность стали, из которой изготовлена деталь ПС, кг/см³;
 a — коэффициент температуропроводности, характеризующий скорость распространения температурного поля в стали, см²/с;
 t — время процесса распространения тепла в глубину детали ПС, с;

z — глубина от поверхности детали ПС, см.

В [10] приведено условие использования уравнения (1) для других источников теплоты:

$$\frac{V \cdot \delta}{4 \cdot a} > 2,$$

где V — скорость движения теплового источника, см/с;

δ — толщина (длина) детали, см.

При рассмотрении упрочнения деталей ПС, например валика рессорного подвешивания ТЭМ2У.35.30.102–01 (материал — сталь 45) локомотивов, тепловым строчно-сканирующим источником ($V = 1,3$ см/с; $\delta = 10$ см; $a = 0,9$ см²/с [1, 2, 15]) это условие выполняется ($\frac{V \cdot \delta}{4 \cdot a} = 3,611$). Следовательно, уравнение (1) можно использовать в нашем случае.

Это же уравнение можно применить для более глубоких слоев детали при упрочнении строчно-сканирующим источ-

ником нагрева валика рессорного подвешивания. Скорость строчно-сканирующего источника (0,7–1,9 см/с) значительно превышает обычную скорость сварки. Это позволяет использовать схему быстро движущегося источника [1, 16]. Кроме того, при нагреве детали строчно-сканирующим источником отток тепла в окружающую среду можно не учитывать, так как он не превышает 2 % [15].

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛИ

Обозначим тепловой поток через q , а время действия теплового строчно-сканирующего источника как t_0 . Причем $q = \eta \cdot N/S$ [1], где η — коэффициент полезного действия теплового источника; N — мощность источника, Вт; S — нагреваемая площадь детали ПС, см².

Мощность теплового источника можно определить как $N = U \cdot I$, где U — напряжение, В; I — ток плазменной дуги с электромагнитными колебаниями, А, движущийся со скоростью V , см/с. Нагреваемая площадь может быть выражена как $S = b \cdot d$, где b — ширина колебаний дуги, см; d — эффективный диаметр дуги, см. Время действия теплового источника $t_0 = d/V$ [1].

Тепловой поток q обеспечивается во время действия источника нагрева. В конкретный момент времени t за период dt' выделяется энергия $dQ = q \cdot dt'$ (рис. 1).

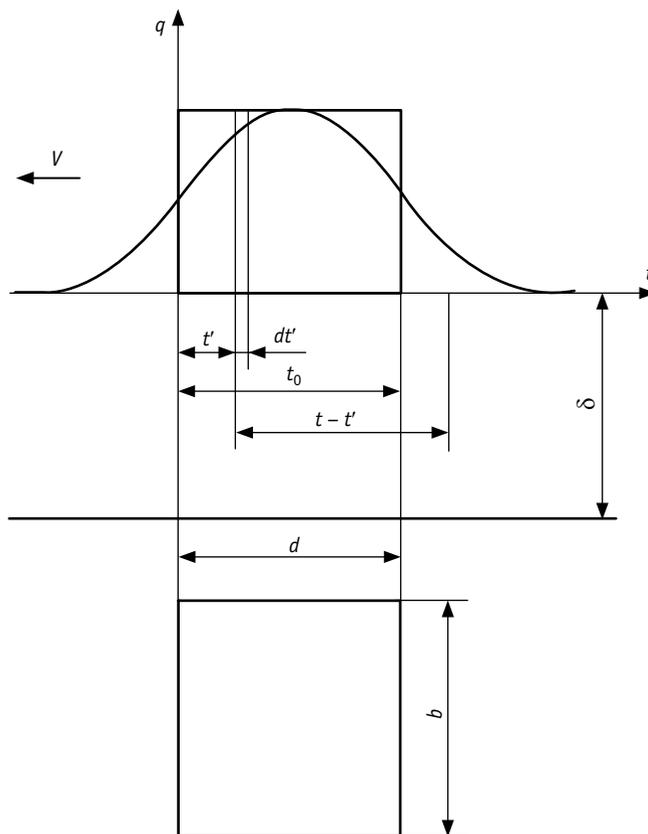


Рис. 1. Схема нагрева одномерно нормально распределенным тепловым источником

Тогда, учитывая dQ и уравнение (1), выражение для приращения температуры можем записать в виде

$$dT = \frac{q \cdot dt'}{c\gamma\sqrt{\pi a} \cdot (t-t')} \cdot e^{-\frac{z^2}{4a(t-t')}} \quad (2)$$

или

$$T - T_0 = \frac{q}{c\gamma\sqrt{\pi a}} \int_0^B \frac{dt'}{\sqrt{t-t'}} \cdot e^{-\frac{z^2}{4a(t-t')}} \quad (3)$$

где T_0 — исходная температура (температура предварительного подогрева), °С;

t' — время, отсчитываемое от момента включения строчно-сканирующего источника тепла, с.

На поверхности детали ($z = 0$) температура достигает максимального значения T_m в момент прекращения действия строчно-сканирующего источника тепла ($t = t_0$). После интегрирования (3) получим выражение для определения T_m :

$$T_m - T_0 = \frac{2q}{c\gamma} \cdot \sqrt{\frac{t_0}{\pi a}} \quad (4)$$

На основе введенных нами безразмерных относительных параметров (время $\tau = t/t_0$, время действия теплового строчно-сканирующего источника $\tau' = t'/t_0$, глубина упрочнения детали $Z = z/(4a \cdot t_0)^{1/2}$, температура нагрева детали $\theta = \frac{T - T_0}{T_m - T_0}$) можно значительно упростить решение задачи определения оптимальных параметров упрочнения стали деталей ПС. Тогда уравнение (3) для относительной температуры нагрева детали при упрочнении запишем как

$$\theta = \frac{1}{2} \int_0^B \frac{d\tau'}{\sqrt{\tau - \tau'}} \cdot e^{-\frac{Z^2}{\tau - \tau'}} \quad (5)$$

В интегральном уравнении (5) $B = \tau$ при $\tau < 1$ и $B = 1$ при $\tau \geq 1$. При упрочнении только поверхностного слоя детали (когда $Z = 0$) уравнение (5) примет вид

$$\theta = \sqrt{\tau} - \sqrt{\tau - 1} \quad (6)$$

и

$$\theta = \sqrt{\tau} \quad \text{для } \tau < 1. \quad (7)$$

На основании выполненных расчетов по уравнениям (5)–(7) получены зависимости (рис. 2) относительных величин температуры θ от времени τ на поверхности детали и на различной ее глубине.

Необходимо отметить, что для строчно-сканирующего теплового источника время удобнее отсчитывать не с начала его действия, а, наоборот, с того момента, когда на поверхности детали температура достигает максимального значения. Тогда уравнения (5)–(7) можно переписать:

внутри детали

$$\theta = \frac{1}{2} \int_0^1 \frac{dt'}{\sqrt{\tau + t'}} \cdot e^{-\frac{Z^2}{\tau + t'}}; \quad (8)$$

на поверхности детали

$$\theta = \sqrt{\tau + 1} - \sqrt{\tau}, \quad (9)$$

$$\tau = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{1}{\theta} - \theta \right)^2. \quad (10)$$

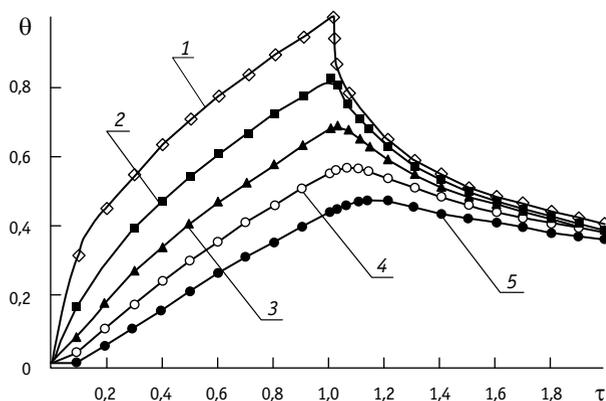


Рис. 2. Зависимости температуры от времени при различной глубине упрочненного слоя детали: 1 — на поверхности; 2–5 — на глубине 1, 2, 3 и 4 мм соответственно

Чтобы определить время в прежней системе координат, необходимо прибавить единицу к относительной величине времени τ . Большое значение имеет время нахождения металла детали в высокотемпературном градиентированном кодификационном уровне (в аустенитном уровне) t_a [1, 10]. Такое время для точек на поверхности детали можно найти следующим образом:

$$\tau_a = \frac{t_a}{t_0} = \frac{1}{4} \cdot \left(2 + \frac{1}{\theta_a^2} - 3 \cdot \theta_a^2 \right), \quad (11)$$

где $\theta_a = \frac{T_a - T_0}{T_m - T_0}$.

Анализ выражений (9)–(11) позволяет утверждать, что параметры процесса упрочнения (нагрева поверхности детали при равномерно распределенном строчно-сканирующем источнике) определяются довольно просто. Решая численными методами уравнение (9), можем вычислить относительную температуру нагрева внутренних (подповерхностных) слоев детали ПС.

Время τ_m , необходимое для достижения максимальной температуры θ_m на глубине упрочнения Z , определим, приравняв производную по τ к нулю [1]:

$$\tau_m = 2 \cdot Z^2 \frac{\int_0^1 \frac{\tau' d\tau'}{\sqrt{(\tau_m + \tau')^5}} \cdot e^{-\frac{Z^2}{\tau_m + \tau'}}}{\int_0^1 \frac{d\tau'}{\sqrt{(\tau_m + \tau')^5}} \cdot e^{-\frac{Z^2}{\tau_m + \tau'}}}. \quad (12)$$

После подстановки итерационного уравнения для τ_m в уравнение (8) находим θ_m . Безразмерная относительная глубина упрочнения детали Z должна быть ограничена значением 0,4 [4]. На основании расчетов по уравнениям (8) и (12) (табл. 1) построены зависимости относительных значений времени τ_m (рис. 3) и максимальной температуры θ_m (рис. 4) от глубины упрочненного слоя Z .

Таблица 1

Время и максимальная температура в зависимости от глубины упрочнения детали

Z	τ_m	θ_m
0	0	1
0,05	0	0,914
0,10	0,004	0,834
0,20	0,019	0,692
0,30	0,059	0,574
0,40	0,131	0,479

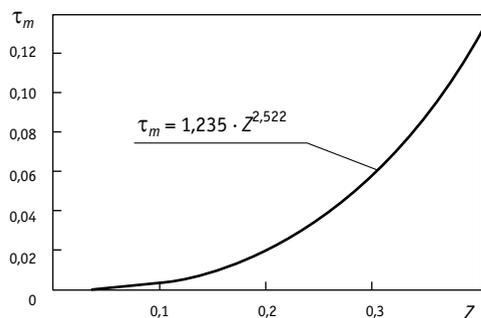


Рис. 3. Зависимость времени достижения максимальной температуры от глубины упрочненного слоя детали

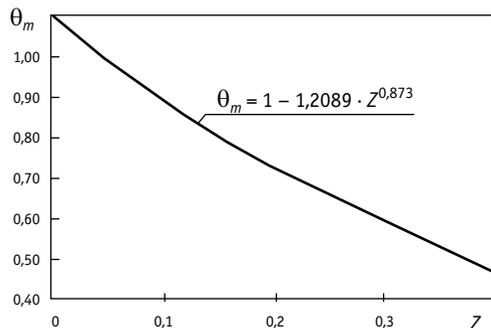


Рис. 4. Зависимость максимальной температуры от глубины упрочненного слоя детали

Полученные зависимости аппроксимированы степенной функцией вида $Y = a \cdot X^b$. Коэффициенты a и b определены по методу наименьших квадратов. Аппроксимирующие функции: для $\tau_m(Z)$

$$\tau_m = 1,235 \cdot Z^{2,522};$$

для $\theta_m(Z)$

$$\theta_m = 1 - 1,2089 \cdot Z^{0,873}.$$

В [2, 3] для стали 45 глубину упрочнения ограничивали изотермой 850 °С (температура нахождения металла детали в аустенитном уровне), а в [5] было доказано, что эта температура должна быть 880 °С. Тогда $\theta_m = \frac{880}{T_m}$.

Относительное время τ_m для достижения максимальной глубины нагрева строчно-сканирующим источником Z_m при $T_0 = 850$ °С и температура нагрева (T_m изменяется от 850 до 1150 °С с градацией 50 °С) поверхности деталей при упрочнении приведены в табл. 2.

Таблица 2

Глубина упрочнения, время и максимальная глубина нагрева в зависимости от температуры нагрева поверхности детали

$T_m, ^\circ\text{C}$	$\theta_m = 880/T_m$	τ_m	Z_m
800	1,100	0	0,009
850	1,035	0	0,029
900	0,978	0,002	0,081
950	0,926	0,006	0,128
1000	0,880	0,013	0,171
1050	0,838	0,023	0,210
1100	0,800	0,035	0,247
1150	0,765	0,049	0,281

По результатам расчетов (см. табл. 2) построены зависимости $\tau_m(T_m)$ (рис. 5) и $Z_m(T_m)$ (рис. 6).

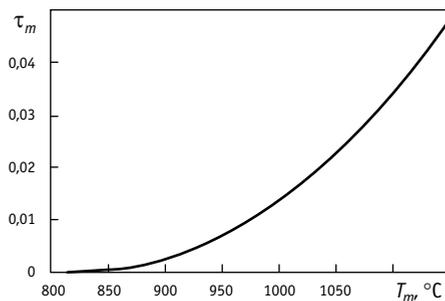


Рис. 5. Зависимость относительного времени упрочнения от максимальной температуры нагрева поверхности детали

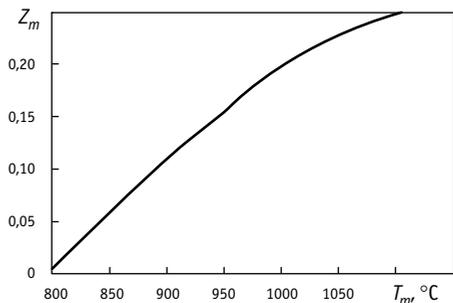


Рис. 6. Зависимость относительной глубины упрочненного слоя от максимальной температуры нагрева поверхности детали

Из анализа расчетных данных (см. табл. 2) и зависимости $Z_m(T_m)$ (см. рис. 6) видно, что уменьшение температуры нагрева поверхности детали ПС с 1150 до 850 °С приводит к снижению глубины прогрева валика рессорного подвешивания (более чем в 9 раз). Поддержание оптимальной температуры поверхности детали является наиважнейшим условием качественного процесса ее упрочнения.

На основе данных табл. 1 и 2 методами регрессионного анализа [17] получено уравнение для расчета глубины упрочненного слоя детали (при коэффициенте корреляции $R_{ZT} = 0,998$) [18]

$$Z_m = 0,7838 \cdot (1 - \theta)^{1,149}, \quad (13)$$

при использовании которого относительная ошибка не превысит 1 % в наиболее распространенном диапазоне относительной глубины упрочненного слоя детали механической части ПС ($Z = 0,02-0,30$), т.е. ее абсолютная величина не будет выше 0,008.

Выражение для реальной (необходимой) глубины упрочненного слоя металла детали ПС будет иметь вид

$$z = Z \cdot \sqrt{4at_0} = Z \cdot \sqrt{\frac{4ad}{V}}, \quad (14)$$

где $Z = 0,7838 \cdot (1 - \theta_m)^{1,149}$; $\theta_m = \frac{T_a - T_0}{T_m - T_0}$;

$$T_m - T_0 = \frac{2\eta UI}{c\gamma b \cdot \sqrt{\pi adV}}.$$

Значения постоянных коэффициентов ($c\gamma$ и ad) рассчитываются на основе обработки полученного массива экспериментальных данных [1, 6] с использованием метода математико-статистического анализа. Статистические данные получены при проведении экспериментов по определению реальной глубины упрочнения z при максимальной температуре нагрева поверхности детали T_m . Исходя из критерия наибольшей точности расчетов значения коэффициентов $c\gamma$ и ad можно определить как

$$c\gamma = \frac{4\eta UI}{\sqrt{\pi} \cdot bV \cdot (T_m - T_0) \cdot (z/Z)}; \quad (15)$$

$$ad = \frac{V}{4} \cdot (z/Z^2). \quad (16)$$

В [3] при анализе процессов упрочнения валика рессорного подвешивания ТЭМ2У.35.30.102-01 локомотива анализируется время охлаждения ($t_{8/5} = \psi$) специальной жидкостью в диапазоне температур от 800 до 500 °С. В этой же статье рассчитывается средняя скорость охлаждения детали от 600 до 500 °С.

Выражения для расчета времени ψ и скорости W_{500} при регламентированной температуре нагрева детали 500 °С можно получить из следующих соображений, приведенных ниже.

Безразмерная скорость охлаждения W на поверхности детали при $\theta = \sqrt{\tau+1} - \sqrt{\tau}$, $\tau = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{1}{\theta} - \theta \right)$ составляет

$$W = \frac{d\theta}{d\tau} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{\tau+1}} - \frac{1}{\sqrt{\tau}} \right), \quad (17)$$

а фактическая скорость охлаждения

$$w = \frac{dT}{dt} = \frac{(T_m - T_0)}{t_0} \cdot \frac{d\theta}{d\tau} = \frac{(T_m - T_0)}{t_0} \cdot W. \quad (18)$$

Тогда $\psi = t_0 \cdot \psi_0$,

$$\psi_0 = \frac{1}{4} \cdot \left[\left(\frac{1}{\theta_{500}} - \theta_{500} \right)^2 - \left(\frac{1}{\theta_{800}} - \theta_{800} \right)^2 \right]; \quad (19)$$

$$\theta_{500} = \frac{500 - T_0}{T_m - T_0}; \quad (20)$$

$$\theta_{800} = \frac{800 - T_0}{T_m - T_0}; \quad (21)$$

$$w_{500} = \frac{T_m - T_0}{t_0} \cdot W_{500}; \quad (22)$$

$$W_{500} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{\tau_{500}}} - \frac{1}{\sqrt{\tau_{500} + 1}} \right). \quad (23)$$

Безразмерные относительные параметры на различной глубине упрочнения детали ПС определяются следующим образом: время охлаждения детали

$$\psi_0 = \tau_{500} - \tau_{800}^*;$$

скорость охлаждения

$$W_{500} = \frac{d\theta}{d\tau} = \frac{1}{4} \cdot \int_0^1 \frac{[2Z^2 - (\tau\theta_{500} + \tau')] d\tau'}{\sqrt{(\tau_{500} + \tau')^5}} \cdot e^{-\frac{Z^2}{\tau_{500} + \tau'}}. \quad (24)$$

* τ_{500} и τ_{800} вычисляются по уравнению (8).

Результаты расчета ψ_0 и W_{500} в зависимости от максимальной температуры нагрева поверхности детали T_m при $T_a = 950$ и $T_0 = 0$ °С приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчета ψ_0 и W_{500} в зависимости от максимальной температуры нагрева поверхности детали

T_m , °С	τ_{500}	τ_{800}	На глубине		На поверхности	
			ψ_0	W_{500}	ψ_0	W_{500}
800	0,561	0,049	0,512	0,366	0,512	0,366
850	0,748	0,091	0,657	0,266	0,657	0,267
900	0,950	0,139	0,811	0,201	0,809	0,201
950	1,167	0,192	0,976	0,156	0,972	0,157
1000	1,401	0,250	1,537	0,124	1,144	0,124
1150	1,652	0,314	1,338	0,100	1,327	0,100
1200	1,920	0,384	1,537	0,082	1,522	0,082

По данным табл. 3 построены зависимости относительных величин времени охлаждения в интервале температур 800–500 °С (рис. 7) и скорости охлаждения W при температуре 500 °С (рис. 8) от максимальной температуры нагрева поверхности детали при упрочнении.

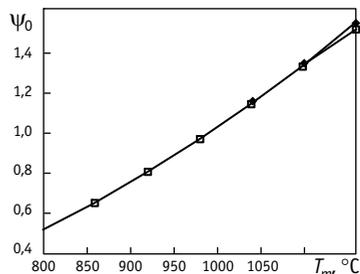


Рис. 7. Зависимость относительного времени охлаждения детали от максимальной температуры нагрева: \blacklozenge — на глубине; \blacksquare — на поверхности

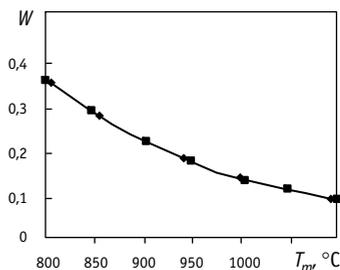


Рис. 8. Зависимость относительной скорости охлаждения детали от максимальной температуры нагрева: \blacklozenge — на глубине; \blacksquare — на поверхности

Как видно из рис. 7 и 8, при любых температурах нагрева сточно-сканирующим источником поверхность и внутренние слои детали механической части ПС охлаждаются одинаково.

СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

Рассмотрим еще одну деталь механической части ПС — бандаж колесной пары. После обточки на станке без выкатки колесных пар бандажи подвергаются плазменному упрочнению. В сервисных локомотивных депо при упрочнении бандажей плазменной дугой в азоте максимальная температура нагрева поверхности детали близка к температуре плавления (1500 °С) [19], при этом толщина упрочненного слоя z не превышает 0,20 см.

В диапазоне температуры охлаждения от 800 до 500 °С время $\psi \approx 2$ (при значениях $\theta_{500} = 0,333$ и $\theta_{800} = 0,533$). Относительное время охлаждения при снижении температуры с 1500 до 550 °С составляет $\psi_{550} = 1,393$ (при $\theta_{550} = 0,367$). Скорость охлаждения при температуре 550 °С равна $w_{550} = 102$ °С/с.

Для расчета процесса упрочнения бандажей воспользуемся результатами экспериментов [9, 20]: величиной максимальной температуры T_1 , измеренной термопарой на глубине бандажа z_1 , и глубиной упрочнения z_2 , определенной по металлографическим шлифам. В [12, 19] указывается, что максимальная температура на глубине упрочненного слоя $T_2 = T_a = 950$ °С. При проведении эксперимента ток и напряжение плазменной дуги были постоянными, амплитуда колебаний плазменной дуги и скорость перемещения плазматрона изменялись. Поэтому диаметр дуги d будет неизменным. Значения η и b взяты из [6, 19].

Глубина упрочнения z_1 отличалась от z_2 . Поэтому на основе полученной информации [19] можно записать (при $i = 1, 2$)

$$Z_i = 0,784 \cdot (1 - \theta_i)^{1,149}, \quad (25)$$

где $Z_i = z_i / (4 \cdot ad / V)^{1/2}$; $\theta_i = T_i / T_m$ и определить значения температуры T_m и коэффициентов ad и $c\gamma$ (табл. 4).

Таблица 4

Результаты выполненного эксперимента

№ п/п	z_1 , см	T_1 , °С	z_2 , см	V , см/с	h	b , см	T_m , °С	$c\gamma$, Дж/(см ³ ·°С)	ad , см ³ /с
1	0,10	730	0,05	2,94	0,45	3,71	1216	5,246	0,098
2	0,10	730	0,05	2,94	0,45	3,71	1216	5,246	0,098
3	0,10	730	0,05	2,94	0,45	3,71	1216	5,246	0,098
4	0,10	1300	0,15	1,70	0,45	3,72	2127	5,026	0,061
5	0,15	540	0,05	2,94	0,45	3,70	1206	5,113	0,105
6	0,15	540	0,05	2,94	0,45	3,70	1206	5,113	0,105
7	0,15	1150	0,20	1,70	0,51	3,11	1853	5,057	0,144
8	0,15	720	0,10	1,70	0,45	3,72	1493	6,633	0,071

Разброс значений ad объясняется оплавлением бандажа [18]. Учитывая только средние значения $c\gamma = 5,415$ Дж/(см³·°С) и $ad = 0,096$ см³/с, рассчитаем глубину упрочнения (табл. 5).

Таблица 5

Сравнение расчетных и экспериментальных данных

№ п/п	$V, \text{ см/с}$	η	$b, \text{ см}$	$T_{\text{пр}}, \text{ }^\circ\text{C}$	Глубина упрочнения $z, \text{ см}$	
					по расчету	по эксперименту
1	2,94	0,45	3,7	1193	0,05	0,05
2	4,80	0,61	2,0	2342	0,12	0,10
3	2,94	0,45	3,7	1193	0,05	0,05
4	1,70	0,45	3,7	1569	0,13	0,15
5	2,94	0,45	3,7	1193	0,05	0,05
6	4,00	0,61	2,0	2566	0,14	0,15
7	1,70	0,51	3,1	2123	0,19	0,20
8	1,70	0,45	3,7	1569	0,13	0,10

$I = 200 \text{ A}, U = 125 \text{ V}, T_a = 950 \text{ }^\circ\text{C}$

Как видно из табл. 5, экспериментальные значения глубины упрочненного слоя практически совпадают с расчетными.

Результаты расчетов по модели и выполненных экспериментов будут использованы при разработке технологии упрочнения деталей механической части ПС.

ВЫВОДЫ

1. Упрочнение деталей железнодорожного подвижного состава из стали при термообработке регламентируется в основном двумя параметрами — временем нагрева и максимальной температурой нагрева поверхности.

2. Показано, что в критическом интервале температур время и скорость охлаждения упрочненного слоя и поверхности детали подвижного состава совпадают, что позволяет проводить расчеты с использованием более простых выражений, полученных для поверхности.

3. Для увеличения глубины упрочненного слоя необходимо сократить время нагрева поверхности детали и увеличить температуру нагрева поверхности до значения, близкого к температуре плавления.

4. Полученные формулы позволяют рассчитывать режим упрочнения, а при наличии экспериментальных данных по глубине упрочнения и температуре нагрева — определять параметры процесса.

Литература

- Буйносов А. П., Шепелева И. О. Моделирование упрочнения стали бандажей при термообработке колесных пар электровазозов // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 2. С. 86–89. ISSN 2079–5920.
- Буйносов А. П., Волков Д. В., Динисламов А. Р. Неразрушающий метод контроля глубины поверхностной закалки деталей механической части локомотивов как альтернатива разрушающим способам // Транспорт Урала. 2018. № 1 (56). С. 26–29. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-1-26-29. ISSN 1815–9400.
- Буйносов А. П., Динисламов А. Р. Уменьшения погрешности измерения глубины поверхностного термоупрочнения деталей локомотивов неразрушающим ультразвуковым методом // Вестник транспорта Поволжья. 2018. № 1. С. 7–11. ISSN 1997–0722.
- Буйносов А. П., Волков Д. В., Динисламов А. Р. Ультразвуковой неразрушающий метод контроля глубины поверхностной закалки деталей механической части подвижного состава // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2018. № 1. С. 104–108. ISSN 2071–3827.
- Коротков В. А., Трошин О. В., Бердников А. А. Плазменная закалка сканируемой дугой без оплавления поверхности // Физика и химия обработки материалов. 1995. № 2. С. 101–106. ISSN 0015–3214.
- Буйносов А. П., Шепелева И. О. Модель теплового процесса упрочнения стали бандажей колесных пар электровазозов при нагреве равномерно распределенными источниками // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2014. № 4. С. 150–157. ISSN 2071–3827.
- Буйносов А. П., Динисламов А. Р. Выбор метода неразрушающего контроля термоупрочненных деталей механической части электровазозов // Научно-технический вестник Поволжья. 2017. № 1. С. 50–52. ISSN 2079–5920.

References

- Buynosov A. P., Shepeleva I. O. Modeling hardened steel bandage during the heat treatment of wheelsets electric locomotives [Modelirovaniye uprochneniya stali bandazhey pri termoobrabotke kolesnykh par elektrovozov] // Scientific and Technical Volga region Bulletin. 2015. No. 2. Pp. 86–89. ISSN 2079–5920.
- Buynosov, A. P., Volkov D. V., Dinislamov A. R. Nondestructive control method of depth of surface tempering of details of mechanical part of locomotives as the alternative to the destroying ways [Nerazrushayushhiy metod kontrolya glubiny poverkhnostnoy zakalki detaley mekhanicheskoy chasti lokomotivov kak al'ternativa razrushayushhim sposobam] // Transport of the Urals. 2018. No. 1 (56). Pp. 26–29. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-1-26-29. ISSN 1815–9400.
- Buynosov A. P., Dinislamov A. R. Reduction of the measurement error of depth of surface thermohardening of parts of locomotives by the nondestructive ultrasonic method [Umen'sheniya pogreshnosti izmereniya glubiny poverkhnostnogo termouprochneniya detaley lokomotivov nerazrushayushhim ul'trazvukovym metodom] // Bulletin of transport of the Volga region. 2018. No. 1. Pp. 7–11. ISSN 1997–0722.
- Buynosov A. P., Volkov D. V., Dinislamov A. R. Ultrasonic nondestructive control method of depth of surface tempering of details of mechanical part of rolling stock [Ul'trazvukovoy nerazrushayushhiy metod kontrolya glubiny poverkhnostnoy zakalki detaley mekhanicheskoy chasti podvizhnogo sostava] // Scientific problems of transport in Siberia and the Far East. 2018. No. 1. Pp. 104–108. ISSN 2071–3827.
- Korotkov V. A., Troshin O. V., Berdnikov A. A. Plasma hardening by scanned arc without surface melting [Plazmennaya zakalka skaniruemyy dugoy bez oplavleniya poverkhnosti] // Physics and Chemistry of Materials Treatment. 1995. No. 2. Pp. 101–106. ISSN 0015–3214.
- Buynosov A. P., Shepeleva I. O. Model of thermal process of hardening of steel of bandages of wheelpairs of electric locomotives when heating by evenly distributed sources [Model' teplovogo protsessa uprochneniya stali bandazhey kolesnykh par elektrovozov pri nagreve ravnomerno raspredelennymi istochnikami] // Scientific problems of transport in Siberia and the Far East. 2014. No. 4. Pp. 150–157. ISSN 2071–3827.
- Buynosov A. P., Dinislamov A. R. The choice of the method of nondestructive control of the thermostrengthened details of the mechanical part of electric locomotives [Vybor metoda nerazrushayushhego kontrolya termouprochnen-

8. Буйносов А. П., Денисов Д. С. О разработке прибора неразрушающего метода контроля бандажей колесных пар локомотивов // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 4. С. 69–72. ISSN 2079–5920.
9. Плазменное термоупрочнение сталей / А. М. Лыков, В. Т. Почаев, Ю. Г. Редькин, В. С. Куминов // Физика и химия обработки материалов. 1997. № 3. С. 27–32. ISSN 0015–3214.
10. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. Москва : Машгиз, 1951. 296 с.
11. Шоршоров М. Х., Барашков А. С. К оценке эффективного радиуса подвижного нормально-кругового источника на поверхности плоского слоя по ширине зоны проплавления // Сварочное производство. 1990. № 2. С. 40–42. ISSN 0491–6441.
12. Домбровский Ю. М. Кинетика нагрева стали сканируемой воздушно-плазменной дугой // Сварочное производство. 1998. № 11. С. 15–18. ISSN 0491–6441.
13. Буйносов А. П., Шепелева И. О. Увеличение ресурса колесных пар электровозов за счет плазменного упрочнения гребней бандажей // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. № 6. С. 182–185. ISSN 2079–5920.
14. Домбровский Ю. М., Бровер А. В. Обработка стали воздушно-плазменной дугой со сканированием // Металловедение и термическая обработка металлов. 1999. № 1. С. 10–13. ISSN 0026–0819.
15. Рыкалин Н. Н., Углов А. А., Зувев И. В. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов. Москва : Машиностроение, 1985. 496 с.
16. Рыкалин Н. Н., Зувев И. В., Углов А. А. Основы электронно-лучевой обработки материалов. Москва : Машиностроение, 1978. 239 с.
17. Шторм Р. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества. Москва : Мир, 1970. 360 с.
18. Буйносов А. П. Основные причины интенсивного износа бандажей колесных пар подвижного состава и методы их устранения : монография. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2009. 224 с.
19. Кузьмина Г. Д. Дилатометрические характеристики и диаграммы анизотермического распада аустенита колесной стали марки 2 // Сварочное производство. 1997. № 12. С. 3–5. ISSN 0491–6441.
20. Буйносов А. П., Шепелева И. О. Сравнение результатов, полученных на модели теплового процесса упрочнения стали бандажей колесных пар электровозов, с экспериментами // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 6. С. 91–93. ISSN 2079–5920.
- nykh detaley mekhanicheskoy chasti elektrovozov] // Scientific and Technical Volga region Bulletin. 2017. No. 1. Pp. 50–52. ISSN 2079–5920.
8. Buinosov A. P., Denisov D. S. About development of the device of the nondestructive control method of bandages of wheelpairs of locomotives [O razrabotke pribora nerazrushayushhego metoda kontrolya bandazhey kolesnykh par lokomotivov] // Scientific and Technical Volga region Bulletin. 2014. No. 4. Pp. 69–72. ISSN 2079–5920.
9. Plasma arc thermohardening of steels [Plazmennoe termouprochnenie staley] / A. M. Lykov, V. T. Pochevayev, Yu. G. Red'kin, V. S. Kuminov // Physics and Chemistry of Materials Treatment. 1997. No. 3. Pp. 27–32. ISSN 0015–3214.
10. Rykalin N. N. Calculation of heat processes in welding [Raschety teplovykh protsessov pri svarke]. Moscow : Mashgiz, 1951. 296 p.
11. Shorshorov M. Kh., Barashkov A. S. To assessment of efficient radius of moving normal-circular source on flat layer surface along width of penetration zone [K otsenke effektivnogo radiusa podvizhnogo normal'no-krugovogo istochnika na poverkhnosti ploskogo sloya po shirine zony proplavleniya] // Welding Production. 1990. No. 2. Pp. 40–42. ISSN 0491–6441.
12. Dombrovskiy Yu. M. Kinetics of steel heating by scanned air plasma arc [Kinetyka nagreva stali skaniruemyoy vozduzhno-plazmennoy dugoy] // Welding Production. 1998. No. 11. Pp. 15–18. ISSN 0491–6441.
13. Buinosov A. P., Shepeleva I. O. Increase in the resource of wheel couples of electric locomotives at the expense of plasma hardening of crests of bandages [Uvelichenie resursa kolesnykh par elektrovozov za schet plazmenno-go uprochneniya grebney bandazhey] // Scientific and Technical Volga region Bulletin. 2013. No. 6. Pp. 182–185. ISSN 2079–5920.
14. Dombrovskii Yu. M., Brover A. V. Treatment of steel by an air-plasma arc with scanning [Obработка stali vozduzhno-plazmennoy dugoy so skanirvaniem] // Metal Science and Heat Treatment. 1999. No. 1. Pp. 10–13. ISSN 0026–0819.
15. Rykalin N. N., Uglov A. A., Zuev I. V. Laser and electron-beam processing of materials [Lazernaya i elektronno-luchevaya obrabotka materialov]. Moscow : Mashinostroenie, 1985. 496 p.
16. Rykalin N. N., Zuev I. V., Uglov A. A. Basics of electron-beam processing of materials [Osnovy elektronno-luchevoy obrabotki materialov]. Moscow : Mashinostroenie, 1978. 239 p.
17. Storm R. Probability theory. Mathematical statistics. Statistical quality control [Teoriya veroyatnostey. Matematicheskaya statistika. Statisticheskii kontrol' kachestva]. Moscow : World, 1970. 360 p.
18. Buynosov A. P. The main reasons for the intensive wear bandages wheelset rolling stock and troubleshooting [Osnovnye prichiny intensivnogo iznosa bandazhey kolesnykh par podvizhnogo sostava i metody ikh ustraneniya] : monograph. Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2009. 224 p.
19. Kuzmina G. D. Dilatometric characteristics and diagrams of austenite anisothermal decomposition of grade 2 wheel steel [Dilatometricheskie kharakteristiki i diagrammy anizotermicheskogo raspada austenita kolesnoy stali marki 2] // Welding Production. 1997. No. 12. Pp. 3–5. ISSN 0491–6441.
20. Buinosov A. P., Shepeleva I. O. Comparison of results of the bandages of wheelpairs of electric locomotives received on model of thermal process of hardening of steel with experiments [Sravnenie rezul'tatov, poluchennykh na modeli teplovogo protsessu uprochneniya stali bandazhey kolesnykh par elektrovozov, s eksperimentami] // Scientific and Technical Volga region Bulletin. 2014. No. 6. Pp. 91–93. ISSN 2079–5920.

Объем статьи 0,8 авторских листа

УДК 629.4.027

Александр Анатольевич Миронов, доктор технических наук, генеральный директор ООО «Инфотэкс АТ», Екатеринбург, Россия,

Дмитрий Николаевич Салтыков, кандидат технических наук, ведущий инженер ООО «Инфотэкс АТ», Екатеринбург, Россия,

Александр Эдуардович Павлюков, доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Павел Игоревич Шалупина, аспирант кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ КОЛЕС ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Alexander Anatolyevich Mironov, DSc in Engineering, General Director of LLC «Infotecs AT», Ekaterinburg, Russia,

Dmitriy Nikolaevich Saltykov, PhD in Engineering, Senior Engineer, LLC «Infotecs AT», Ekaterinburg, Russia,

Alexander Eduardovich Pavlyukov, DSc in Engineering, Professor, Railway Cars Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Pavel Igorevich Shalupina, postgraduate student, Railway Cars Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Diagnostic model for thermal control of rolling stock wheels

Аннотация

Сегодня стандартами безопасности, принятыми в развитых странах мира, предусмотрено применение систем теплового контроля ходовых частей подвижного состава на основе инфракрасных детекторов нагрева. В статье рассмотрены вопросы, связанные с разработкой и использованием комплексной диагностической модели теплового контроля колес железнодорожного подвижного состава посредством методов математического (аналитического и численного) моделирования. Получаемые с помощью предлагаемой модели данные в виде осциллограмм электрического сигнала приемного устройства позволяют обосновать рациональные углы ориентации ИК-оптики на колесо и выбрать наиболее информативную зону контроля. В перспективе модель планируется использовать для разработки диагностических критериев, которые лягут в основу алгоритмов тепловой диагностики колес.

Ключевые слова: тепловой контроль колес, температура, термомеханические повреждения, автоматическое моделирование.

Summary

Nowadays safety standards that are accepted by developed countries envisage the application of systems for thermal control of the rolling stock chassis on the basis of infrared heat detectors. The paper considers the issues connected with the development and the use of the complex diagnostic model for thermal control of railway rolling stock wheels by means of mathematical (analytical and numerical) modelling. The data obtained with the help of the proposed model in the form of the receiving device electric signal oscillograms allow justifying the rational angles of IR-optics orientation on the wheel and selecting the most informative control zone. In prospect, the model will be used for development of diagnostic criteria that will form the basis of algorithms for thermal diagnostics of wheels.

Keywords: thermal control of wheels, temperature, thermomechanical damage, automatic brakes, mathematical modelling.

DOI: 10.20291/1815-9400-2019-3-36-40

В настоящее время на железных дорогах Европы, США, Канады и других стран широко используются системы теплового контроля (СТК) ходовых частей подвижного состава на основе инфракрасных детекторов нагрева. При этом контролируются буксовые узлы, рама тележки и отдельные элементы системы торможения, от технического состояния которых зависит безопасность эксплуатации подвижного состава. Поскольку вопросы контроля теплового состояния колеса как элемента системы торможения освещены мало, они требуют более глубокой проработки.

При взаимодействии с рельсами и тормозными колодками колеса подвергаются комплексному силовому и тепловому воздействию. В результате термомеханических повреждений (выщербин, ползунов и наваров) поверхности катания сокращается срок службы колес и увеличиваются динамические нагрузки на подвижной состав. Тепловой контроль позволяет снизить повреждаемость колеса за счет мониторинга эффективности колочного торможения подвижного состава.

Перед разработчиками СТК и эксплуатирующими организациями встает широкий круг задач, связанных с улучшением качества работы существующих систем, оценкой контролепригодности ходовых частей конструкций, созданием и апробированием алгоритмов оценки работоспособности ходовых частей подвижного состава по тепловым сигналам. Для решения этих задач широко используется метод математического моделирования, позволяющий с достаточной степенью точности описать процессы нагрева и теплового контроля колес при торможении. В статье рассматривается разработка комплексной диагностической модели теплового контроля колес железнодорожного подвижного состава.

Известен комплекс вычислительных моделей для исследования тепловых режимов и моделирования процесса контроля бук-

совых узлов подвижного состава [1, 2]. Комплекс представляет собой совокупность связанных блоков-моделей, включающий в себя модель движения подвижного состава для оценки перемещений и усилий, возникающих при работе буксового узла, термомеханическую модель его работы, модель сканирования приемником ИК-излучения, модель ИК-излучения и определения нагрева буксового узла. С целью расширения практического применения и исследования процессов теплового контроля колес на основе этого комплекса разработаны дополнительные компьютерные модели:

модель взаимодействия колеса и тормозной колодки при торможении для оценки величины плотности теплового потока по результатам предварительного тормозного расчета;

модель нагрева колеса при торможении.

Диагностическая модель бесконтактного теплового контроля формулируется следующим выражением:

$$z(t) = A(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1)$$

где $z(t)$ — тепловой сигнал на приемнике ИК-излучения (выражается зависимостью измеряемой величины от параметров рассматриваемой системы);

t — время, с;

A — оператор преобразования (перевода) системы из состояния в состояние;

x_1, x_2, \dots, x_n — параметры системы, в том числе скорость движения (м/с) и масса вагона (кг), теплофизические и механические характеристики колеса и тормозной колодки, температура окружающей среды (°С), коэффициенты трения между колесом и колодкой, характеристики среды, оптические характеристики СТК и т.д.

Структура диагностической модели теплового контроля колес представлена в виде связанных блоков (рис. 1).

Рассмотрим общий порядок работы комплексной диагностической модели и взаимодействие между ее составными частями.

В первом блоке решается задача определения плотности теплового потока при различных режимах торможения. Разработанная в среде табличного процессора Microsoft Excel математическая модель предусматривает для этого использование трех методик.

1. На основе предварительного тормозного расчета исходя из силы нажатия тормозной колодки на колеса, определяемой по режиму воздухораспределителя вагона [3]. Плотность теплового потока в соответствии с данной методикой рассчитывается по зависимости

$$q(t) = \frac{b(t)v(t)q_0}{A}, \quad (2)$$

где $b(t)$ — удельная тормозная сила, Н/кг;

$v(t)$ — скорость движения вагона, м/с;

q_0 — осевая нагрузка вагона, кН;

A — площадь трения тормозной колодки, м².

При этом методика предполагает, что тепловой поток $q(t)$ нелинейно возрастает от нуля до максимума при наполнении тормозных цилиндров сжатым воздухом. После повышения давления в тормозном цилиндре до максимума скорость поезда и тепловыделение уменьшаются до нуля.

2. На основе гипотезы о том, что кинетическая энергия вагона в полном объеме преобразуется в тепловую энергию при трении тормозных колодок о колеса [4]. В данном случае плотность теплового потока определяется по выражению

$$Q = \frac{K}{8t \cdot S} \cdot \eta, \quad (3)$$

где K — кинетическая энергия вагона, преобразуемая в тепловую энергию при взаимодействии колодки и колеса,

$$K = \left(\frac{Mv^2}{2} \right), \text{ Дж};$$

t — время торможения, с;

S — площадь поверхности катания колеса, м²;

η — коэффициент распределения теплового потока между колесом и колодкой, зависящий от свойств контактирующих материалов.

3. На основе модели трения Кулона [5], которая предполагает, что контактные поверхности взаимодействующих тел могут воспринимать сдвиговые напряжения. Если значение эквивалентных сдвиговых напряжений при этом меньше, чем некоторое предельное значение сдвиговых напряжений $\tau_{пр}$ то относительного движения поверхностей не возникает. Модель трения Кулона описывается следующим выражением:

$$\tau_{пр} = \mu P, \quad (4)$$

где μ — коэффициент трения;

P — нормальное давление в зоне контакта, Па.

При превышении некоторого предельного значения $\tau_{пр}$ контактные поверхности начинают движение друг относительно друга. В этом случае между ними возникает тепловой поток, плотность которого определяется зависимостью

$$q = K_1 \cdot \tau \cdot v, \quad (5)$$

где K_1 — коэффициент рассеяния энергии;

τ — эквивалентные напряжения, возникающие в результате трения, Па;

v — скорость трения, м/с.

Выходными данными первого блока моделирования являются зависимости плотности теплового потока от времени торможения, которые служат входными данными для моделирования нагрева колеса при торможении.

Второй блок представляет собой модель нагрева колеса при различных режимах торможения, реализованную на основе метода конечных элементов (МКЭ). Рассчитанные в первом блоке плотности тепловых потоков используются в качестве нагрузок для оценки температурных полей в колесе и колодке. Уравнение теплопереноса в матричной форме в терминах МКЭ описывается зависимостью

$$[K]\{T\} + [C]\{T\} = \{Q\}, \quad (6)$$

где $[K]$ — матрица теплопроводности;

$\{T\}$ — узловые температуры;

$[C]$ — матрица удельных теплоемкостей;

$\{Q\}$ — вектор узлового теплового потока.

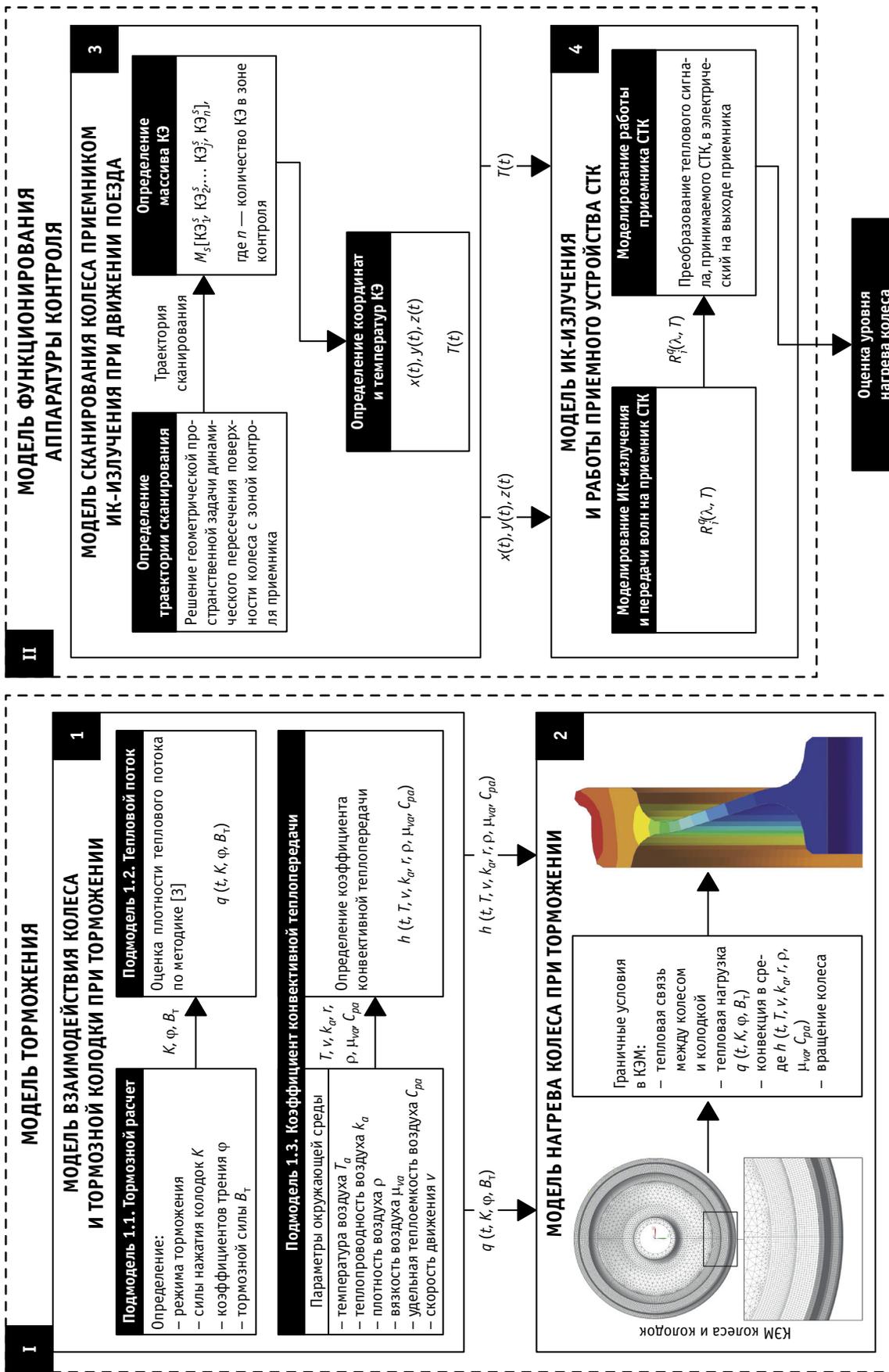


Рис. 1. Структура комплексной диагностической модели теплового контроля колес

Геометрия колеса в разработанной модели аппроксимирована гибридной конечно-элементной сеткой, состоящей из объемных конечных элементов (КЭ) в форме гексаэдра (8-узловой КЭ) и тетраэдра (4-узловой КЭ), геометрия колодки — объемным 4-узловым КЭ в форме тетраэдра.

При движении колесо подвергается обтеканию воздушным потоком, который оказывает влияние на его нагрев. С целью учета этого явления в состав модели нагрева колеса также включается подмодель определения граничных условий для расчета в рамках МКЭ коэффициента конвективной теплопередачи. В подмодели он рассматривается как функция, зависящая от скорости движения вагона и физических свойств воздуха при заданной температуре в каждый момент времени t :

$$h(t) = \frac{0,037k_a}{2r} \left(\frac{2\rho_a r \cdot \vartheta(t)}{\mu_{va}} \right)^{0,8} \left(\frac{C_{pa} \mu_{va}}{k_a} \right)^{0,33}, \quad (7)$$

где $h(t)$ — коэффициент конвективной теплопередачи;

k_a , ρ_a , μ_{va} и C_{pa} — соответственно коэффициент теплопроводности (Вт/м·°С), плотность (кг/м³), вязкость (кг/м·с) и удельная теплоемкость воздуха (Дж/кг·К) при заданной температуре окружающей среды;

r — радиус колеса, м.

Третий блок диагностической модели предназначен для исследования движения колеса через зону контроля приемника ИК-излучения. Здесь решается геометрическая пространственная задача пересечения поверхности колеса с зоной контроля, имеющей вид конуса с вершиной в точке, из которой исходит оптическая ось приемника [4]. Поскольку СТК воспринимает тепловое излучение только наружных поверхностей элементов, то в третий блок передаются координаты внешних узлов КЭ-сетки. Оставшиеся после отбора КЭ приобретают 4-узловую структуру, представляющую собой ограниченную прямоугольником поверхность. Таким образом, на базе исходного массива КЭ с поверхности колеса M_s [$K\Theta_1^S, K\Theta_2^S, \dots, K\Theta_i^S, \dots, K\Theta_k^S$] в процессе «отсева» КЭ по признаку «попадания» в зону контроля приемника ИК-излучения формируется новый массив n КЭ, находящихся в зоне контроля, тепловое излучение которых воспринимается приемником.

В четвертый блок передается массив данных (геометрических и физических) о КЭ в зоне контроля приемника ИК-излучения в каждый момент времени моделирования. В рамках блока определяются параметры ИК-излучения с учетом факторов, влияющих на прием излучения: геометрических параметров системы и свойств внешней среды.

В качестве сигнала в модели принимается изменение интегральной температуры в пятне, образуемом поверхностью колеса и лучом обзора приемника. Сигнал при этом выражен мощностью принимаемого излучения, Вт:

$$F = \frac{S_{об} \cdot \varepsilon}{\pi} \sum_{i=1}^n \sum_{q=1}^u \left(S_{\lambda}^q \cdot K_a^q \cdot K_0^q \cdot R_i^q \cdot S_i \cdot \frac{\cos(\varphi_i)}{l_i^2} \right), \quad (8)$$

где i — номер КЭ;

q — номер интервала спектра излучения;

$S_{об}$ — рабочая площадь объектива приемника, м²;

S_i — площадь i -го КЭ, м²;

$S_{\lambda}^q, K_a^q, K_0^q$ — соответственно спектральная чувствительность и коэффициенты пропускания атмосферы и приемника, определенные как константы для q -го интервала спектра излучения;

u — количество интервалов, на которые разбита инфракрасная область спектра электромагнитного излучения;

S_i — площадь i -го конечного элемента, м²;

R_i^q — суммарная плотность излучения i -го КЭ как абсолютно черного тела в интервале диапазона волн q , Вт/м²;

φ_i — угол между направляющим вектором ориентации приемника и нормали i -го конечного элемента, град;

l_i — расстояние между приемником и i -м конечным элементом, м.

Результатом работы комплексной диагностической модели является получение расчетной осциллограммы, выраженной изменением температуры поверхности колеса в зоне сканирования либо изменением мощности принимаемого излучения.

В настоящее время комплексная диагностическая модель теплового контроля уже применяется для обоснования рациональных углов ориентации ИК-оптики на колесо [6] и выбора наиболее информативной зоны контроля [7]. Например, с ее помощью проанализированы два известных варианта ориентации ИК-оптики для разрабатываемых СТК (рис. 2).

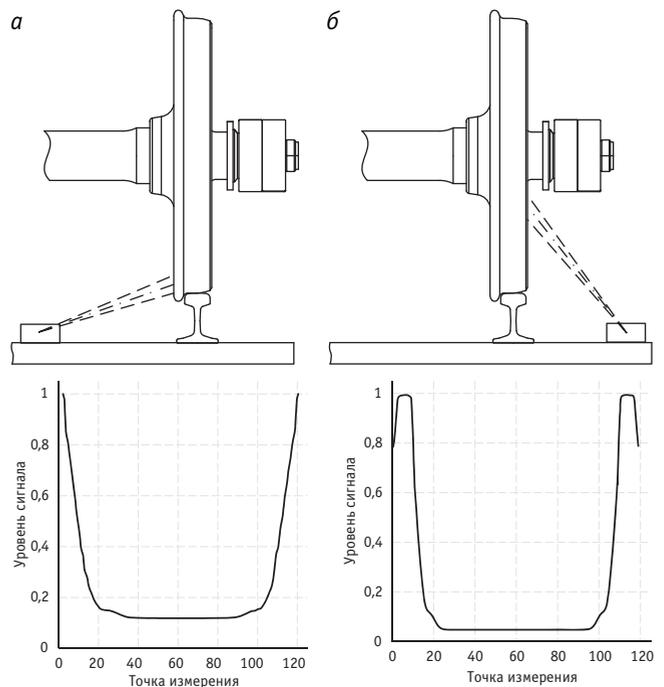


Рис. 2. Варианты ориентации ИК-оптики с использованием комплексной диагностической модели и соответствующие им паттерны СТК:

a — по хорде колеса на высоте 150 мм от уровня головки рельса с внутренней стороны; b — по хорде колеса в подступичной зоне (350 мм над уровнем головки рельса) с внешней стороны

В дальнейшем рассмотренную комплексную модель предполагается использовать для определения критериев оценки качества работы и диагностики неисправностей колодочных тормозов подвижного состава.

Литература

1. Миронов А. А. Виртуальная модель бесконтактного теплового контроля буксовых узлов подвижного состава // Транспорт Урала. 2008. № 3 (18). С. 59–65. ISSN 1815–9400.
2. Миронов А. А., Павлюков А. Э., Салтыков Д. Н. Комплекс вычислительных моделей для исследования процессов контроля узлов подвижного состава по инфракрасному излучению // Мир измерений. 2014. № 6. С. 21–27. ISSN 1813–8667.
3. Галай Е. Э. Нагрев колес грузовых вагонов при запуске тормоза // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2014. № 4 (44). С. 130–136. ISSN 1813–9108.
4. Миронов А. А. Научные и технические основы бесконтактного теплового контроля букс железнодорожного подвижного состава : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Екатеринбург, 2009. 366 с.
5. Oden J. T., Martins J. A. C. Models and computational methods for dynamic friction phenomena // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1985. Vol. 52. Pp. 527–634. ISSN 0045–7825.
6. Салтыков Д. Н., Шалупина П. И. О необходимости создания инфракрасных напольных систем для контроля работоспособности тормозов на железных дорогах России // Транспорт Урала. 2018. № 2 (57). С. 47–51. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-2-47-51. ISSN 1815–9400.
7. Mironov A., Shalupina P., Pavlyukov A., Dobychin I. Simulation of wheel heating when drum braking // X International scientific and technical conference Polytransport Systems. MATEC Web Conf. 2018. Vol. 216. 6 p.

References

1. Mironov A. A. Virtual model of contactless thermal control of rolling stock axle-box mounts [Virtual'naya model' beskontaktnogo teplovogo kontrolya buksovykh uzlov podvizhnogo sostava] // Transport of the Urals. 2008. No. 3 (18). Pp. 59–65. ISSN 1815–9400.
2. Mironov A. A., Pavlyukov A. E., Saltykov D. N. Complex of calculation models for investigating processes of rolling stock equipment control by infrared radiation [Kompleks vychislitel'nykh modeley dlya issledovaniya protsessov kontrolya uzlov podvizhnogo sostava po infrakrasnomu izlucheniyu] // Measurements World. 2014. No. 6. Pp. 21–27. ISSN 1813–8667.
3. Halai E. E. Freight car wheel temperature in braking regime [Nagrev koles gruzovykh vagonov pri zapuske tormoza] // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2014. No. 4 (44). Pp. 130–136. ISSN 1813–9108.
4. Mironov A. A. Scientific and technical basics of contactless thermal control of railway rolling stock axle-boxes [Nauchnye i tekhnicheskie osnovy beskontaktnogo teplovogo kontrolya buks zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava] : DSc in Engineering Thesis. Ekaterinburg, 2009. 366 p.
5. Oden J. T., Martins J. A. C. Models and computational methods for dynamic friction phenomena // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1985. Vol. 52. Pp. 527–634. ISSN 0045–7825.
6. Saltykov D. N., Shalupina P. I. About the necessity to create infrared way-side systems for controlling the operability of brakes on the Russian railways [O neobkhodimosti sozdaniya infrakrasnykh napol'nykh sistem dlya kontrolya rabotosposobnosti tormozov na zheleznykh dorogakh Rossii] // Transport of the Urals. 2018. No. 2 (57). Pp. 47–51. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-2-47-51. ISSN 1815–9400.
7. Mironov A., Shalupina P., Pavlyukov A., Dobychin I. Simulation of wheel heating when drum braking // X International scientific and technical conference Polytransport Systems. MATEC Web Conf. 2018. Vol. 216. 6 p.

Объем статьи 0,57 авторских листа

УДК 629.432

Александр Николаевич Скачков, кандидат технических наук, директор ЗАО Научная организация «Тверской институт вагоностроения» (ЗАО НО ТИВ), Тверь, Россия,

Сергей Львович Самошкин, доктор технических наук, начальник управления научно-технического обеспечения и развития ЗАО Научная организация «Тверской институт вагоностроения» (ЗАО НО ТИВ), Тверь, Россия,

Сергей Дмитриевич Коршунов, кандидат технических наук, заведующий лабораторией «Динамика-прочностные испытания вагонов» ЗАО Научная организация «Тверской институт вагоностроения» (ЗАО НО ТИВ), Тверь, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИЗГИБНЫХ КОЛЕБАНИЙ ЦЕЛЬНОСВАРНЫХ КУЗОВОВ ВАГОНОВ МЕТРОПОЛИТЕНА

Alexander Nikolaevich Skachkov, PhD in Engineering, Director of CJSC Scientific Organization «Tver Institute of Car Building», Tver, Russia,

Sergey Lvovich Samoshkin, DSc in Engineering, Head of Scientific and Technical Support and Development Department, CJSC Scientific Organization «Tver Institute of Car Building», Tver, Russia,

Sergey Dmitrievich Korshunov, PhD in Engineering, Head of Dynamic Strength Tests of Cars Laboratory, CJSC Scientific Organization «Tver Institute of Car Building», Tver, Russia

Research of flexural vibration parameters of all-welded bodies of subway cars

Аннотация

Статья посвящена расчетно-экспериментальным исследованиям низших собственных частот изгибных колебаний кузовов вагонов метрополитена. Рассмотрены два вида вагонов: 1) новейшие модели 81-765, 81-766 и 81-767 с обшивкой кузова из нержавеющей стали; 2) модели 81-717 и 81-714 с обшивкой из углеродистых сталей. При расчете низших собственных частот изгибных колебаний кузовов использованы нормативные документы, применяемые в пассажирском вагоностроении. Экспериментальное определение параметров изгибных колебаний металлоконструкций кузовов вагонов проведено двумя методами: с помощью вибростанции VM-10 и за счет сброса груза массой 25 кг с высоты 1 м. По результатам испытаний установлено, что значения низшей собственной частоты для всех моделей вагонов удовлетворяют нормативным требованиям, однако расчетные значения значительно превышают данные, полученные при экспериментах. Сделан вывод о необходимости разработки новых методов расчета и создания нормативных документов на методы испытаний и технические требования ко всем вагонам метрополитена.

Ключевые слова: вагоны метрополитена, металлоконструкция кузова, низшая собственная частота, нормативный документ, масса брутто кузова, вибростанция, момент инерции, изгибная жесткость.

Summary

The paper is devoted to computational and experimental studies of fundamental frequencies of subway car body flexural vibrations. The authors considered two types of cars: 1) newest 81-765, 81-766 and 81-767 cars with stainless steel body lining; 2) 81-717 and 81-714 cars with carbon steel body lining. In calculation of fundamental frequencies of body flexural vibrations they used standard documents applied in passenger carriage engineering. Experimental determination of flexural vibration parameters of car body metalware was carried out by two methods: with the use of VM-10 vibration machine and by dumping a load weighing 25 kg from a height of 1 m. As a result, values of the fundamental frequency for all car models meet the regulatory requirements, but the calculated values significantly exceed the data obtained during the experiments. In conclusion, it is necessary to develop new methods of calculation and create standard documents on test methods and engineering requirements for all subway cars.

Keywords: subway cars, body metalware, fundamental frequency, standard document, body gross weight, vibration machine, moment of inertia, flexural stiffness.

DOI: 10.20291/1815-9400-2019-3-41-47

В соответствии с рекомендациями стандарта [1] для обеспечения требований комфорта пассажиров низшая собственная частота изгибных колебаний в вертикальной плоскости должна быть ограничена снизу.

Для предварительных расчетов низшую собственную частоту изгибных колебаний в вертикальной плоскости (f , Гц) определяют по формуле (15.18) [1]

$$f = \frac{3,027}{L^2} \sqrt{\frac{EJ}{\mu}}, \quad (1)$$

где L — длина кузова по концевым стенам, м;

E — модуль упругости, Па;

J — момент инерции среднего поперечного сечения кузова, определяемый с учетом редуцирования, м⁴;

μ — погонная масса брутто кузова вагона, кг/м.

Согласно формуле (1), частота должна быть не менее 10 Гц для массы брутто кузова.

Для уточненных расчетов собственной частоты изгибных колебаний в вертикальной плоскости стандарт [1] рекомендует использовать расчетную схему в виде плоской (пространственной) свободной балки с кусочно-постоянными по длине массово-геометрическими характеристиками, ступенчатой осевой линией и с учетом сосредоточенных масс. При этом следует учитывать все компоненты напряженно-деформируемого состояния балочной схемы и массу брутто. Рассчитанная таким образом низшая частота должна быть не менее 9 Гц.

После завершения проектно-конструкторских работ производится изготовление вагона и экспериментальное определение параметров изгибных колебаний. В стандарте [1] отмечается, что при вибрационных стендовых испытаниях оборудованного вагона под массой брутто $m_б$ (кг) низшая собственная изгибная частота колебаний в вертикальной плоскости $f_б$ должна быть не менее 8 Гц.

В настоящее время применяются различные способы возбуждения собственных частот изгибных колебаний кузовов вагонов, самые распространенные из них подробно рассмотрены в работе [2]. В результате анализа установлено, что наиболее часто частоту низшего тона изгибных колебаний определяют на металлоконструкции кузова с помощью вибромашины или вертикального удара по полу в центре кузова мерным грузом. В связи с этим в стандарте [1] приводится формула перехода от частоты $f_н$ необорудованного кузова $m_н$ (кг) к частоте $f_б$ кузова массой брутто $m_б$

$$f_б = k_{нб} \cdot f_н \cdot \sqrt{\frac{m_н}{m_б}}, \quad (2)$$

где $k_{нб}$ — коэффициент, учитывающий внутреннюю планировку вагона ($k_{нб} = 1$ при отсутствии поперечных перегородок в оборудованном кузове и $k_{нб} = 1,2-1,3$ при наличии поперечных перегородок).

Нами на основании современных методов [3, 4] определены параметры изгибных колебаний для ряда моделей пассажирских вагонов и электропоездов, результаты исследований приведены в работах [5–8].

Анализ работ [5–8] позволяет сделать следующие предварительные выводы.

1. При определении низшей собственной частоты изгибных колебаний в вертикальной плоскости наблюдается существенное различие между расчетными по формуле (1) и экспериментальными данными. Причем расчетные результаты значительно превышают экспериментальные. Для кузовов массой брутто это превышение составляет до 20 % от нормированной величины 8 Гц, а для металлоконструкции — до 2 раз.

2. На текущий момент наиболее простым и достоверным способом определения низшей собственной частоты металлоконструкции кузова пассажирского вагона является комбинированный, который включает в себя испытания методом возбуждения колебаний вибромашиной в сочетании с методом возбуждения колебаний сбросом груза внутри кузова.

3. С целью верификации формулы (2) необходимо проводить испытания оборудованного кузова (тары), установленного на жесткие опоры. Для испытаний оборудованного кузова вагона следует разработать метод возбуждения колебаний, минимизирующий или полностью исключающий повреждения пола, внутреннего и подвагонного оборудования [2, 9].

В работе [10] отмечено, что габаритно-весовые характеристики кузовов пассажирских вагонов оказывают значительное влияние на их изгибную жесткость и параметры изгибных колебаний. В связи с этим большой интерес представляет определение параметров изгибных колебаний кузовов вагонов метрополитена на основе использования формул (1) и (2) и ме-

тодов испытаний, применяемых для кузовов магистральных пассажирских вагонов [3, 4].

Вместе с тем следует учитывать, что по своим габаритно-весовым характеристикам (длина, база вагона, размеры поперечного сечения, нагрузка от колесной пары на рельс, соотношение нагрузок «тара — брутто» и т.д.) вагоны метрополитена существенно отличаются от пассажирских вагонов и вагонов электропоездов магистральных железных дорог. Кроме того, обязательная сертификация вагонов метрополитена началась с введением ТР ТС [11], поэтому нормативная база по их механической части еще только развивается и фактически включает в себя два документа [12, 13]. Соответственно и публикаций по вопросам прочности и жесткости кузовов отечественных вагонов метрополитена крайне мало [14], к тому же в основном они касаются тягово-энергетических испытаний вагонов (достаточно полный обзор публикаций приведен в работе [15]). Поэтому при проведении сертификационных, контрольных, приемочных и других видов испытаний используются технические условия (ТУ), в которых наиболее полно изложены требования к тому или иному вагону [16].

Для исследования применимости формул (1) и (2) нами рассмотрены две разновидности вагонов метрополитена: новейшие модели 81-765, 81-766 и 81-767 (табл. 1) с обшивкой кузова из нержавеющей стали и модели 81-717 и 81-714 с обшивкой кузова из углеродистой стали, изготовленные по чертежам 1970-х гг.

Таблица 1

Основные параметры и размеры вагонов метрополитена моделей 81-765, 81-766 и 81-767

Параметр	Значение параметра		
	81-765	81-766	81-767
Обозначение вагонов	МГ	МП	НП
Масса тары вагона, не более, т	38	36	29
Количество мест для сидения, шт.	33+1	36	36
Максимальная вместимость из расчета 10 чел./м ² с учетом сидящих пассажиров	312	330	330
Максимальная пассажирская нагрузка вагона, т	21,84	23,10	23,10
Максимальная нагрузка от колесной пары на рельс, не более, т	15	15	15
Длина кузова вагона по раме, см	1927,5	1833,5	1833,5
База вагона, см	1260	1260	1260
Ширина кузова, см	268	268	268
Конструкционная скорость, км/ч	90	90	90
Масса металлоконструкции, т	10,8	9,0	9,0
Масса кузова (тара), т	21,3	20,6	20,3
Масса брутто кузова, т	42,7	43,7	41,2

Поезд постоянного формирования со сквозным проходом вдоль всего состава включает в себя моторные головные вагоны модели 81-765 (МГ) с кабиной управления, расположенные по концам, моторные промежуточные вагоны модели 81-766 (МП) и немоторные прицепные вагоны модели 81-767 (НП). Основная составность — восемь вагонов в конфигурации МГ-МП-НП-МП-МП-НП-МП-МГ [17].

Кузовы всех моделей идентичны — цельнометаллические сварной конструкции с несущей наружной обшивкой из нержавеющей стали. Кузов представляет собой замкнутую несущую оболочку с вырезами для окон и дверей, подкрепленную продольными и поперечными элементами жесткости. Для увеличения жесткости используются стойки дверных проемов коробчатого сечения. Лобовая часть головных вагонов изготовлена из металлического каркаса, приваренного к кузову, и прикрепленного к нему обтекателя из стеклопластика.

Механические характеристики сталей, применяемых в конструкции кузовов вагонов метро, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Механические характеристики сталей, применяемых в металлоконструкции вагонов метро нового поколения

Марка стали	Предел текучести $\sigma_{тТ}$, МПа	Допускаемые напряжения, МПа	
		Расчетный режим I	Расчетный режим II
09Г2Д по ГОСТ 19281–2014 [17] Нижний лист и вертикальные ребра хребтовой балки в зоне установки сцепки	345	345	210
09Г2Д по ГОСТ 19281–2014 [17] Нижний лист шкворневой балки	325	325	195
09Г2Д по ГОСТ 19281–2014 [17] Балка хребтовая	295	295	190
09Г2Д по ГОСТ 19281–2014 [17] Остальные элементы рамы кузова	295	295	195
12Х18Н10Т по ГОСТ 5582–75 [18] Каркас и обшивка боковых и торцевых стен, элементы крыши	205	205	135
Сталь 3пс по ГОСТ 380–2005 [19] Гофрированные листы пола	255	255	165

Поскольку экспериментальное определение параметров изгибных колебаний проводилось на базе металлоконструкции кузова вагона модели 81-766, рассмотрим ее более подробно.

Поперечное сечение (по окну) кузова, полученное на основании рабочей конструкторской документации, по которой на ОАО «ТВЗ» изготавливались первые образцы, представлено на рис. 1. Исходные данные и результаты расчета первого тона изгибных колебаний вагона метро модели 81-766 с использованием формулы (1) приведены в табл. 3.

При испытаниях необорудованная металлоконструкция кузова вагона массой 9,05 т устанавливалась на четыре стационарные опоры, расположенные в зонах концов шкворневых балок. Изгибные колебания кузова возбуждались вибромашиной ВМ-10, размещенной на консольной части рамы кузова и жестко соединенной с хребтовой балкой. Изменение частоты возмущающей силы обеспечивалось за счет изменения числа оборотов приводного электродвигателя вибромашины. Все процессы регистрировались усилителем Spider 8 и записывались на ПК. Регистрация данных проводилась при плавном увеличении частоты возмущающей силы. Перемещения

кузова регистрировались в семи контрольных точках, расположенных по длине продольной обвязки (рис. 2).

Дополнительно определение первой собственной частоты изгибных колебаний кузова в вертикальной плоскости производилось методом импульсного возбуждения свободных затухающих колебаний в металлоконструкции. Возбуждение колебаний в поданной на испытания незагруженной металлоконструкции кузова осуществлялось сбросом груза массой 25 кг с высоты 1,0 м на пол тамбуров и середины кузова. Испытания этим методом проводились до установки вибромашины в кузов для исключения влияния сосредоточенного приложения ее существенной массы (627 кг) на результаты.

По итогам испытаний было установлено, что значение первого тона собственной частоты вертикальных изгибных колебаний металлоконструкции кузова, определенное как частота основного максимума по спектральной плотности записанных процессов ускорений, составило 17,8 Гц.

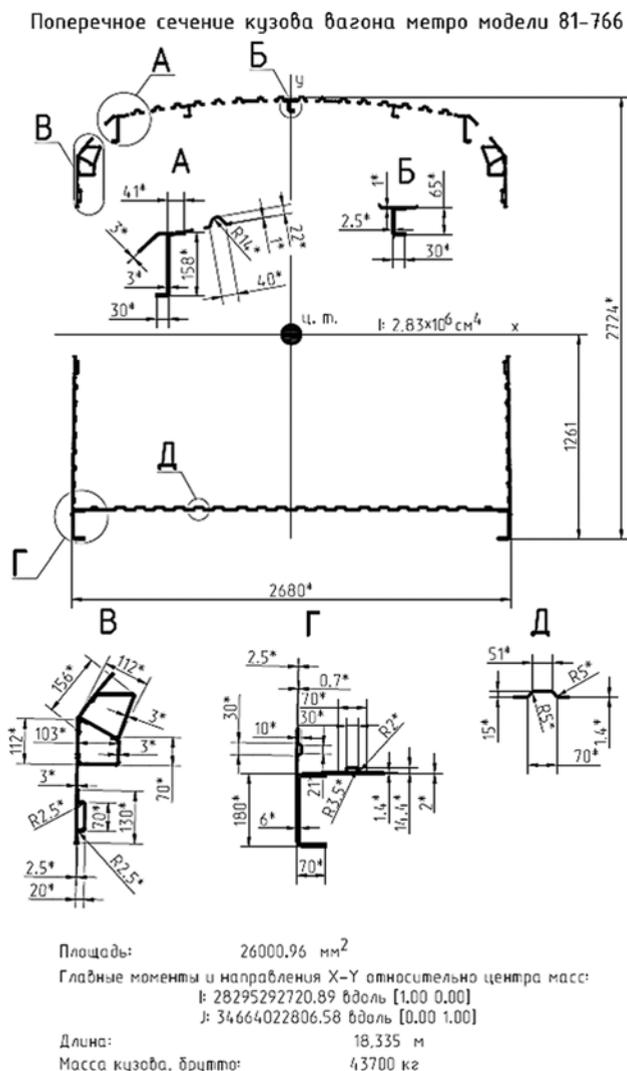


Рис. 1. Среднее сечение кузова вагона метрополитена модели 81-766 (по оконному проему): А, Б, В, Г, Д — узлы, которые были увеличены

Таблица 3

Исходные данные и результаты расчета частоты первого тона изгибных колебаний вагона метро модели 81-766

Параметр		Единицы измерения	Значение параметра
Масса	Металлоконструкция кузова	кг	9000
	Кузов в экипированном состоянии	кг	20600
	Полезная нагрузка/брутто	кг	23100/43700
Результаты	Длина кузова по концам торцевых стен	см	1834,0
	Длина кузова по раме	см	1833,5
	База вагона	см	1260
	Высота кузова от верха шкворневой балки до гофра крыши	см	254,4
Материал	Рама вагона	Марка	— 09Г2Д
		E	ГПа 210
	Обшивка и элементы набора	Марка	— 12Х18Н10Т
		E	ГПа 200
Момент инерции среднего сечения (по окну)		см ⁴	$2,83 \cdot 10^6$
Площадь среднего сечения (по окну)		см ²	260
Частота первого тона изгибных колебаний (металлоконструкции)		Гц	31
Частота первого тона изгибных колебаний (брутто)		Гц	14
Прогиб от массы брутто кузова		мм	1*
Изгибная жесткость кузова		кг·м ²	$5,8 \cdot 10^8$

*Вычислен по формуле для расчета максимального прогиба статически определимых балок постоянного поперечного сечения, приведенной в работе [20, с. 302].

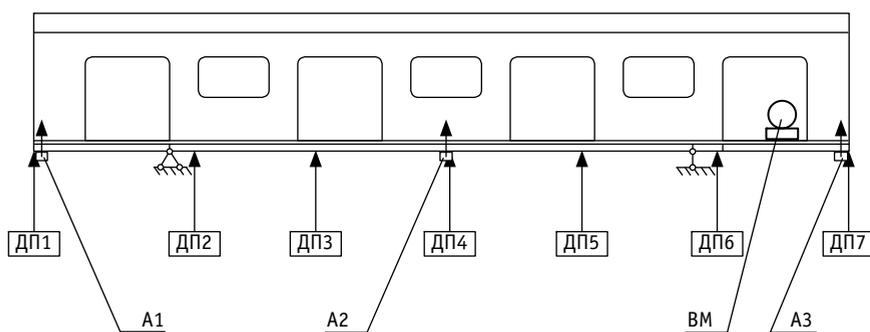


Рис. 2. Схема расстановки датчиков на металлоконструкции кузова вагона метро модели 81-766 при испытаниях: ДП — датчик перемещений; ВМ — вибромашина; А — датчик ускорений

Подставляя в формулу (2) $f_n = 17,8$ Гц, получаем для полностью оборудованного кузова при максимальной загрузке (43 700 кг) $f_0 = 8,1$ Гц.

Второй разновидностью вагонов метрополитена, для которых определялись параметры изгибных колебаний, были вагоны моделей 81-717 и 81-714. ОАО «Метровагонмаш» выпустило небольшую партию кузовов вагонов для обновления пар-

ка метрополитена Будапешта (Венгрия). Модели изготавливались по документации 1970-х гг. с обшивкой из углеродистых сталей.

Поезд из моторных вагонов моделей 81-717 (головной) и 81-714 (промежуточный) может формироваться строго из обеих разновидностей, при этом по концам состава должны находиться головные вагоны, а в центре — промежуточ-

ные. Минимальное число промежуточных вагонов равно 1, максимальное 6. Таким образом, всего в поезде может быть от 3 до 8 вагонов. Основные параметры и размеры вагонов состава приведены в табл. 4 [21].

Кузовы вагонов моделей 81-714/81-717 представляют собой цельнометаллическую несущую сварную конструкцию типа замкнутой оболочки с вырезами для окон, двух торцевых и восьми боковых дверей (по четыре на каждой боковине). Основные части кузова — рама, боковые стены, лобовые и концевые части, крыша и металлический пол. Кроме того, в кузовах вагонов модели 81-717 расположена сплошная металлическая перегородка, отделяющая кабину машиниста от пассажирского салона.

Рама вагона представляет собой замкнутый контур с размерами 18810×2670 мм, состоящий из боковых швеллерообразных балок концевых частей. По концам расположены укороченные хребтовые балки, служащие для установки поглощающих аппаратов автосцепок и имеющие гнезда для размещения элементов крепления самих автосцепок. Кроме того, в набор рамы входят две шкворневые балки и несколько поперечных. Продольные балки в раме отсутствуют, так как их функции выполняет гофрированный пол.

Боковые стены и концевая часть кузова собраны из вертикальных стоек, подоконных балок и верхнего листа. В качестве обшивки применяется стальной гофрированный лист толщиной 1,4–2 мм. Лобовая часть головных вагонов выполнена из стального штампованного листа толщиной 4 мм, дополнительно усиленного с помощью вертикальных ребер жесткости, и приварена непосредственно к каркасу кузова. Крыша вагона имеет полуфонарный тип, состоит из поперечных ребер жесткости и обшивки из стального гофрированного листа толщиной 1,4 мм. Сверху на крыше установлены воздухозаборники, а внутри вдоль продольной оси имеются элементы для подвески светильников освещения салона.

В табл. 5 приведены характеристики сталей, применяемых при изготовлении металлоконструкций кузовов вагонов метрополитена моделей 81-717/81-714.

Таблица 4

Основные параметры и размеры вагонов
моделей 81-717 и 81-714

Параметр	Значение параметра		
	81-717	81-714	
Масса тары вагона, не более, т	34,0	33,5	
Количество мест для сидения, шт.	36	36	
Максимальная вместимость из расчета 10 чел./м ² с учетом сидящих пассажиров	252	273	
Максимальная пассажирская нагрузка, т	18,44	20,00	
Максимальная нагрузка от колесной пары на рельс, не более, т	15	15	
Длина кузова вагона по раме, см	1880,6	1880,6	
База вагона, см	1260	1260	
Ширина кузова, см	267	267	
Конструкционная скорость, км/ч	90	90	
Масса металлоконструкции, т	8,28	8,20	
Масса кузова (тара), т	19,0	18,0	
Масса брутто кузова, т	37,44	38,00	
Ходовые части	База, см	210	210
	Диаметр колеса, см	78,0	78,0
	Масса, т	7,55	7,55

Таблица 5

Механические характеристики сталей

Марка стали	Предел текучести σ_T , МПа
09Г2Д по ГОСТ 19281–2014 [17] Прокат с классом прочности 295 Элементы рамы	295
Сталь 20 по ГОСТ 1055–2013 [22] Прокат с классом прочности 245 Элементы боковин и крыши	245

Определение первой (нижней) собственной частоты изгибных колебаний в вертикальной плоскости производилось на металлоконструкции кузова модели 81-714 (масса 8200 кг) комбинированным способом. В ходе испытаний кузова при помощи вибромашины ВМ-10 частота f_H по серии опытов составила 17,2 Гц. При испытаниях импульсным возбуждением нагружение осуществлялось сбросом груза массой 25 кг с высоты 1 м на пол тамбура и середины вагона. Регистрация процессов затухающих колебаний в металлоконструкции осуществлялась при помощи датчиков ускорений, размещенных на боковой обвязке кузова в зоне лобовых брусьев (А1 и А3) и в зоне кузова (А2) соответственно (см. рис. 2). Каждый опыт повторялся не менее трех раз. Наиболее характерные процессы затухающих ускорений и их спектральные плотности для датчика А2 представлены на рис. 3 и 4.

В табл. 6 приведены значения низших частот свободных затухающих колебаний металлоконструкции кузова вагона модели 81-714 по всем опытам импульсного возбуждения. Определение частоты для массы брутто кузова (38 000 кг) производилось по формуле (2).

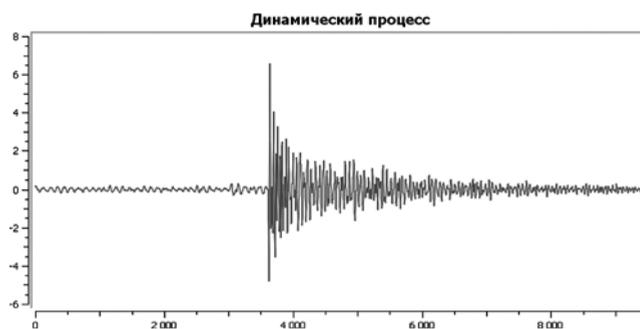


Рис. 3. Оциллограмма процесса ускорения для датчика А2

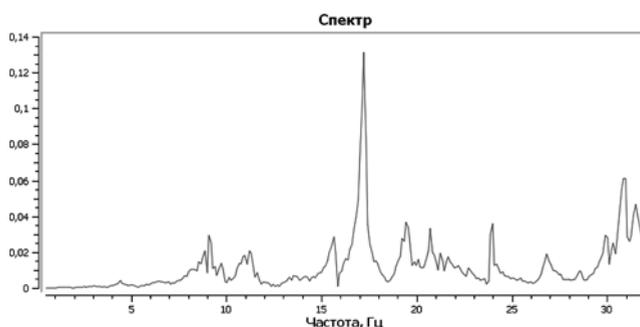


Рис. 4. Спектральная плотность процесса ускорения для датчика А2

Таблица 6

Частоты свободных затухающих колебаний
металлоконструкции вагона метро модели 81-714

Параметр	Сброс груза на консоли			Сброс груза в середине		
	№ опыта					
	1	2	3	1	2	3
f_{A1}	17,15	17,19	17,10	17,02	17,24	17,15
f_{A2}	17,15	17,19	17,20	17,06	17,06	17,02
f_{A3}	17,23	17,19	17,19	17,02	17,19	17,15
f_{CP}	17,18	17,19	17,16	17,03	17,16	17,11
$f_{CP.общ}$	17,14					
f_6	8					

Итак, по результатам расчетов и выполненных двумя методами (использование вибромашины ВМ-10 и сброс груза массой 25 кг с высоты 1 м) экспериментальных исследований по определению параметров изгибных колебаний цельносварных кузовов вагонов метрополитена разных моделей можно сделать следующие выводы.

1. При испытании новейших вагонов модели 81-766 с кузовами из нержавеющей стали установлено, что значение нижней (первой) собственной частоты для металлоконструкции кузова (9050 кг) составляет 17,8 Гц, а для массы кузова брутто (43 700 кг) — примерно 8,1 Гц.

2. В результате испытаний вагонов модели 81–714 с кузовами из углеродистых сталей определено, что значение низшей (первой) собственной частоты для металлоконструкции кузова (8200 кг) составляет в среднем 17,22 Гц, а для массы кузова брутто (38 000 кг) — примерно 8 Гц.

3. Расчеты параметров изгибных колебаний по формулам (1)–(2), приведенным в нормативной литературе [1], показали, что частота первого тона для металлоконструкций превышает 30 Гц, а для массы кузова брутто составляет около 14 Гц.

4. Испытания и расчеты кузовов вагонов метрополитена показали (как и ранее исследования пассажирских вагонов

локомотивной тяги [5], [7]), что формулы (1)–(2) дают завышенный результат, следовательно, существует необходимость в поиске новых методов расчета.

Отметим, что при проведении исследований были использованы методы и требования, применяемые к пассажирским вагонам. Однако в соответствии с техническим регламентом Таможенного союза (ТР ТС 001/2011) [11] необходимо активизировать разработку нормативных документов (ГОСТов) на методы испытаний и требования ко всем вагонам метрополитена [23].

Литература

1. ГОСТ 34093–2017. Вагоны пассажирские локомотивной тяги. Требования к прочности и динамическим качествам. М.: Стандартинформ, 2017. 45 с.
2. Скачков А. Н., Самошкин С. Л. Разработка и обоснование принципов метода экспериментального определения параметров изгибных колебаний кузовов пассажирских вагонов нового поколения // Вестник РГУПС. 2018. № 1. С. 59–64. ISSN 0201–727X.
3. Коршунов С. Д., Самошкин С. Л. Современные методы испытаний железнодорожного подвижного состава, прошедшего ремонты различных объемов и вновь построенного // Вагонный парк. 2012. № 7. С. 15–18. ISSN 1994–4756.
4. Методика расчетно-экспериментальных исследований кузовов современного подвижного состава / С. Д. Коршунов, А. Н. Скачков, С. Л. Самошкин и др. // Известия ПГУПС. 2015. № 4 (45). С. 38–47. ISSN 1815–588X.
5. Анализ и оценка расчетно-экспериментального определения частоты изгибных колебаний кузовов пассажирских вагонов / А. Н. Скачков, С. Л. Самошкин, С. Д. Коршунов, С. А. Горин // Тяжелое машиностроение. 2017. № 9. С. 24–31. ISSN 1024–7106.
6. Комплексные испытания вагона RIC модели 61–4476 / С. Д. Коршунов, А. Н. Скачков, С. Л. Самошкин, А. А. Юхневский // Железные дороги мира. 2014. № 7. С. 30–35. ISSN 0321–1495.
7. Расчетные и экспериментальные исследования частоты изгибных колебаний кузовов пассажирских вагонов колеи 1435 мм / А. Н. Скачков, С. Л. Самошкин, С. Д. Коршунов [и др.] // Тяжелое машиностроение. 2018. № 10. С. 38–43. ISSN 1024–7106.
8. Определение параметров изгибных колебаний и оценка ходовых динамических и эксплуатационных показателей электропоезда нового поколения / А. Н. Скачков, С. Л. Самошкин, С. Д. Коршунов [и др.] // Вестник РГУПС. 2018. № 4 (72). С. 78–87. ISSN 0201–727X.
9. Скачков А. Н., Самошкин С. Л., Деметьев С. А. Анализ методов экспериментального определения параметров изгибных колебаний кузовов пассажирских вагонов // Проблемы безопасности на транспорте: материалы VIII международной научно-практической конференции. Ч. I / БелГУТ. Гомель, 2017. С. 159–160.
10. Скачков А. Н., Самошкин С. Л., Коршунов С. Д. Влияние габаритно-весовых параметров кузовов пассажирских вагонов на изгибную жесткость и параметры изгибных колебаний // Транспорт: наука, образование, производство: сборник научных трудов. Т. 1. Технические науки / РГУПС. Ростов-на-Дону, 2017. С. 254–257.

References

1. GOST 34093–2017. Passenger cars on locomotive traction. Requirements for structural strength and dynamic qualities [Vagony passazhirskie lokomotivnoy tyagi. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam]. Moscow: Standardinform, 2017. 45 p.
2. Skachkov A. N., Samoshkin S. L. Development and principles justification of the experimental determination method of bending vibrations parameters for new generation passenger wagons [Razrabotka i obosnovaniye printsiptov metoda eksperimental'nogo opredeleniya parametrov izgibnykh kolebaniy kuzovov passazhirskikh vagonov novogo pokoleniya] // Vestnik RGUPS. 2018. No. 1. Pp. 59–64. ISSN 0201–727X.
3. Korshunov S. D., Samoshkin S. L. Modern methods of testing railway rolling stock that have been repaired in various volumes and newly built ones [Sovremennye metody ispytaniy zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava, proshedshego remonty razlichnykh ob'emov i vnov' postroennogo] // Car fleet. 2012. No. 7. Pp. 15–18. ISSN 1994–4756.
4. Method for calculation and experimental studies of modern rolling stock bodies [Metodika raschetno-eksperimental'nykh issledovaniy kuzovov sovremenogo podvizhnogo sostava] / S. D. Korshunov, A. N. Skachkov, S. L. Samoshkin, et al. // Proceedings of Petersburg Transport University. 2015. No. 4 (45). Pp. 38–47. ISSN 1815–588X.
5. Analysis and evaluation of experimental observation of railroad passenger car body's bending frequency [Analiz i otsenka raschetno-eksperimental'nogo opredeleniya chastoty izgibnykh kolebaniy kuzovov passazhirskikh vagonov] / A. N. Skachkov, S. L. Samoshkin, S. D. Korshunov, S. A. Gorin // Heavy machinery. 2017. No. 9. Pp. 24–31. ISSN 1024–7106.
6. Complex testing of model 61–4476 RIC car [Kompleksnye ispytaniya vagona RIC modeli 61–4476] / S. D. Korshunov, A. N. Skachkov, S. L. Samoshkin, A. A. Yukhnevskiy // Rail International. 2014. No. 7. Pp. 30–35. ISSN 0321–1495.
7. Calculated and experimental studies of the frequency of bending oscillations of passenger cars' cabs with 1435 mm gauge [Raschetnye i eksperimental'nye issledovaniya chastoty izgibnykh kolebaniy kuzovov passazhirskikh vagonov kolei 1435 mm] / A. N. Skachkov, S. L. Samoshkin, S. D. Korshunov, et al. // Heavy machinery. 2018. No. 10. Pp. 38–43. ISSN 1024–7106.
8. Determination of bending vibrational parameters of car bodies and assessment of running dynamic and operational indicators of a new generation electric train [Opredelenie parametrov izgibnykh kolebaniy i otsenka khodovykh dinamicheskikh i ekspluatatsionnykh pokazateley elektropoezda novogo pokoleniya] / A. N. Skachkov, S. L. Samoshkin, S. D. Korshunov, et al. // Vestnik RGUPS. 2018. No. 4 (72). Pp. 78–87. ISSN 0201–727X.
9. Skachkov A. N., Samoshkin S. L., Demyetev S. A. Analysis of methods for experimental determination of flexural vibration parameters of passenger car bodies [Analiz metodov eksperimental'nogo opredeleniya parametrov izgibnykh kolebaniy kuzovov passazhirskikh vagonov] // Problems of transport security: materials of VIII international scientific and practical conference. Part I / BSUT. Gomel, 2017. Pp. 159–160.
10. Skachkov A. N., Samoshkin S. L., Korshunov S. D. Influence of dimensional-weight parameters of passenger car bodies on flexural stiffness and parameters of flexural vibrations [Vliyaniye gabaritno-vesovykh parametrov kuzovov passazhirskikh vagonov na izgibnuyu zhestkost' i parametry izgibnykh kolebaniy] // Transport: science, education, production: collection of scientific papers. Vol. 1. Technical sciences / RGUPS. Rostov-on-Don, 2017. Pp. 254–257.

11. О безопасности железнодорожного подвижного состава : технический регламент Таможенного союза (ТР ТС 001/2011) / БелГИСС. Минск, 2012. 46 с.
12. Нормы для расчета и проектирования механической части новых и модернизированных вагонов метрополитенов СССР колеи 1520 мм. Москва : ВНИИВ ; ВНИИЖТ ; ММЗ, 1987. 95 с.
13. Нормы для проектирования, расчета и оценки прочности и динамики механической части вагонов метрополитена колеи 1520 мм (СТО СДС ОПЖТ-05–2010). Москва, 2010. 115 с.
14. Закс М. Н., Сала П., Краус В. Исследование прочности и жесткости кузова каркасного типа вагонов метрополитена // Тяжелое машиностроение. 2017. № 3. С. 8–11. ISSN 1024–7106.
15. Мнацаканов В. А. К истории отечественного метровагоностроения // Метро и тоннели. 2015. № 3. С. 28–33. ISSN 1726–6165.
16. ТУ 3183-108-058048-03-2016. Состав из вагонов метрополитена моделей 81-765, 81-766, 81-767. Технические условия / ОАО «Метровагонмаш». Мытищи, 2017. 115 с.
17. ГОСТ 19281–2014 Прокат повышенной прочности. Общие технические условия. Москва : Стандартинформ, 2015. 50 с.
18. ГОСТ 5582–75. Прокат тонколистовой коррозионно-стойкий, жаростойкий и жаропрочный. Технические условия. Москва : Изд-во стандартов, 2000. 12 с.
19. ГОСТ 380–2005. Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки. Москва : Стандартинформ, 2009. 8 с.
20. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Справочник по сопротивлению материалов / Ответственный редактор Г. С. Писаренко ; 2-е издание, переработанное и дополненное. Киев : Наукова думка, 1988. 736 с.
21. Вагон метрополитена серии 81-717.2К. Расчет на прочность кузова головного вагона. 717.2К.00.00.000PP-20–1 / ОАО «Метровагонмаш». Мытищи, 2016. 24 с.
22. ГОСТ 1055–2013.Metalloпродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия. Москва : Стандартинформ, 2014. 34 с.
23. Скачков А. Н., Самошкин С. Л., Коршунов С. Д. О необходимости интенсификации НИР по определению изгибной жесткости и параметров изгибных колебаний кузовов современных пассажирских вагонов // Техника и технологии наземного транспорта : сборник материалов конференции. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2018. С. 86–90.
11. Safety of railway rolling stock [O bezopasnosti zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava] : technical regulations of Customs Union (TR CU 001/2011) / BelGISS. Minsk, 2012. 46 p.
12. Regulations for calculation and design of mechanical part of new and modernized cars for the USSR subways with 1520 mm gauge [Normy dlya rascheta i proektirovaniya mekhanicheskoy chasti novykh i modernizirovannykh vagonov metropolitenov SSSR kolei 1520 mm]. Moscow : VNIIV ; VNIIZhT ; MMW, 1987. 95 p.
13. Regulations for design, calculation and assessment of strength and dynamics of mechanical part of 1520 mm gauge subway cars (STO SDS OPZhT-05–2010) [Normy dlya proektirovaniya, rascheta i otsenki prochnosti i dinamiki mekhanicheskoy chasti vagonov metropolitena kolei 1520 mm (STO SDS OPZhT-05–2010)]. Moscow, 2010. 115 p.
14. Zaks M. N., Sala P., Kraus V. Research of strength and stiffness of subway car frame-type body [Issledovanie prochnosti i zhestkosti kuzova karkasnogo tipa vagonov metropolitena] // Heavy machinery. 2017. No. 3. Pp. 8–11. ISSN 1024–7106.
15. Mnatsakanov V. A. History of domestic subway car engineering [K istorii otechestvennogo metrovagonostroeniya] // Subway and tunnels. 2015. No. 3. Pp. 28–33. ISSN 1726–6165.
16. TU 3183-108-058048-03-2016. Train set from subway cars of 81-765, 81-766, 81-767. Specifications [Sostav iz vagonov metropolitena modeley 81-765, 81-766, 81-767. Tekhnicheskie usloviya] / JSC Metrowagonmash. Mytishchi, 2017. 115 p.
17. GOST 19281–2014. High strength rolled steel. General specification [Prokat povyshennoy prochnosti. Obshhie tekhnicheskie usloviya]. Moscow : Standardinform, 2015. 50 p.
18. GOST 5582–75. Stainless and heat-resisting sheet. Specifications [Prokat tonkolistovoy korrozionno-stoykiy, zharostoykiy i zharoprochnyy. Tekhnicheskie usloviya]. Moscow : Publishing House of Standards, 2000. 12 p.
19. GOST 380–2005. Common quality carbon steel. Grades [Stal' uglerodistaya obyknovennogo kachestva. Marki]. Moscow : Standardinform, 2009. 8 p.
20. Pisarenko G. S., Yakovlev A. P., Matveev V. V. Handbook on strength of materials [Spravochnik po soprotivleniyu materialov] / Editor-in-chief G. S. Pisarenko ; 2nd edition, revised and enlarged. Kyiv : Naukova dumka, 1988. 736 p.
21. Subway car of 81-717.2K series. Calculation of head car on body strength. 717.2K.00.00.000RR-20–1 [Vagon metropolitena serii 81-717.2K. Raschet na prochnost' kuzova golovnogo vagona. 717.2K.00.00.000RR-20–1] / JSC Metrowagonmash. Mytishchi, 2016. 24 p.
22. GOST 1055–2013. Metal products from nonalloyed structural quality and special steels. General specification [Metalloproduksiya iz nelegirovannykh konstruksionnykh kachestvennykh i spetsial'nykh staley. Obshhie tekhnicheskie usloviya]. Moscow : Standardinform, 2014. 34 p.
23. Skachkov A. N., Samoshkin S. L., Korshunov S. D. On necessity of intensifying research on determination of flexural stiffness and parameters of flexural vibrations of modern passenger car bodies [O neobkhodimosti intensifikatsii NIR po opredeleniyu izgibnoy zhestkosti i parametrov izgibnykh kolebaniy kuzovov sovremennykh passazhirsikh vagonov] : proceedings of the conference. Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2018. Pp. 86–90.

Объем статьи 0,9 авторских листа

УДК 656.223

Виталий Сергеевич Колокольников, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,
 Инна Геннадьевна Слободянюк, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

ТЕХНОЛОГИЯ МАКРОМОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛИГОНОВ

Vitaliy Sergeevich Kolokolnikov, PhD in Engineering, Associate Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Inna Gennadyevna Slobodyanyuk, PhD in Engineering, Associate Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Technology of polygons macromodelling

Аннотация

В статье рассматривается технология макромоделирования железнодорожных полигонов. Обосновывается некорректность существующего подхода при расчете полигонов, вместо которого предлагается использовать макроструктурный. Представлены принципы укрупненного отображения структуры и технологии работы. Показано, как создавать в модели парки, станции, перегоны, моделировать процессы движения, обработки, накопления вагонов и поездов. Приведены основные задачи, решаемые с помощью модели.

Ключевые слова: полигонные технологии, имитационная модель, макромодель.

Summary

The paper considers the technology of railway polygons macromodelling. In the paper the authors substantiate the incorrectness of the existing approach in the polygons calculation and they propose to use a new macrostructural one. The paper presents principles of the enlarged representation of structure and operation technology. It shows how to create yards, stations and spans and how to model processes of movement, processing and accumulation of cars and trains. The authors also provide the main tasks that can be solved by the model.

Keywords: polygon technology, simulation model, macromodel.

DOI: 10.20291/1815-9400-2019-3-48-51

ПРОБЛЕМА РАСЧЕТА ПОЛИГОНОВ

Железнодорожным полигоном будем называть совокупность работающих по единой технологии станций, перегонов и участков, которая обеспечивает пропуск и переработку массовых потоков. Полигоны включают в себя сотни станций на протяжении нескольких тысяч километров. Управление движением поездопотоков, ритмами погрузки и выгрузки вагонов, использованием тяговых ресурсов — это задачи, от решения которых зависят основные показатели работы полигона. В условиях роста перевозок и недостатка инвестиций большое значение в обеспечении устойчивой работы имеют резервы, прежде всего динамические, т.е. резервы управления. По функции они замещают статические резервы вагонов, путей, груза. Чем более развито управление, тем менее необходимы реальные резервы для обеспечения той же надежности транспортного обслуживания [1].

Чтобы повысить эффективность работы полигонов, создаются центры управления тяговыми ресурсами. Но до настоящего времени железнодорожные полигоны не рассчитываются в едином комплексе. Пропускные и перерабатывающие способности перегонов и станций рассматриваются изолированно [2, 3]. К тому же на самих станциях парки и горловины рассчитываются отдельно. Считается, что узким местом будет тот элемент, пропускная способность которого минимальна. Однако на подробных имитационных моделях убедительно показано, что это ошибочный подход [4]. Системы, работающие по единой технологии, необходимо рассчитывать целиком и учитывать взаимное влияние элементов, управляемые связи и неравномерность выполнения процессов.

Большая протяженность полигонов и множество элементов делают построение подробных имитационных моделей излишне трудоемким. Вместе с тем для полигона подробное отображение является избыточным. Можно и укрупненно, но достаточно адекватно отобразить структуру, технологию и управление на полигоне. Для решения этой задачи разработан метод макроструктурного моделирования.

МАКРОСТРУКТУРНЫЙ ПОДХОД

В макро моделировании используется функциональный подход [5, 6]. Парк представляется бункером, чья емкость определяется количеством единиц потока (вагонов или поездов), которые могут в нем размещаться с учетом сохранения работоспособности. Возможно создание нескольких бункеров (или секторов одного бункера) для отображения особенностей технологии (рис. 1). Горловина не детализируется до каждой стрелки — в ней выделяются каналы, обеспечивающие независимые перемещения (рис. 2). Тогда единица потока, следуя по горловине и занимая определенные каналы, попадает в парк-бункер, где могут возникать задержки в ожидании свободности следующих элементов. Часть путей бункера — технологические. При выполнении на них операций занимают каналы обслуживания (функциональные). Маневровая работа проводится с занятием каналов в горловинах. Такое укрупненное представление структуры значительно облегчает процесс создания моделей сложных транспортных объектов. И при этом сохраняется важное преимущество моделирования — отображение связи структуры и технологии. Кроме того, как и в подробных моделях, существует возможность показывать управление и случайные процессы.

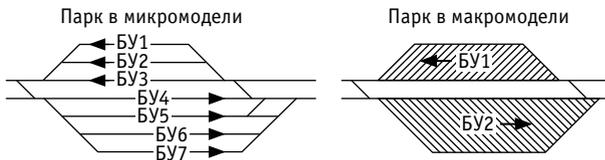


Рис. 1. Представление парка в микро- и макро модели

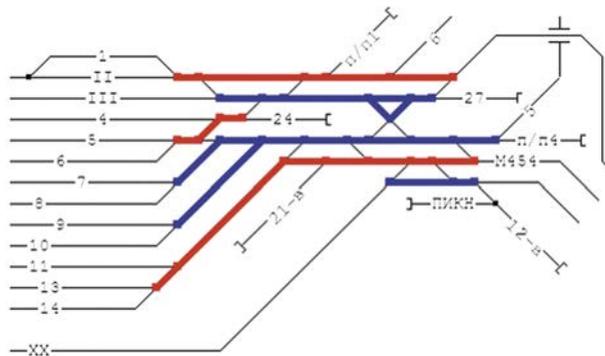


Рис. 2. Выделение структурных каналов в горловине

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛИГОНА

Использование макро структурного подхода при отображении станций и добавление в модель перегонов позволяет соединять между собой сотни станций, образуя железнодорожный полигон. Станции состоят из отдельных парков, связанных горловинами (рис. 3). Если какие-то парки не участвуют в работе полигона, их можно не показывать, что экономит время на создание модели и на выполнение экспериментов. Редактор позволяет создавать модели станций различной конфигурации — с параллельным, последовательным и комбинированным расположением парков (рис. 4).

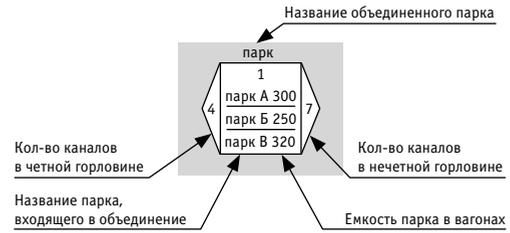


Рис. 3. Многопарковая станция в макро модели

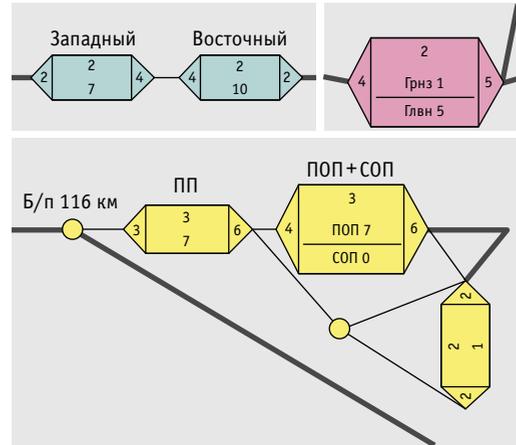


Рис. 4. Варианты представления станций

Для парков задаются важные параметры: функциональная вместимость, количество каналов в горловинах и число ходовых путей. На станциях отображается работа маневровых локомотивов и бригад, обслуживающих поезда. Редактор также должен предусматривать возможность указывать назначения вагонов и поездов, их категории и другие характеристики. Для межпарковых соединений и перегонов отображается число главных путей и время выполнения технологических перерывов (окон).

Технологический процесс представляется в модели совокупностью отдельных операций, связанных в цепочки. Связи могут быть как линейными, так и разветвленными, если операции выполняются одновременно (рис. 5).

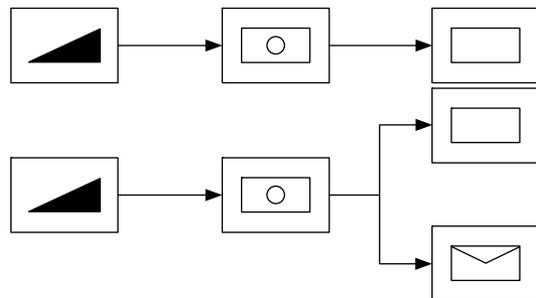


Рис. 5. Технологические цепочки

Переход между операциями выполняется безусловно либо в соответствии с заданным условием. При помощи условий моделируется диспетчерское управление [7].

Операции делятся на два принципиальных класса: операции перемещения и операции на пути. Первые описывают поездные и маневровые передвижения, вторые выполняются в парке и либо занимают функциональный канал обслуживающего персонала, либо просто сдвигают время выполнения следующей операции. Все операции привязываются к схеме путевого развития с указанием занимаемых элементов, назначений, используемых ресурсов. Операции могут иметь приоритеты, с их помощью имитируется диспетчерское управление технологическим процессом.

В макромоделе полигона необходимо описывать всю поездную работу, а также маневры, обеспечивающие выполнение поездных операций (такие, как подача и уборка поездного локомотива, формирование состава и т.д.). Остальную маневровую работу имеет смысл показывать только тогда, когда она непосредственно оказывает влияние на поездное движение и может вызвать задержки при пропуске поездов.

Моделирование работы сортировочного парка имеет свои особенности [8]. Заполнение может быть разным (рис. 6). Однако чем больше вагонов в парке, тем вероятнее будет накоплен состав (рис. 7). В макромоделе полигона прибывшие на станцию поезд расформируются на горке, после чего вагоны поступают в сортировочный парк. В зависимости от количества вагонов (можно разделить емкость парка по направлениям сортировки) с той или иной степенью вероятности образуется новый состав, который затем обслуживается в парке отправления. Готовый поезд следует далее по полигону.

В зависимости от целей исследования можно отобразить слежение за поездными локомотивами. Тогда в модели необходимо предусматривать и операции, управляющие оборотом локомотивов [9].

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ

Из принятых допущений становится ясно, что макромоделю полигона не может установить, какой, например, стрелочный перевод является узким местом. Но этого и не требуется. Макромоделирование предназначено для оценки соответствия структуры и технологии работы на полигонах [10]. Определяются станции, а так-

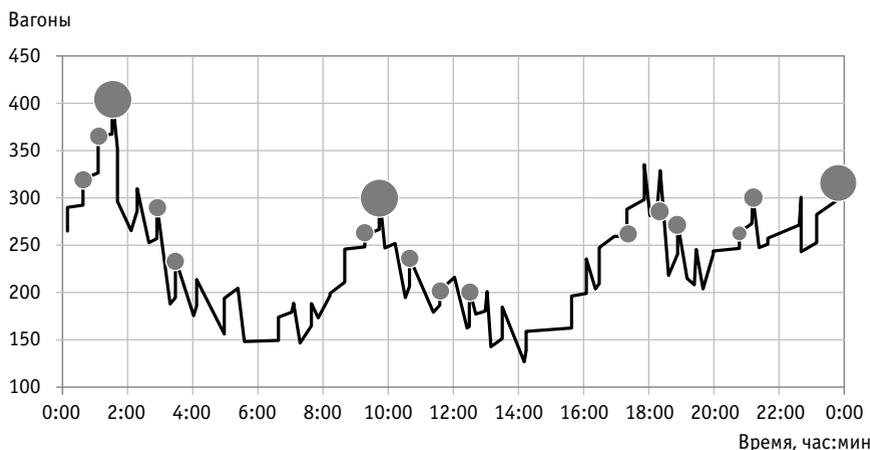


Рис. 6. Динамика количества вагонов и моменты накопления составов в сортировочном парке (крупными точками обозначено одновременное окончание накопления двух составов)

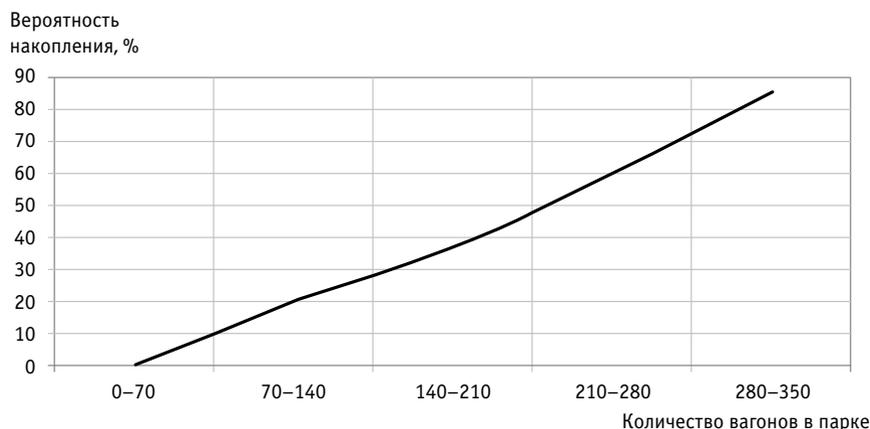


Рис. 7. Вероятность накопления состава в зависимости от количества вагонов

же пути, горловины и перегоны в составе полигона, ограничивающие пропускную и перерабатывающую способность. Перечислим лишь некоторые задачи, которые решаются с помощью макромодела полигона:

- определение количества и местоположения отдельных пунктов, а также их типов (поперечный, полупродольный, продольный, комбинированный) с учетом местных условий, технологии работы и размеров движения;

- определение необходимого количества путей и их вместимости, а также числа локомотивов, осмотрщиков и т.п.;
- оценка схемных решений горловин для необходимого обеспечения параллельности операций;

- сравнение и выбор вариантов строительства и реконструкции станций;

- расчет пропускной и перерабатывающей способности участков и станций, выявление узких мест и разработка предложений по их ликвидации;

- определение рациональной этапности реконструкции.

Таким образом, использование макромоделирования при расчете больших полигонов железнодорожного транспорта представляет собой весьма перспективное направление. Оно может служить инструментом для обоснования инвестиций и позволяет существенно повышать качество проектных работ.

Литература

1. Козлов П. А., Колокольников В. С. Расчет и оптимизация полигонов железнодорожного транспорта // Вестник РГУПС. 2018. № 3. С. 113–120. ISSN 0201–727X.
2. Козлов П. А., Колокольников В. С. О согласованном структурно-функциональном построении железнодорожных станций // Наука и техника транспорта. 2017. № 3. С. 106–110. ISSN 2074–9325.
3. Козлов П. А., Колокольников В. С., Тушин Н. А. О загрузке стрелок и пропускной способности горловин // Транспорт Урала. 2016. № 4 (51). С. 3–7. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-3-7. ISSN 1815–9400.
4. Козлов П. А., Тушин Н. А., Колокольников В. С. Расчет параметров гармонически построенной сети железных дорог // Железнодорожный транспорт. 2018. № 12. С. 18–21. ISSN 0044–4448.
5. Козлов П. А., Колокольников В. С. Макроструктурный подход в исследовании железнодорожных станций // Транспорт Урала. 2017. № 2 (53). С. 3–7. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-3-7. ISSN 1815–9400.
6. Слободянюк И. Г. Функциональный подход к моделированию транспортных систем // Транспорт Урала. 2017. № 2 (53). С. 96–101. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-96-101. ISSN 1815–9400.
7. Технология макро моделирования транспортных узлов / П. А. Козлов, Н. А. Тушин, В. Ю. Пермикин, И. Г. Слободянюк // Транспорт Урала. 2014. № 3 (42). С. 3–6. ISSN 1815–9400.
8. Слободянюк И. Г. Технология макро моделирования железнодорожных станций и узлов : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Екатеринбург, 2019. 20 с.
9. Козлов П. А., Колокольников В. С. Структурно-функциональная оптимизация больших полигонов железнодорожного транспорта // Транспорт Урала. 2018. № 3 (58). С. 3–7. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-3-3-7. ISSN 1815–9400.
10. Козлов П. А., Осокин О. В., Колокольников В. С. Исследование проектов развития железнодорожных станций и полигонов с помощью имитационного моделирования // Железнодорожный транспорт. 2018. № 6. С. 12–16. ISSN 0044–4448.

References

1. Kozlov P. A., Kolokolnikov V. S. Calculation and optimization of railway polygons [Raschet i optimizatsiya poligonov zheleznodorozhnogo transporta] // Vestnik RGUPS. 2018. No. 3. Pp. 113–120. ISSN 0201–727X.
2. Kozlov P. A., Kolokolnikov V. S. On coordinated structural and functional designing of railway stations [O soglasovannom strukturno-funktsional'nom postroenii zheleznodorozhnykh stantsiy] // Science and technology in transport. 2017. No. 3. Pp. 106–110. ISSN 2074–9325.
3. Kozlov P. A., Kolokolnikov V. S., Tushin N. A. On the loading of points and station neck capacity [O zagruzke strelok i propusknoy sposobnosti gorlovin] // Transport of the Urals. 2016. No. 4 (51). Pp. 3–7. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-3-7. ISSN 1815–9400.
4. Kozlov P. A., Tushin N. A., Kolokolnikov V. S. Calculation of parameters of harmoniously constructed railway network [Raschet parametrov garmonicheskii postroennoy seti zheleznykh dorog] // Railway Transport. 2018. No. 12. Pp. 18–21. ISSN 0044–4448.
5. Kozlov P. A., Kolokolnikov V. S. Macrostructural approach in research of railway stations [Makrostrukturnyy podkhod v issledovanii zheleznodorozhnykh stantsiy] // Transport of the Urals. 2017. No. 2 (53). Pp. 3–7. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-3-7. ISSN 1815–9400.
6. Slobodyanyuk I. G. Functional approach to modeling transport systems [Funktsional'nyy podkhod k modelirovaniyu transportnykh sistem] // Transport of the Urals. 2017. No. 2 (53). Pp. 96–101. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-96-101. ISSN 1815–9400.
7. Transport hub macromodelling technology [Tekhnologiya makromodelirovaniya transportnykh uzlov] / P. A. Kozlov, N. A. Tushin, V. Yu. Permikin, I. G. Slobodyanyuk // Transport of the Urals. 2014. No. 3 (42). Pp. 3–6. ISSN 1815–9400.
8. Slobodyanyuk I. G. Technology of railway stations and nodes macromodelling [Tekhnologiya makromodelirovaniya zheleznodorozhnykh stantsiy i uzlov] : Synopsis of PhD in Engineering Thesis. Ekaterinburg, 2019. 20 p.
9. Kozlov P. A., Kolokolnikov V. S. Structural functional optimization of large railway testing grounds [Strukturno-funktsional'naya optimizatsiya bol'shikh poligonov zheleznodorozhnogo transporta] // Transport of the Urals. 2018. No. 3 (58). Pp. 3–7. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-3-3-7. ISSN 1815–9400.
10. Kozlov P. A., Osokin O. V., Kolokolnikov V. S. Investigation of railway stations and polygons development projects using simulation modelling [Issledovanie projektov razvitiya zheleznodorozhnykh stantsiy i poligonov s pomoshh'yu imitatsionnogo modelirovaniya] // Railway Transport. 2018. No. 6. Pp. 12–16. ISSN 0044–4448.

Объем статьи 0,46 авторских листа

УДК 681.518.5:004.052.32

Алексей Николаевич Ковкин, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ УПРАВЛЯЮЩИХ СИГНАЛОВ В ДУБЛИРОВАННОЙ БЕЗОПАСНОЙ СИСТЕМЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ СХЕМ

Alexey Nikolaevich Kovkin, PhD in Engineering, Associate Professor, Senior Researcher, Automation and Telemechanics on the Railway Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU), St. Petersburg, Russia

Practical implementation of the logical processing of control signals in a duplicated safety system with the use of converter circuits

Аннотация

В статье рассмотрены принцип построения безопасного логического элемента «И» с использованием преобразовательных схем и практическая реализация отдельных узлов этого элемента. Представлена методика расчета конденсаторных преобразователей полярности, учитывающая особенности разработки одноконтурных и двухконтурных схем и позволяющая оценить энергетическую эффективность устройств. Кроме того, освещены вопросы, связанные с безопасностью логического элемента при возникновении отказов, а также приведены расчетные соотношения, с помощью которых можно определить остаточное напряжение на выходе устройства, вызванное воздействием дестабилизирующих факторов.

Ключевые слова: дублированная безопасная структура, динамический сигнал, безопасный логический элемент, конденсаторный преобразователь полярности, обратноходовой преобразователь, параметрическая безопасность, остаточное напряжение.

Summary

This paper describes the principle of constructing a safe logical element «and» using converter schemes and practical implementation of individual nodes of the logical element. The method of calculation of capacitor polarity converters, taking into account the features of the calculation of one-stroke and push-pull circuits, allows to assess the energy efficiency of devices. In addition, in this publication, the issues related to the safety of the logic element in the conditions of failure, as well as the calculated ratios to estimate the value of the residual voltage at the output of the device resulting from the impact of destabilizing factors.

Keywords: duplicated safe structure, dynamic signal, safe logic gate, capacitor polarity converter, fly-back converter, parametric safety, residual voltage.

DOI: 10.20291/1815-9400-2019-3-52-58

ВВЕДЕНИЕ

Внутреннюю безопасность микропроцессорных систем железнодорожной автоматики обеспечивают многоканальные вычислительные устройства, выходные сигналы которых, как правило, имеют динамический (импульсный) характер. Это необходимо для исключения опасных ситуаций при возникновении отказов, когда на выходе вычислительных средств постоянно присутствуют константные сигналы в виде логического нуля или единицы. Широкое распространение получили дублированные безопасные структуры, работающие по принципу «два из двух», т.е. активизация исполнительного объекта управления происходит только при наличии соответствующих сигналов в обоих каналах системы [1]. Для осуществления этого принципа необходимо иметь в составе аппаратуры безопасные логические элементы (БЛЭ), реализующие функцию «И». Основное требование к БЛЭ, применяемым в дублированных безопасных структурах, — невозможность формирования выходного сигнала, активизирующего исполнительный объект, при отсутствии динамического сигнала хотя бы на одном из входов вне зависимости от наличия отказов в схеме. Из этого следует, что для построения логических элементов должны использоваться схемные решения с несимметричным отказом.

Безопасная реализация логических функций возможна за счет применения различных схемных решений с внешним тактированием, построенных на оптронах, диодах и конденсаторах [2]. Однако такие схемы ориентированы на работу с некодированными логическими переменными (константными сигналами), что затрудняет реализацию безопасных систем. В полной мере изложенным выше требованиям удовлетворяют логические элементы на основе автогенераторных схем, например логический модуль Logisafe, содержащий в своем составе блокинг-генератор на транзисторах [3]. Для функционирования этого логического элемента не имеют значения фазовые соотношения между входными сигналами, что позволяет использовать его при отсутствии жесткой синхронизации вы-

числительных комплектов. Наличие константных сигналов на входах не приводит к возникновению опасных ситуаций. Однако для построения подобных логических схем требуется большое количество трансформаторов, что отрицательно влияет на технологичность и габаритные показатели устройств, особенно при низкой частоте динамических сигналов. Кроме того, для исключения опасных ситуаций при накоплении отказов рекомендуется использовать в схеме весьма дефицитный компонент — четырехвыводные конденсаторы [1].

Таким образом, представляет интерес поиск иных решений, в полной мере обеспечивающих безопасность и способных работать в вычислительных структурах, не предусматривающих жесткой синхронизации сигналов. Важнейшими ориентирами для достижения высокого технического уровня аппаратных средств можно считать возможность реализации устройств в малых габаритах, минимальное число точечных изделий в составе логического элемента, а также отсутствие уникальной комплектации, не выпускаемой промышленностью в массовых количествах.

ЛОГИЧЕСКИЙ ЭЛЕМЕНТ «И» С ДВУМЯ ВХОДАМИ НА ОСНОВЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Один из эффективных способов реализации безопасного логического элемента «И» с двумя входами — совместное использование нескольких схем, осуществляющих преобразование постоянного напряжения [4]. На рис. 1 представлена функциональная схема БЛЭ с тремя преобразователями — двумя входными и одним выходным. Первые осуществляют контроль наличия динамических сигналов на входах БЛЭ и представляют собой конденсаторные преобразователи полярности (КПП), широко используемые в различных схмотехнических решениях с несимметричным отказом. Выходной преобразователь формирует постоянное напряжение и является обратноточковым преобразователем (ОХП), включающим в себя малогаба-

ритный импульсный трансформатор на ферритовом сердечнике. Следует отметить, что нет принципиальных ограничений для использования в выходном преобразователе иных технических решений с трансформаторами, однако применение ОХП — предпочтительный вариант в силу минимального количества элементов. При поступлении на входы БЛЭ динамических сигналов от вычислительной системы КПП формируют постоянные напряжения. Эти напряжения обеспечивают работу управляющего генератора и выходного преобразователя. Если на одном из входов БЛЭ динамический сигнал отсутствует, то выходной преобразователь не получает управляющее воздействие или исходное напряжение, следовательно, сигнал на выходе БЛЭ также будет отсутствовать.

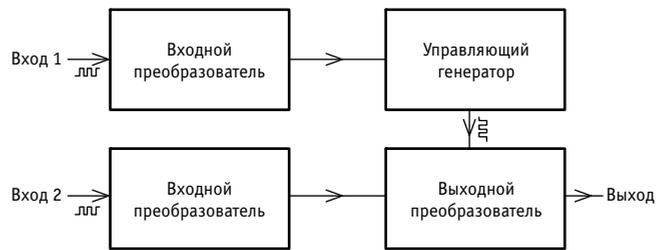


Рис. 1. Функциональная схема безопасного логического элемента

Входные сигналы БЛЭ представляют собой периодические последовательности импульсов, частота которых находится в диапазоне, оптимальном для схем на переключаемых конденсаторах [5]. Выходным сигналом является постоянное напряжение, величина которого зависит от области применения БЛЭ.

Далее рассматриваются схемные решения функциональных узлов, входящих в состав БЛЭ. Простейшая схема КПП имеет вид, представленный на рис. 2. Такое решение достаточно часто используется для построения безопасных схем в аппаратуре железнодорожной автоматики [6].

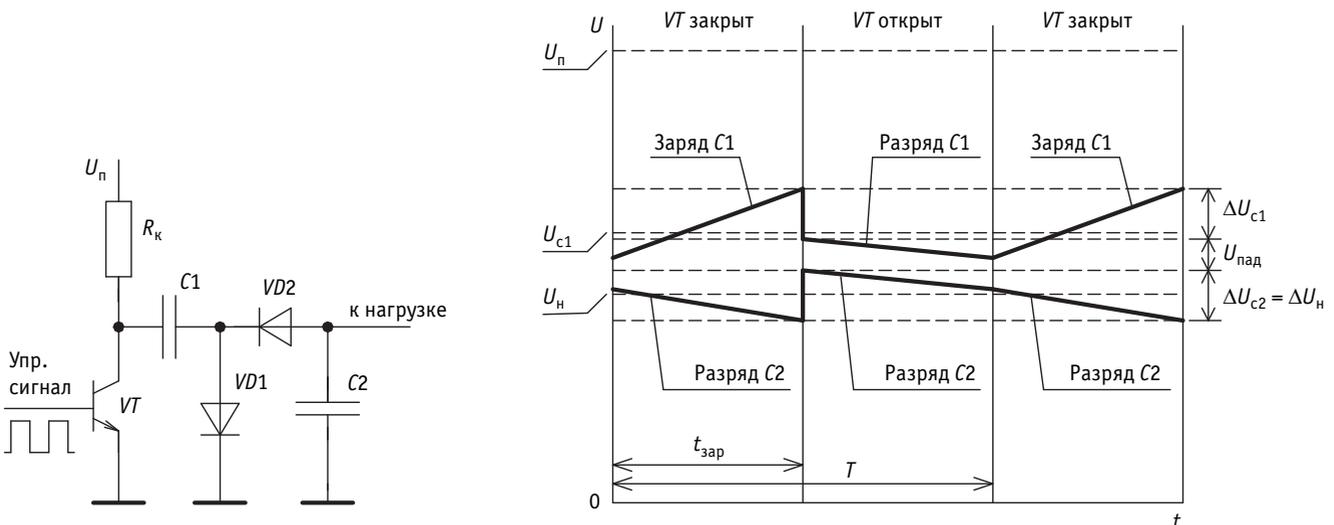


Рис. 2. Конденсаторный преобразователь полярности с одноктактным усилительным каскадом

Количественный анализ работы подобных схем в установленном режиме основывается на том допущении, что при малых величинах пульсаций изменение напряжения на конденсаторах в процессе заряда и разряда имеет линейный характер и скорость изменения напряжения пропорциональна среднему значению тока через конденсатор [5, 6]. Наглядно отобразить процессы, происходящие в схеме, можно с помощью временной диаграммы, на которой напряжения на конденсаторах приводятся без учета полярности (см. рис. 2). Величина изменения напряжения ΔU , В, на конденсаторе емкостью C , Ф, в процессе заряда и разряда током I , А, в течение времени t , с, определяется известным выражением:

$$\Delta U = \frac{It}{C}. \quad (1)$$

Для процесса передачи заряда от конденсатора C_1 к конденсатору C_2 при открытии транзистора справедливо соотношение

$$\frac{\Delta U_{C1}}{\Delta U_{C2}} = \frac{C_2}{C_1}. \quad (2)$$

В установленном режиме работы схемы увеличение напряжения на конденсаторе C_1 в процессе заряда от источника питания компенсирует снижение напряжения на конденсаторе C_1 вследствие передачи заряда на конденсатор C_2 и последующего разряда совместно с конденсатором C_2 на нагрузку. Увеличение напряжения на конденсаторе C_2 при передаче заряда от C_1 уравнивает уменьшение напряжения на C_2 в процессе разряда на нагрузку. Результирующую емкость при совместном разряде конденсаторов на нагрузку можно считать равной сумме емкостей конденсаторов. Таким образом, с учетом (1) и (2) запишем

$$\frac{I_{\text{зар}} t_{\text{зар}}}{C_1} = \frac{C_2}{C_1} \left(\frac{I_{\text{H}}(T - t_{\text{зар}})}{C_1 + C_2} + \frac{I_{\text{H}} t_{\text{зар}}}{C_2} \right) + \frac{I_{\text{H}}(T - t_{\text{зар}})}{C_1 + C_2}, \quad (3)$$

где $I_{\text{зар}}$ — среднее значение тока заряда конденсатора C_1 , А;
 $t_{\text{зар}}$ — время заряда конденсатора C_1 , с;
 I_{H} — среднее значение тока нагрузки, А;
 T — период работы преобразовательной схемы, с.
Преобразовав выражение (3), получим

$$I_{\text{H}} = I_{\text{зар}} \frac{t_{\text{зар}}}{T}, \quad (4)$$

т. е. соотношение среднего тока нагрузки и среднего тока заряда конденсатора C_1 определяется исключительно временными параметрами управляющего сигнала.

При малых пульсациях величину тока заряда достаточно точно описывает выражение

$$I_{\text{зар}} = \frac{U_{\text{П}} - U_{\text{H}} - U_{\text{пад}} - \frac{\Delta U_{\text{H}}}{2}}{R_{\text{К}}}, \quad (5)$$

где $U_{\text{П}}$ — напряжение источника питания, В;
 U_{H} — среднее значение напряжения на нагрузке, В;
 $U_{\text{пад}}$ — суммарное падение напряжения на всех полупроводниковых элементах, В;
 ΔU_{H} — величина пульсаций напряжения на нагрузке схемы, В;
 $R_{\text{К}}$ — сопротивление резистора в цепи коллектора транзистора, Ом.

Для дальнейшего анализа введем понятие относительной продолжительности заряда, выразив ее безразмерной величиной $k_{\text{зар}}$:

$$k_{\text{зар}} = \frac{t_{\text{зар}}}{T}. \quad (6)$$

Тогда напряжение на нагрузке U_{H} будет определяться выражением

$$U_{\text{H}} = \left(U_{\text{П}} - U_{\text{пад}} - \frac{\Delta U_{\text{H}}}{2} \right) \frac{k_{\text{зар}} R_{\text{H}}}{R_{\text{К}} + k_{\text{зар}} R_{\text{H}}}, \quad (7)$$

где R_{H} — сопротивление нагрузки, Ом.

Из выражения (7) видно, что повышать напряжение на нагрузке при заданной величине потерь на полупроводниковых элементах и пульсаций напряжения можно не только за счет снижения сопротивления в цепи коллектора, но и за счет увеличения относительной продолжительности заряда.

Емкость конденсаторов в схеме КПП выбирают исходя из допустимой величины пульсаций напряжения. Величину пульсаций напряжения на нагрузке преобразовательной схемы ΔU_{H} можно определить следующим образом:

$$\Delta U_{\text{H}} = \frac{I_{\text{H}}(T - t_{\text{зар}})}{C_1 + C_2} + \frac{I_{\text{H}} t_{\text{зар}}}{C_2}. \quad (8)$$

При рассмотрении возможности применения простейшей схемы преобразования для решения конкретной задачи важно оценить возникающие в ней потери энергии. Основные потери связаны с рассеянием мощности на резисторе. Среднее значение этой мощности включает в себя две составляющие: мощность, рассеиваемую при открытом транзисторе, и мощность, выделяющуюся в процессе заряда конденсатора C_1 при закрытом транзисторе. Для расчета среднего значения мощности на резисторе P_{R} Вт, можно воспользоваться формулой

$$P_{\text{R}} = \frac{U_{\text{П}}^2(1 - k_{\text{зар}})}{R_{\text{К}}} + \frac{(U_{\text{П}} - U_{\text{H}} - U_{\text{пад}})^2 k_{\text{зар}}}{R_{\text{К}}}. \quad (9)$$

К числу серьезных недостатков простейшей преобразовательной схемы с однократным усилительным каскадом (см. рис. 2) относятся большая величина потерь на резисторе $R_{\text{К}}$, а также то, что выходное напряжение получается существенно меньше напряжения источника питания. Использование такой схемы оправдано в тех случаях, когда напряжение источника питания значительно больше требуемого напряжения нагрузки и ток нагрузки не превышает нескольких мА.

Существенно повысить эффективность работы КПП можно за счет добавления усилительного элемента, позволяющего ускорить процесс заряда конденсатора $C1$. Практически это достигается путем применения двухтактных транзисторных каскадов. Один из возможных вариантов такой преобразовательной схемы представлен на рис. 3. Транзисторы $VT1$ и $VT2$ образуют двухтактный усилительный каскад, обеспечивающий быстрый заряд конденсатора. Диод $VD1$ образует цепь для передачи заряда от одного конденсатора к другому. При закрытом транзисторе $VT1$ ток, протекающий через резистор, способствует открытию транзистора $VT2$.

Ток эмиттера $VT2$ обеспечивает интенсивный заряд конденсатора $C1$, в результате чего напряжение на конденсаторе становится близким к напряжению источника питания. При открытии $VT1$ транзистор $VT2$ закрывается, и через диоды $VD1$ и $VD3$ происходит передача заряда от конденсатора $C1$ к конденсатору $C2$, аналогично тому как это осуществляется в рассмотренной схеме с одним транзистором. За счет того что конденсатор $C1$ в каждом цикле работы успевает зарядиться почти до напряжения питания схемы, напряжение на нагрузке будет близким к напряжению питания. Временная диаграмма, поясняющая работу схемы, приведена на рис. 3.

Напряжение на нагрузке конденсаторного преобразователя полярности с двухтактным усилительным каскадом достаточно точно может быть рассчитано следующим образом:

$$U_H = U_{\Pi} - U_{\text{пад}} - \frac{3\Delta U_H}{2}, \quad (10)$$

где $U_{\text{пад}}$ — суммарное падение напряжения на открытых транзисторах $VT1$, $VT2$, а также на диодах $VD1$, $VD2$, $VD3$, В.

Для определения величины пульсаций в рассматриваемой преобразовательной схеме полностью применима формула (8), которая используется для простейшей схемы с одним транзистором. Выбор величины сопротивления резистора R_k производится исходя из того, что для обеспечения надлежащего заряда конденсатора $C1$ постоянная времени цепи заряда долж-

на быть в несколько раз меньше времени заряда конденсатора. Удовлетворительный результат может быть достигнут, если величина сопротивления выбирается с применением формулы

$$R_k = \frac{t_{\text{зар}} h_{21э}}{3C_1}, \quad (11)$$

где $h_{21э}$ — коэффициент усиления по току транзистора $VT2$.

В процессе заряда конденсатора $C1$ в установившемся режиме напряжение на резисторе имеет весьма малую величину. Поэтому среднее значение мощности на резисторе определяется в основном мощностью, рассеиваемой при открытом транзисторе $VT1$, и рассчитывается следующим образом:

$$P_R = \frac{U_{\Pi}^2 (T - t_{\text{зар}})}{R_k T}. \quad (12)$$

Схема с двухтактным усилительным каскадом характеризуется относительно небольшими потерями энергии и может эффективно использоваться при токах нагрузки до нескольких десятков мА.

В основе схемотехники управляющего генератора и выходного преобразователя лежат решения, широко применяемые в электронной аппаратуре различного назначения. Управляющий генератор может быть реализован на цифровой логической интегральной микросхеме (ИМС) КМОП-структуры (рис. 4а). Выходной преобразователь выполняется по известной схеме однотактного обратного преобразователя напряжения (рис. 4б) [7].

В качестве коммутационного элемента предпочтительно использование n -канального МДП-транзистора. Для защиты транзистора от воздействия ЭДС самоиндукции, возникающей на индуктивности рассеяния трансформатора, в схеме могут быть предусмотрены элементы, ограничивающие величину напряжения на запирающемся транзисторе. Количественный анализ схемы преобразователя выполняется с применением известных методик расчета ОХП [8] и в данной статье не рассматривается.

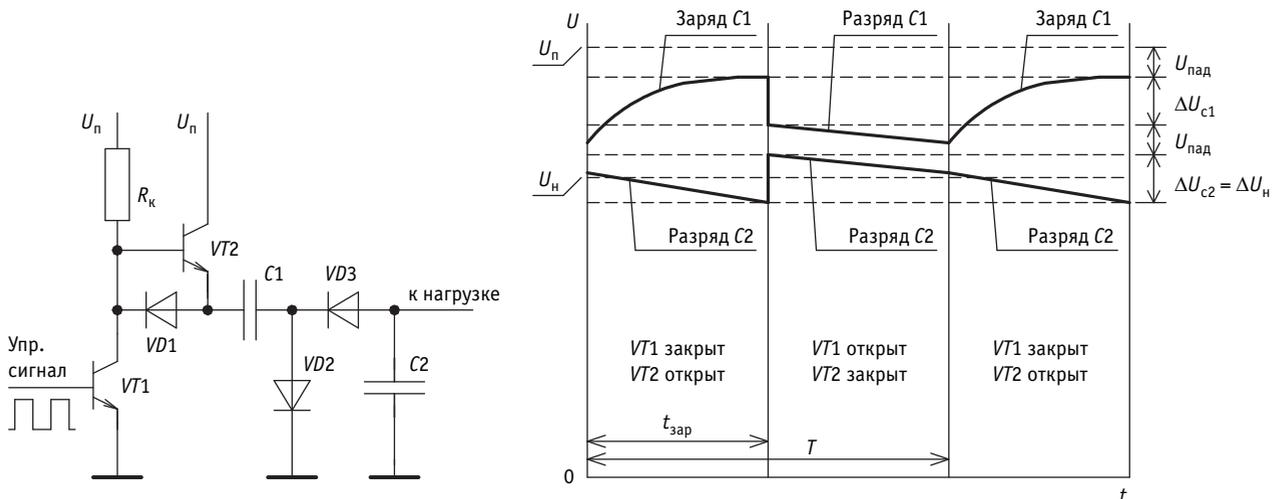


Рис. 3. Конденсаторный преобразователь полярности с двухтактным усилительным каскадом

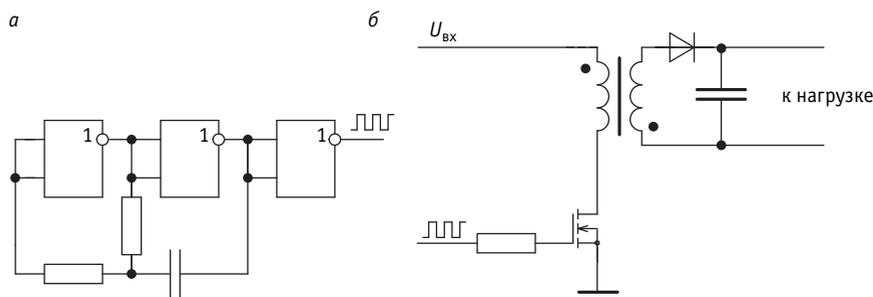


Рис. 4. Примеры схемотехнических решений управляющего генератора (а) и выходного преобразователя (б)

Параметры элементов во входных цепях БЛЭ, а также в схеме управляющего генератора выбираются в соответствии с общеизвестными методиками исходя из условий обеспечения ключевого режима работы транзисторов, заданных входных характеристик схемы и получения необходимой частоты импульсов на силовом ключе выходного преобразователя.

БЕЗОПАСНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СХЕМЫ ЛОГИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ ОТКАЗОВ

Обязательное условие формирования выходного напряжения БЛЭ — динамическая работа всех коммутационных элементов схемы. Нетрудно убедиться, что если входные динамические сигналы отсутствуют, то напряжения на выходе БЛЭ не будет при любых неисправностях в схеме. Например, пробой нескольких элементов в схеме КПП может привести к появлению напряжения на выходе преобразовательной схемы. Однако полярность этого напряжения не будет соответствовать требуемой, а значит, нагрузка КПП функционировать не станет. Также очевидно, что пробой силового ключа выходного преобразователя неопасен, поскольку в схеме предусмотрен трансформатор.

Иначе обстоит дело, когда возникают отказы и присутствует динамический сигнал на каком-либо из входов. Одна из ситуаций, требующих особого внимания, — пробой транзистора ОХП при наличии сигнала на входе КПП. Напряжение на выходе КПП имеет пульсирующий характер. Частота пульсаций равна частоте входного сигнала. В результате пробоя транзистора возможна трансформация переменной составляющей пульси-

рующего напряжения в выходную цепь БЛЭ, что может привести к ложной активизации управляемых объектов. Для противодействия этому явлению в схеме предусмотрена частотная защита: рабочая частота ОХП на порядок больше частоты входных сигналов.

Кроме того, при накоплении отказов в схеме ОХП становится возможной трансформация импульсов управляющего генератора в выходную цепь БЛЭ. Опасное воздействие на управляемые объекты в подобной ситуации будет исключено, если мощность импульсного сигнала на выходе генератора окажется недостаточной для активизации нагрузки БЛЭ.

Важно подчеркнуть, что в описанных выше ситуациях напряжение на выходе БЛЭ не будет равно нулю. Поэтому необходимо иметь возможность убедиться в параметрической безопасности — способности устройства удерживать в безопасных пределах величины электрических воздействий, обусловленных дестабилизирующими факторами [9]. Таким образом, оценка безопасности схемотехнического решения БЛЭ должна включать в себя расчет величины остаточных напряжений на выходе ОХП в случае воз-

никновения нескольких отказов в сочетании с наличием сигнала на одном из входов схемы.

Безопасность при воздействии пульсаций на вход ОХП реализуется за счет насыщения сердечника трансформатора, который в этом случае работает как нелинейный элемент, ограничивающий величину напряжения. Модель, отображающая низкочастотное воздействие на трансформатор при наихудших условиях, выглядит так, как показано на рис. 5а. В качестве коммутационного элемента в данной модели выступает транзистор VT2 конденсаторного преобразователя полярности.

Поскольку транзистор подключает к обмотке трансформатора отрицательный полюс источника питания, схема работает как прямоходовой преобразователь напряжения. Процессы, происходящие в преобразователе, можно описать известной формулой трансформаторной ЭДС для одноконтурной схемы [7]:

$$U_a = \frac{1}{q} w f S k_c (B_{\max} - B_r), \quad (13)$$

где U_a — амплитуда напряжения на обмотке трансформатора, В;

$q = t_w / T$ — коэффициент заполнения (отношение длительности импульса напряжения t_w , действующего на обмотку трансформатора, к периоду переключения T);

w — количество витков обмотки;
 f — частота преобразования, Гц;
 S — площадь сечения сердечника, м²;
 B_{\max} — максимальное значение магнитной индукции в сердечнике, Тл;
 B_r — величина остаточной индукции, Тл.

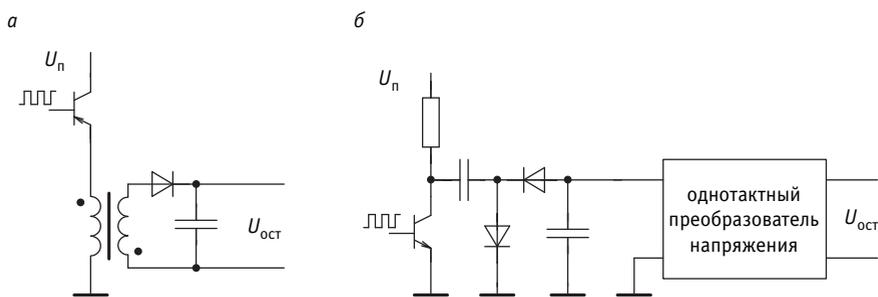


Рис. 5. Модели для расчета остаточного напряжения на выходе безопасного логического элемента при возникновении отказов

Если B_{\max} принять равным индукции насыщения используемого магнитного материала, то формула (13) будет отражать максимальную величину напряжения на обмотке трансформатора, которое может быть сформировано без насыщения сердечника. Поскольку часть напряжения вторичной обмотки будет теряться на выпрямительном диоде, а относительная длительность импульса в рассматриваемых схемах близка к 0,5, остаточное напряжение на нагрузке $U_{\text{ост}}$ можно вычислить следующим образом:

$$U_{\text{ост}} = 2w_2 f S (B_{\max} - B) - U_{VD}, \quad (14)$$

где w_2 — количество витков вторичной обмотки трансформатора;

U_{VD} — падение напряжения на выпрямительном диоде, В.

Определить величину остаточного напряжения при трансформации импульсов управляющего генератора можно с помощью модели, представленной на рис. 5б. Однотактный преобразователь в данном случае образован схмотехникой управляющего генератора и трансформатором выходного преобразователя. Если считать, что однотактный преобразователь в этой модели работает с коэффициентом заполнения, равным 0,5, величину остаточного напряжения $U_{\text{ост}}$ можно выразить через выходное напряжение конденсаторного преобразователя $U_{\text{нкпп}}$ [7, 8]:

$$U_{\text{ост}} = \frac{1}{n} U_{\text{нкпп}}, \quad (15)$$

где n — коэффициент трансформации, определяемый как отношение количества витков первичной и вторичной обмотки трансформатора (w_1 и w_2 соответственно),

$$n = \frac{w_1}{w_2}. \quad (16)$$

Сопротивление нагрузки конденсаторного преобразователя $R_{\text{нкпп}}$, Ом, связано с сопротивлением нагрузки БЛЭ $R_{\text{нблэ}}$, Ом, соотношением

$$R_{\text{нкпп}} = n^2 R_{\text{нблэ}}. \quad (17)$$

Тогда, принимая во внимание (7) и учитывая падение напряжения на выпрямительном диоде в выходной цепи U_{VD} , В, используем следующее выражение для остаточного напряжения:

$$U_{\text{ост}} = \left(U_{\text{п}} - U_{\text{пад}} - \frac{\Delta U_{\text{нкпп}}}{2} \right) \times \frac{k_{\text{зар}} R_{\text{нблэ}} n^2}{n(R_{\text{к}} + k_{\text{зар}} R_{\text{нблэ}} n^2)} - U_{VD}. \quad (18)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одно из эффективных решений реализации логической обработки сигналов в дублированных безопасных структурах — использование логических устройств, построенных на основе преобразовательных схем. Двухвходовой логический элемент «И» получается путем объединения трех преобразовательных схем, две из которых преобразуют полярность постоянного напряжения, а третья передает постоянное напряжение на выход логического устройства через трансформатор. Один из преобразователей полярности создает условия для питания управляющего генератора, обеспечивающего работу выходного преобразователя, и для его построения используется простейшая конденсаторная схема. Другой преобразователь полярности формирует напряжение, которое через трансформаторную схему преобразования передается на выход схемы. Этот преобразователь принимает непосредственное участие в передаче энергии источника питания в нагрузку логического элемента. Поэтому для его построения используется конденсаторный преобразователь с двухтактным транзисторным каскадом, обеспечивающим более высокую энергетическую эффективность. Выходной преобразователь, содержащий трансформатор, представляет собой обратноходовой преобразователь постоянного напряжения.

Рассмотренная в статье методика расчета конденсаторных преобразователей полярности, основанная на линейной аппроксимации кривых заряда и разряда конденсаторов, позволяет обоснованно выбирать номиналы элементов при разработке одно- и двухтактных схем преобразования полярности, а также оценивать величину потерь энергии в преобразовательных схемах.

Безопасность функционирования логического элемента при возникновении отказов основана на том, что преобразование энергии возможно лишь при условии динамической работы коммутационных элементов в схемах преобразователей. Такая концепция обеспечения безопасности исключает возможность ложной активизации управляемых объектов при отсутствии динамических сигналов на обоих входах логического элемента, но не гарантирует полное отсутствие напряжения на нагрузке в случае поступления динамического сигнала на один из входов при наличии отказов в схеме логического элемента. Для снижения остаточного напряжения на выходе используются частотный метод защиты, а также ограничение мощности в цепи питания управляющего генератора. Оценку параметрической безопасности схемы предлагается производить с использованием моделей, отражающих наихудшие условия при несанкционированной передаче энергии источника питания в выходную цепь логического элемента. В основе расчетной методики лежат определение величины напряжения, при которой происходит насыщение сердечника трансформатора в случае низкочастотного воздействия, а также оценка уровня напряжения при передаче энергии в нагрузку через конденсаторную схему преобразования, обеспечивающую питание управляющего генератора.

Энергетические характеристики предложенной схемы безопасного логического элемента позволяют непосредственно управлять электромагнитными реле. Данное решение не содержит дефицитных компонентов и обеспечивает достаточно высокую технологичность аппаратуры. Кроме того, предложенная схема способна работать в дублированных безопасных системах при отсутствии жесткой синхронизации вычислительных комплексов.

Рассмотренное техническое решение успешно применяется в ряде устройств микропроцессорной централизации МПЦ-МПК, разработанной специалистами ПГУПС и эксплуатируемой на станциях магистрального и промышленного железнодорожного транспорта, а также на объектах Петербургского метрополитена.

Литература

1. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Х. А. Христов, Д. В. Гавзов ; под редакцией Вл. В. Сапожникова. Москва : Транспорт, 1995. 272 с.
2. Христов Х. А. Электронизация на осигурительная техника. София : Техника, 1984. 355 с.
3. Schiwiek L. W. Failsafe Schaltungen mit LOGISAFE — Technik // Signal + Draht. 1986. No. 9. Pp. 192–197.
4. Устройство для включения исполнительных устройств систем железнодорожной автоматики и телемеханики / А. Б. Никитин, А. Н. Ковкин, Н. Н. Балув [и др.] : патент на полезную модель 114017 Российская Федерация. № 2011140197/11; заявл. 03.10.11; опубл. 10.03.12, Бюл. № 7.
5. Готтлиб И. М. Источники питания. Инверторы, конверторы, линейные и импульсные стабилизаторы. Москва : Постмаркет, 2000. 552 с.
6. Щиголов С. А., Сергеев Б. С. Анализ работы динамического управляющего устройства // Совершенствование информационных систем на железнодорожном транспорте : сборник научных трудов. Екатеринбург : УрГУПС, 2000. С. 32–40.
7. Семенов Б. Ю. Силовая электроника для любителей и профессионалов. Москва : СОЛОН-Р, 2001. 327 с.
8. Хныков А. В. Теория и расчет трансформаторов источников вторичного электропитания. Москва : СОЛОН-Пресс, 2004. 128 с.
9. Ковкин А. Н. Методы построения бесконтактных устройств сопряжения управляющего вычислительного комплекса с исполнительными объектами систем железнодорожной автоматики : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург : ПГУПС, 2005. 188 с.

References

1. Methods of construction of safe microelectronic systems of railway automation [Metody postroeniya bezopasnykh mikroelektronnykh sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki] / V. V. Sapozhnikov, Vl. V. Sapozhnikov, Kh. A. Khristov, D. V. Gavzov ; ed. by Vl. V. Sapozhnikov. Moscow : Transport, 1995. 272 p.
2. Khristov Kh. Electronics in interlocking technology. Sofia : Technique, 1984. 355 p.
3. Schiwiek L. W. Failsafe Schaltungen mit LOGISAFE — Technik // Signal + Draht. 1986. No. 9. Pp. 192–197.
4. Device for switching on the actuators of railway automation and remote control systems [Ustroystvo dlya vklyucheniya ispolnitel'nykh ustroystv sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki] / A. B. Nikitin, A. N. Kovkin, N. N. Baluev, et al. : pat. for utility model 114017 Russian Federation. No. 2011140197/11; filed 03.10.11; publ. 10.03.12, Bulletin No. 7.
5. Gottlieb I. M. Power supplies. Switching regulators, inverters, and converters [Istochniki pitaniya. Invertory, konvertory, lineynye i impul'snye stabilizatory]. Moscow : Postmarket, 2000. 552 p.
6. Shhigolev S. A., Sergeev B. S. Analysis of the dynamic control device [Analiz raboty dinamicheskogo upravlyayushhego ustroystva] // Improvement of information systems on railway transport : collection of scientific papers. Ekaterinburg : USURT, 2000. Pp. 32–40.
7. Semenov B. Yu. Power electronics for amateurs and professionals [Silovaya elektronika dlya lyubiteley i professionalov]. Moscow : SOLON-R, 2001. 327 p.
8. Khnykov A. V. Theory and calculation of transformers of secondary power sources [Teoriya i raschet transformatorov istochnikov vtorichnogo elektropitaniya]. Moscow : SOLON-Press, 2004. 128 p.
9. Kovkin A. N. Methods of construction of a contactless interface device of the control computer complex with executive facilities of railway automation systems [Metody postroeniya beskontaktnykh ustroystv sopryazheniya upravlyayushhego vychislitel'nogo kompleksa s ispolnitel'nymi ob'ek-tami sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki] : PhD in Engineering Thesis. St. Petersburg : PSTU, 2005. 188 p.

Объем статьи 0,8 авторских листа

УДК 656.259.12

Валерий Александрович Сисин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические машины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Максим Игоревич Шестаков, аспирант кафедры «Электрические машины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ БЕССТЫКОВЫХ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ ТОНАЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ

Valeriy Alexandrovich Sisin, PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Machinery Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Maxim Igorevich Shestakov, postgraduate student, Electric Machinery Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Comparative analysis of modern jointless audio frequency track circuits

Аннотация

В статье представлен сравнительный анализ тональных рельсовых цепей ТРЦ-3 и микропроцессорных рельсовых цепей АБТЦ-И. По его результатам определены направления исследований, которые позволят обосновать эксплуатационные характеристики микропроцессорных рельсовых цепей АБТЦ-И.

Ключевые слова: тональные рельсовые цепи, безопасность движения поездов.

Summary

The paper considers a comparative analysis of TRC-3 audio frequency track circuits and ABTC-I microprocessor track circuits. As a result of the analysis, the authors have determined directions for further research that will substantiate operational characteristics of ABTC-I microprocessor track circuits.

Keywords: audio frequency track circuits, safety of train operation.

DOI: 10.20291/1815-9400-2019-3-59-63

Грузовые и пассажирские перевозки железнодорожным транспортом являются ответственным технологическим процессом (ОТП). Отклонения рабочих характеристик от допустимых значений в ОТП способны создать угрозу жизни и здоровью людей, нанести крупный экономический ущерб или привести к невосполнимому ущербу окружающей среды.

Для повышения безопасности и эффективности производственных процессов внедряются методы и средства, призванные управлять такими ОТП без участия человека или оставлять человеку право на принятие наиболее ответственных решений на основе собранной, обработанной и предоставленной информации.

Организация таких методов и средств в ОТП реализуется через делегирование функций контроля и управления от человека к специальным техническим устройствам, которые обеспечивают автоматизированную регистрацию, передачу и обработку информации.

Системы автоматики, отвечающие за решение конкретной функции ОТП, позволяют эффективно выявлять нештатные ситуации, устранять отклонения в различных режимах функционирования ОТП, предотвращая тем самым возникновение возможных угроз и техногенных аварий.

Не исключением из правил являются перегонные и станционные системы железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ), к которым можно отнести системы автоблокировки, автоматическую локомотивную сигнализацию, автоматическую переездную сигнализацию, диспетчерскую централизацию, электрическую централизацию и др.

Для вышеупомянутых систем сигнализации, централизации и блокировки основными датчиками состояния рельсовой линии (РЛ) являются рельсовые цепи (РЦ). Функционируя в определенных режимах, РЦ обеспечивают безопасное проследование подвижного состава на перегонах и станциях. Нормальный режим работы впереди лежащей на пути проследования подвижного состава РЦ свидетельствует о свободности

железнодорожного блок-участка. Шунтовой режим определяет свободу или занятость блок-участка другим впереди идущим составом. Контрольный режим РЦ определяет возможность неисправности (излома, изъятия рельса) РЛ железнодорожного участка.

На перегонах и станциях железных дорог России эксплуатируются различные типы РЦ. Поскольку один из наиболее уязвимых элементов в конструкции ограниченных РЦ — изолирующий стык, широкое распространение получили неограниченные РЦ. Одна из генераций развития неограниченных РЦ — тональные рельсовые цепи (ТРЦ), в которых в качестве сигнала контроля рельсовой линии (КРЛ) используют токи с диапазоном тональных частот. Например, в ТРЦ-3 это сигнальные токи частотой 420–780 Гц (рис. 1), а в ТРЦ-4 — 4,5–5,5 кГц.

Техническое развитие железнодорожного транспорта, внедрение быстродействующей полупроводниковой элементной базы в силовой железнодорожной аппаратуре, использование асинхронных двигателей тягового тока, новых видов электрической тяги [1–3] требует постоянного совершенствования СЖАТ, включая РЦ. Для повышения помехоустойчивости к разнообразным промышленным электромагнитным помехам во вновь разрабатываемых РЦ применяются современные методы цифровой обработки сигнала, различные виды модуляции и кодирования сигнала КРЛ и т.п. Так, в РЦ АБТЦ-И используются иные частоты сигнала КРЛ (475–925 Гц). Применяется частотная манипуляция сигнала КРЛ с использованием восьмиразрядного кода Бауэра. Структурная схема подобной РЦ, в которой путевого приемник принимает несколько сигналов КРЛ, поступающих на один вход прибора, представлена на рис. 2.

Внедрение новых РЦ даже при схожей конфигурации с уже эксплуатируемыми требует проведения заново и в полном объеме математического моделирования граничных режимов работы РЦ и выполнения анализа электромагнитной совместимости аппаратуры. При этом из-за различия электрических характеристик оборудования и передаваемого сигнала КРЛ различных РЦ регулировочные таблицы таких РЦ значительно отличаются.

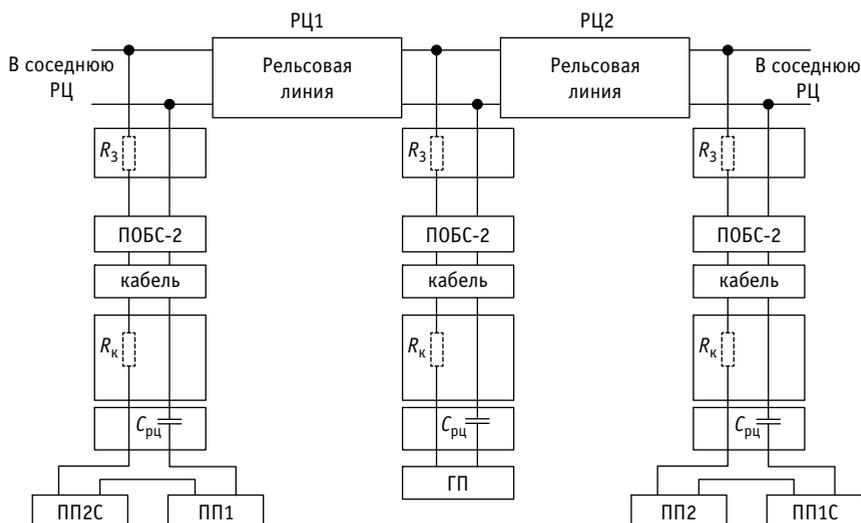


Рис. 1. Структурная схема ТРЦ-3:

ГП — путевого генератор; ПП — путевого приемник; ПОБС-2 — путевого трансформатора

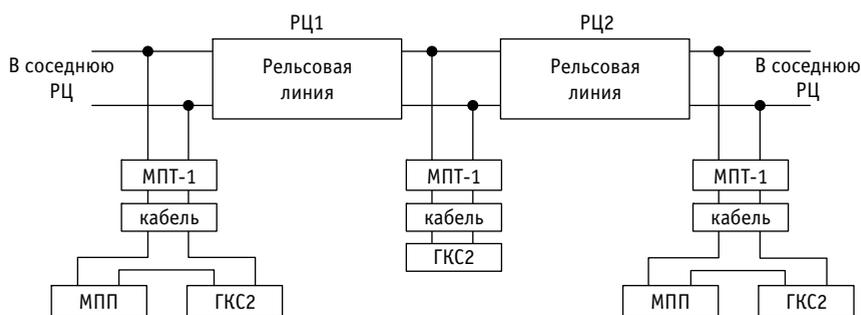


Рис. 2. Структурная схема РЦ системы АБТЦ-И:

ГКС2 — генератор комплексного сигнала; МПП — микропроцессорный путевого приемник; МПТ-1 — модуль путевого трансформатора

В качестве сравнительного анализа режимов работы различных РЦ рассмотрим микропроцессорную РЦ автоблокировки АБТЦ-И (см. рис. 2) и РЦ-3 (см. рис. 1) с одинаковыми эксплуатационными характеристиками (одинаковые длины кабеля питающего и релейного концов, смежные РЦ, имеющие одну длину с исследуемой, сопоставимые частоты сигнала КРЛ).

Методы расчета граничных режимов работы РЦ опираются на теорию линейных пассивных четырехполюсников. Каждый элемент электрической схемы замещения исследуемой РЦ представляет собой набор коэффициентов, которые позволяют рассчитать входные и выходные характеристики электрического сигнала РЦ и то, с каким запасом выполняются режимы работы РЦ [4–6].

Для сравнительного анализа работы РЦ в нормальном режиме введем понятие нормированного коэффициента перегрузки:

$$K_{н.пер} = \frac{K_{пер.факт}}{K_{пер}(R_{б.макс})}, \quad (1)$$

где $K_{пер.факт} = \frac{U_{факт}}{U_{н.сраб}}$ — фактический

коэффициент перегрузки [6];

$K_{пер}(R_{б.макс.})$ — максимально возможный коэффициент перегрузки при заданных параметрах РЦ (за максимальное принято значение коэффициента при величине сопротивления балласта, равной 50 Ом·км [5]).

В качестве объектов сравнения придем следующие параметры РЦ-3 и РЦ

АБТЦ-И: длина кабеля 2 км, несущая частота 475 Гц для ТРЦ АБТЦ-И и 480 Гц — для ТРЦ-3.

Исходя из заданных расчетных условий в соответствии с выражением (1) построены зависимости нормированного коэффициента перегрузки от различных параметров (рис. 3).

Представленные зависимости коэффициента перегрузки от изменения сопротивления балласта для сравниваемых РЦ заметно отличаются. Например, при минимальном нормативном сопротивлении балласта, равном 1 Ом·км [6], и длине рельсовой линии 800 м нормированный коэффициент перегрузки для ТРЦ АБТЦ-И на 14,5 % превышает соответствующий показатель для ТРЦ-3. При 0,5 Ом·км разница составляет 21,6 %. Это означает, что при понижении сопротивления балласта напряжение на путевом приемнике АБТЦ-И снижается меньше, чем на путевом приемнике ТРЦ-3, и говорит о повышенной устойчивости новых рельсовых цепей к погодным условиям, влияющим на изменение сопротивления балласта РЦ. Кроме того, из проведенного моделирования видно, что ТРЦ АБТЦ-И обеспечивает более устойчивую работу при низких сопротивлениях балласта [7], чем широко используемые ТРЦ-3.

При сравнении условий выполнения параметров шунтового режима ТРЦ необходимо определить нормированный коэффициент чувствительности к нормативному шунту. Для нормировки этого коэффициента следует найти его минимальное значение в зависимости от координаты наложения шунта:

$$K_{н.ш.норм} = \frac{K_{н.ш}}{K_{н.ш.мин}}, \quad (2)$$

где $K_{н.ш} = \frac{U_{факт.н.ш}}{U_{н.отп}}$ — фактический коэффициент чувствительности к нормативному шунту [6];

$K_{н.ш.мин}$ — минимально возможный коэффициент чувствительности к нормативному шунту для данной РЦ при наилучших условиях.

В соответствии с проведенным математическим моделированием обоих типов ТРЦ согласно заданным характеристикам на рис. 4 представлены зависимости $K_{н.ш.норм}$ от различных параметров. При этом сопротивление балласта обеих РЦ принято 50 Ом·км, что соответствует наилучшим условиям для выполнения шунтового режима [5]. Для зависимостей $K_{н.ш.норм}$ на рис. 4 координата наложения шунта представлена в относительном виде — как процент от общей длины рельсовой линии, начало отсчета — питающий конец.

Как видно из полученных характеристик, основное отличие рассматриваемых рельсовых цепей заключается в том, что минимальное значение шунтовой чувствительности ТРЦ-3 наблюдается при наложении шунта на приемный конец РЦ, тогда как для ТРЦ АБТЦ-И — при наложении шунта на питающем конце. Это объясняется различным соотношением входных сопротивлений питающего и релейного концов данных рельсовых цепей.

Необходимо также обратить внимание на максимальную величину коэффициента шунтовой чувствительности. У рельсовых цепей ТРЦ АБТЦ-И он значительно выше, чем у ТРЦ-3, на большей части длины РЦ. Данное условие говорит о том, что

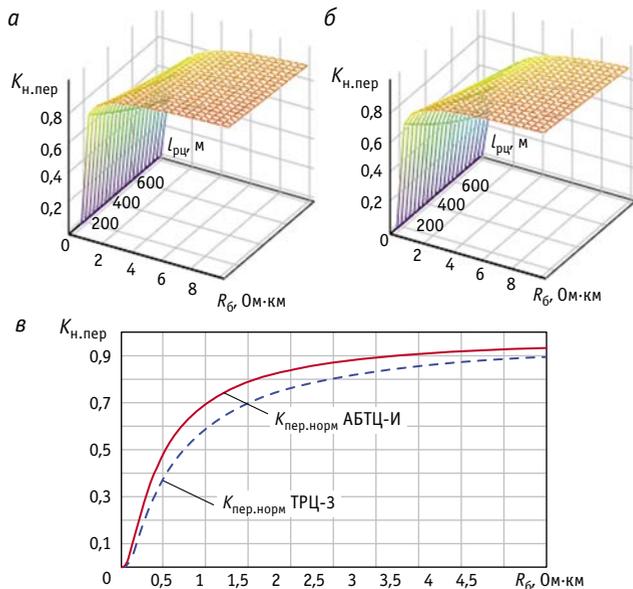


Рис. 3. Нормированный коэффициент перегрузки в нормальном режиме:

а и б — для ТРЦ АБТЦ-И и ТРЦ-3 соответственно в зависимости от сопротивления балласта и длины рельсовой цепи; в — для обоих типов ТРЦ в зависимости от сопротивления балласта при длине рельсовой линии 800 м

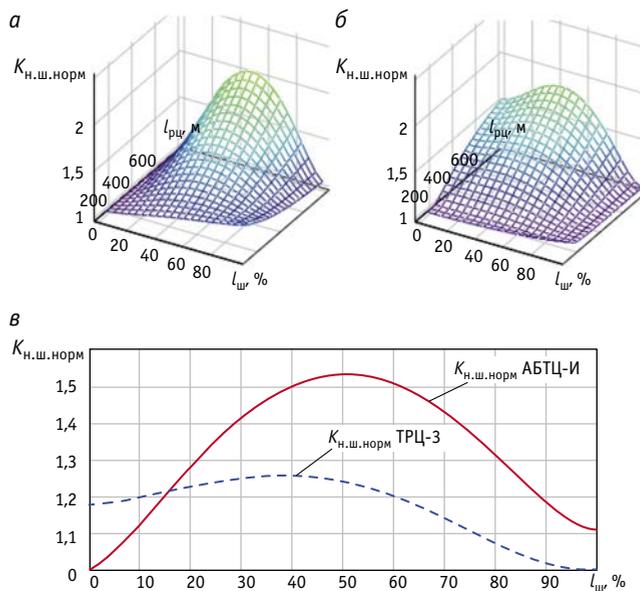


Рис. 4. Нормированный коэффициент чувствительности к нормативному шунту:

а и б — для ТРЦ АБТЦ-И и ТРЦ-3 соответственно в зависимости от относительной координаты наложения шунта и от длины рельсовой цепи; в — для обоих типов ТРЦ в зависимости от относительной координаты наложения шунта при длине рельсовой линии 800 м

ТРЦ АБТЦ-И имеет больший запас по шунтовой чувствительности, чем ТРЦ-3, и более устойчива к потере поездного шунта.

Одна из важных особенностей любых бесстыковых РЦ — необходимость выполнения требования по обеспечению длины

зоны дополнительного шунтирования (ЗДШ) в пределах нормативной. Для перегонных рельсовых цепей ЗДШ не должна превышать 40 м [7].

Сравнивать поведение различных рельсовых цепей в данном режиме можно по нормированному коэффициенту перегрузки (1). Отличие заключается лишь в расчетной схеме заземления рельсовой цепи [4, 5].

Расчет для сравнения поведения рассматриваемых ТРЦ выполним при условии наложения шунта с нулевым сопротивлением на расстоянии 40 м от приемного конца РЦ и построим зависимости коэффициента перегрузки от различных параметров (рис. 5).

Результаты расчета показывают, что при снижении сопротивления балласта длина ЗДШ у ТРЦ АБТЦ-И будет увеличиваться медленнее, чем у аналогичной по параметрам ТРЦ-3. Например, для РЦ с длиной 800 м максимальное значение $K_{н.пер}$ для ТРЦ АБТЦ-И на 17,8 % выше, чем для ТРЦ-3. При сопротивлении балласта 0,5 Ом·км эта разница составляет уже 28,2 %.

В контрольном режиме анализ производится путем определения коэффициента чувствительности к излому рельса. Переменными параметрами в данном случае являются координата обрыва рельса и сопротивление балласта.

Для анализа сравнительной оценки выполнения контрольного режима рассматриваемых ТРЦ определим нормированный коэффициент чувствительности к обрыву рельса:

$$K_{о.р.н} = \frac{K_{о.р}}{K_{о.р.мин}}, \quad (3)$$

где $K_{о.р} = \frac{U_{факт.о.р}}{U_{н.отп}}$ — фактический коэффициент чувствительности к обрыву рельса [6];

$K_{о.р.мин}$ — минимально возможный коэффициент чувствительности к обрыву рельса для данной РЦ при наихудших условиях [6].

Наихудшая чувствительность РЦ к обрыву рельса проявляется при его обрыве посередине РЦ, что подтверждено исследованиями [6].

Полученные зависимости нормированного коэффициента чувствительности к излому рельса приведены на рис. 6.

Зависимость нормированного коэффициента чувствительности к обрыву рельса демонстрирует качественное различие характеристик рельсовых цепей. Например, при длине РЛ 800 м критическое сопротивление балласта $R_{б.крит}$, при котором наблюдается наихудшая чувствительность к обрыву рельса, для ТРЦ АБТЦ-И равно 0,36, а для ТРЦ — 3–0,61 Ом·км. Согласно требованиям [7], минимальное сопротивление балласта может составлять до 0,5 Ом·км. Следовательно, ТРЦ АБТЦ-И при любых нормативных сопротивлениях балласта всегда будет иметь запас по выполнению контрольного режима, так как критическое значение ниже нормативного. Кроме того, при любых нормативных величинах сопротивления балласта коэффициент запаса по контрольному режиму для ТРЦ АБТЦ-И всегда больше, чем для ТРЦ-3.

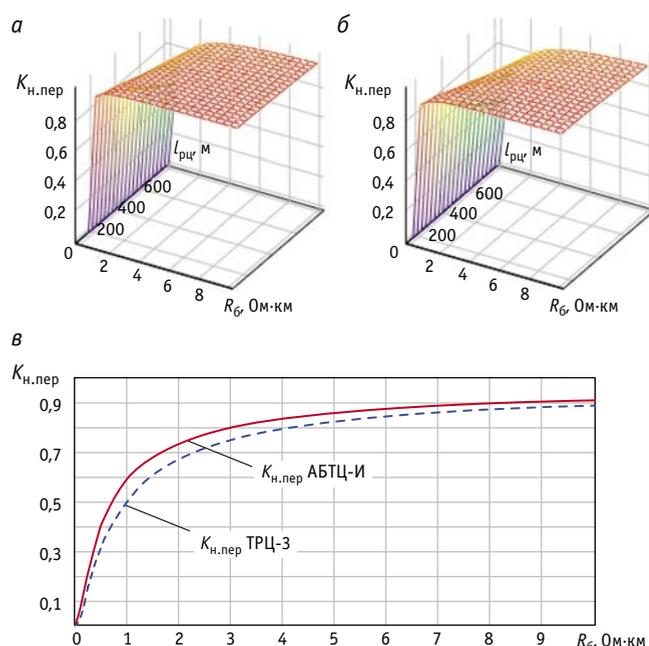


Рис. 5. Нормированный коэффициент перегрузки в режиме обеспечения длины зоны дополнительного шунтирования:

а, б — для ТРЦ АБТЦ-И и ТРЦ-3 соответственно в зависимости от сопротивления балласта и длины рельсовой линии;
 в — для обоих типов ТРЦ в зависимости от сопротивления балласта при длине рельсовой линии 800 м

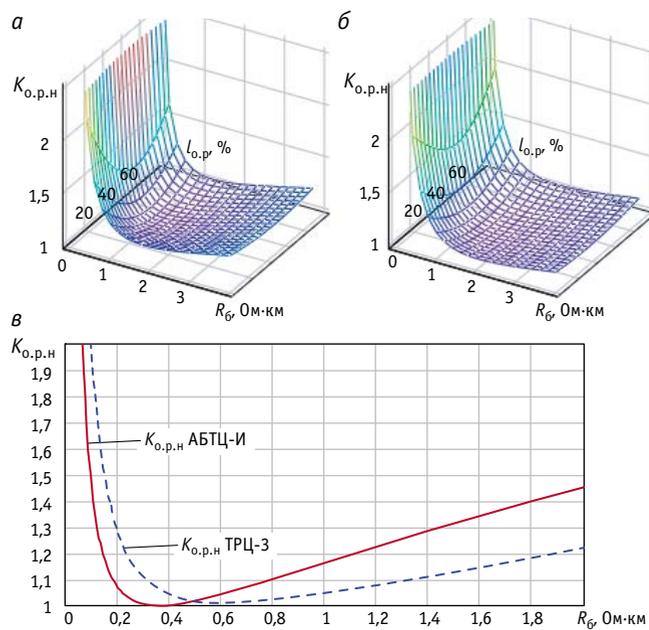


Рис. 6. Нормированный коэффициент чувствительности к обрыву рельса:

а, б — для ТРЦ АБТЦ-И и ТРЦ-3 соответственно в зависимости от сопротивления балласта и относительной координаты обрыва рельса;
 в — для обоих типов ТРЦ в зависимости от сопротивления балласта при длине рельсовой линии 800 м и обрыве рельса посередине РЦ

Применение современных методов кодирования и цифровой обработки сигнала во вновь разрабатываемых РЦ позволяет значительно повысить их помехоустойчивость. Однако необходимость математического моделирования и расчет выполнения режимов работы РЦ являются первостепенной задачей для обеспечения безопасности движения поездов.

Приведенный в работе сравнительный анализ показывает, что при схожей конфигурации бесстыковые ТРЦ имеют заметно отличающиеся характеристики граничных режимов работы РЦ. Таким образом, для новых ТРЦ АБТЦ-И необходим детальный научный анализ параметров функционирования таких РЦ в условиях эксплуатации, а также определение граничных характеристик их работы в жесткой электромагнитной обстановке.

Литература

1. Сисин В. А., Шапран Ф. В. Электромагнитная совместимость электронной и электротехнической аппаратуры локомотивов // Практическая силовая электроника. 2015. № 4 (60). С. 47–51. ISSN 1996–7888.
2. Сисин В. А. Вопросы электромагнитной совместимости локомотивной аппаратуры // Вестник УрГУПС. 2014. № 3 (23). С. 4–9. ISSN 2079–0392.
3. Сергеев Б. С., Сисин В. А. Электропитание электронной аппаратуры железнодорожного транспорта // Электропитание. 2014. № 2. С. 72–74. ISSN 2541–8882.
4. Кулик П. Д., Ивакин Н. С., Удовиков А. А. Тональные рельсовые цепи в системах ЖАТ: построение, регулировка, обслуживание, поиск и устранение неисправностей, повышение эксплуатационной надежности. Киев : Мануфактура, 2004. 288 с.
5. Сисин В. А. Математическое моделирование работы тональных рельсовых цепей // Транспорт Урала. 2015. № 3 (46). С. 45–49. ISSN 1815–9400.
6. Брылеев А. М., Шишляков А. В., Кравцов Ю. А. Теория, расчет, устройство и работа рельсовых цепей. Москва : Транспорт, 1978. 425 с.
7. СП 235.1326000.2015. Железнодорожная автоматика и телемеханика. Правила проектирования / Минтранс России. Москва, 2015. 176 с.

References

1. Sisin V. A., Shapran F. V. Electromagnetic compatibility of electronic and electrical equipment of locomotives [Elektromagnitnaya sovmestimost' elektronnoy i elektrotekhnicheskoy apparatury lokomotivov] // Practical Power Electronics. 2015. No. 4 (60). Pp. 47–51. ISSN 1996–7888.
2. Sisin V. A. Issues of electromagnetic compatibility of locomotive equipment [Voprosy elektromagnitnoy sovmestimosti lokomotivnoy apparatury] // Herald of USURT. 2014. No. 3 (23). Pp. 4–9. ISSN 2079–0392.
3. Sergeev B. S., Sisin V. A. Power supply of electronic equipment for railway transport [Elektropitanie elektronnoy apparatury zheleznodorozhnogo transporta] // Power Supply. 2014. No. 2. Pp. 72–74. ISSN 2541–8882.
4. Kulik P. D., Ivakin N. S., Udovikov A. A. Audio frequency track circuits in RAT systems: construction, regulation, maintenance, troubleshooting, improvement of operational reliability [Tonal'nye rel'sovye tsepi v sistemakh ZhAT: postroenie, regulirovka, obsluzhivanie, poisk i ustranenie neispravnostey, povysheniye ekspluatatsionnoy nadezhnosti]. Kyiv : Manufactory, 2004. 288 p.
5. Sisin V. A. Mathematical modeling of audio frequency track circuits [Matematicheskoe modelirovanie raboty tonal'nykh rel'sovykh tsepey] // Transport of the Urals. 2015. No. 3 (46). Pp. 45–49. ISSN 1815–9400.
6. Bryleev A. M., Shishlyakov A. V., Kravtsov Yu. A. Theory, analysis, structure and operation of track circuits [Teoriya, raschet, ustroystvo i rabota rel'sovykh tsepey]. Moscow : Transport, 1978. 425 p.
7. SP 235.1326000.2015. Railway automatics and telemechanics. Rules for design [Zheleznodorozhnaya avtomatika i telemekhanika. Pravi-la proektirovaniya] / Ministry of Transport of the Russian Federation. Moscow, 2015. 176 p.

Объем статьи 0,56 авторских листа

УДК 625.143.3

Юрий Валерьевич Могильников, ассистент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ И СРЕДСТВ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ ПРИ ВЫЯВЛЕНИИ ИЗЛОМОВ И ДЕФЕКТОВ РЕЛЬСОВ

Yuriy Valeryevich Mogilnikov, Assistant Lecturer, Railway Automation, Telemechanics and Communication Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Assessment of track circuits and defectoscopy tools efficiency in detection of rail failures and flaws

Аннотация

В статье дан анализ статистики дефектов и изломов рельсов на сети железных дорог России. Выполнена оценка эффективности применения рельсовых цепей и средств дефектоскопии при выявлении изломов и диагностировании дефектов. Установлено, что использование рельсовых цепей для контроля целостности рельсов и диагностирования дефектов недостаточно эффективно, а существующие способы дефектоскопии имеют ряд существенных недостатков, поэтому требуется поиск новых технических решений.

Ключевые слова: рельсовая цепь, контрольный режим, излом рельса, дефектоскопия, диагностика дефектов.

Summary

The paper provides an analysis of statistics of rail failures and flaws in the railway system of the Russian Federation. The author carried out an assessment of track circuits and defectoscopy tools application efficiency in detection of rail failures and flaws. The application of track circuits is insufficiently efficient for broken rail protection and flaw detection and existing defectoscopy tools have a number of significant disadvantages that is why there is a need for new technical solutions.

Keywords: track circuit, control mode, rail failure, defectoscopy, flaw detection.

DOI: 10.20291/1815-9400-2019-3-64-67

Основная задача, стоящая перед компанией ОАО «РЖД», — максимально быстро и безопасно перевозить грузы и пассажиров по сети железных дорог. Для ее выполнения создано и внедрено множество современных систем, с помощью которых безопасность перевозок осуществляется на высоком уровне. Тем не менее, в работе этих систем возникают отказы, приводящие к перерывам в движении и сходам подвижного состава.

В частности, для определения свободности/занятости пути и контроля целостности железнодорожного полотна используются рельсовые цепи и средства дефектоскопии. Однако, как видно из статистики, представленной на рис. 1, проблема изломов и пропущенных дефектов рельсов остается актуальной.

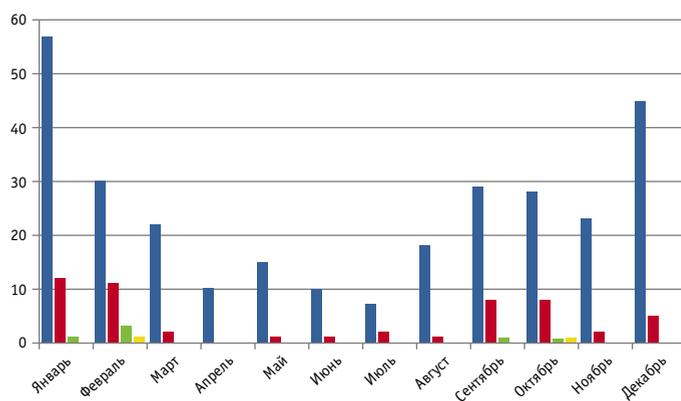


Рис. 1. Статистика изломов рельсов и пропущенных дефектов на сети железных дорог России за 2016–2018 гг.:

■ — общее количество изломов; ■ — количество пропущенных дефектов;
■ — дефекты, повлекшие сход; ■ — дефекты, повлекшие крушение

Проанализируем эффективность применения рельсовых цепей при обнаружении изломов рельсов и, как следствие, при предотвращении сходов подвижного состава.

Рельсовые цепи работают в трех основных режимах — нормальном, шунтовом и контрольном (рис. 2) [1]. В нормальном и шунтовом режиме они выявляют свободность либо занятость пути, контрольный режим необходим для определения целостности рельсовой линии.

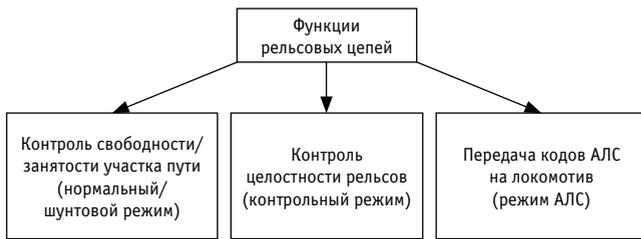


Рис. 2. Функции рельсовых цепей

Принцип работы контрольного режима основан на протекании сигнального тока от источника к приемнику по рельсовой линии (рис. 3). При изломе рельса цепь разомкнется, и путевое реле обесточится. Это может привести к ложной занятости пути, и до устранения причины движение по участку будет прекращено. Более опасны ситуации, при которых излом возникает под подвижным составом, так как вследствие этого может произойти крушение поезда. Случается, что под воздействием нескольких факторов при изломе рельса путевое реле остается под током, т.е. контрольный режим не выполняется. Это может привести к катастрофам больших масштабов, в том числе к человеческим жертвам, перебоям в движении, экологическим бедствиям.

Основными из этих факторов являются критическое сопротивление балласта и место излома, при которых ток, протекающий через землю, оказывается максимальным, и путевое реле не выключается [1]. К тому же рельсовая цепь контролирует не все виды повреждений рельсовой линии, а лишь ее электрическую целостность, причем в однопутных рельсовых цепях контролируется только сигнальная нитка. Могут появиться дефекты рельсов с сохранением их электрической целостности, при которых движение поездов становится небезопасным [2]. Подобный случай произошел 9 февраля 2019 г. на перегоне Красная Речка — Корфовская Дальневосточной железной дороги [3], когда локомотивная бригада обнаружила на соседнем пути излом рельса с раскрытием более 10 см (рис. 4).

Отсюда следует, что рельсовая цепь достоверно не определяет целостность железнодорожного полотна. Кроме того, как уже было сказано, очень часто излом рельсов происходит под подвижным составом, когда рельсовая цепь находится в шунтовом режиме, и выявление излома не представляется возможным. Также рельсовая цепь не позволяет диагностировать и прогнозировать развитие дефекта в рельсах и определять место его возникновения.

Выполнение третьей функции рельсовых цепей — передачи кодов АЛС на локомотив (см. рис. 2) — требует высокой помехозащищенности от тягового тока, от электромагнитного воздействия высоковольтных линий и намагничивания рельсов. Сбои кодов АЛС приводят к снижению пропускной способности.

Наряду со своими преимуществами (техническая простота реализации и выполнение нескольких режимов работы) рельсовые цепи обладают и рядом существенных недостатков, таких как высокое энергопотребление, необходимость сезонной регулировки, большие затраты на техническое содержание. В тяжелых климатических условиях (влажный климат, низкое сопротивление изоляции, высокий перепад темпера-

тур в течение суток) для работы рельсовых цепей требуются грамотная техническая настройка и своевременное техническое обслуживание [4].

Сегодня ведутся многочисленные дискуссии об эффективности применения рельсовых цепей и замене их альтернативными техническими средствами. В частности, для контроля свободности/занятости пути и передачи информации на локомотив широко используются системы на основе счета осей (ССО) [5, 6], системы, оборудованные радиоканалом и спутниковой навигацией, системы виброакустического зондирования железнодорожного полотна «Анаконда», DAS, выявляющие излом рельсов [6–11]. Однако отказ от применения рельсовых цепей и переход на альтернативные системы тормозится из-за консерватизма железнодорожного сообщества и определенных экономических интересов [12].

Функции диагностирования изломов и дефектов выполняются съемные и мобильные средства дефектоскопии, тоже имеющие ряд недостатков, таких как низкая периодичность и скорость контроля, значительные эксплуатационные расходы, отсутствие возможности выявления дефектов по всему сечению рельса, особенно в перьях подошвы, отсутствие автоматизированной настройки дефектоскопного оборудования и автоматизированной обработки информации [13–15].

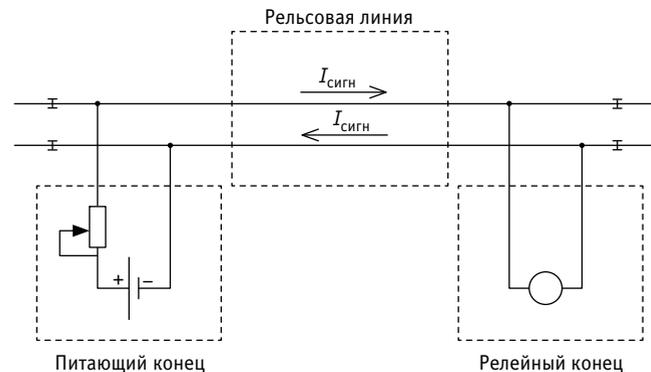


Рис. 3. Схема простейшей рельсовой цепи



Рис. 4. Излом рельса на перегоне Красная Речка — Корфовская [3]

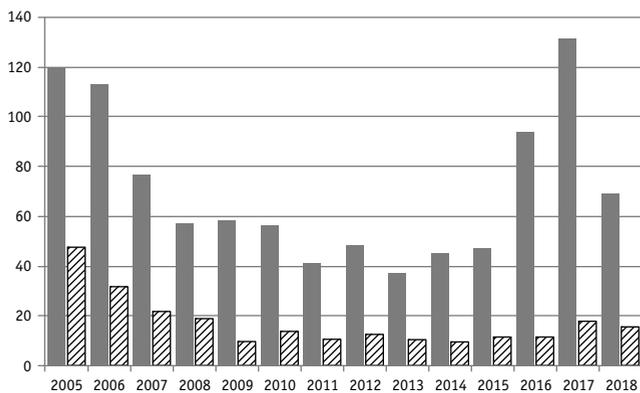


Рис. 5. Количество изломов рельсов и пропуски обнаружения дефектов на сети железных дорог России за 2005–2018 гг.:
 ■ — общее количество отказов; ▨ — пропуски дефекта

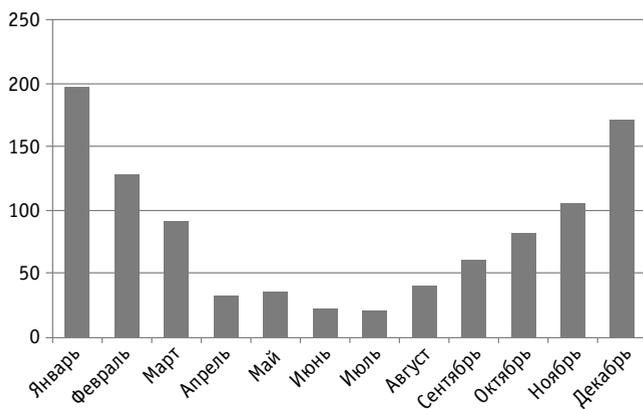


Рис. 6. Количество дефектов рельсов на сети железных дорог России по месяцам за период с 2005 по 2018 г.

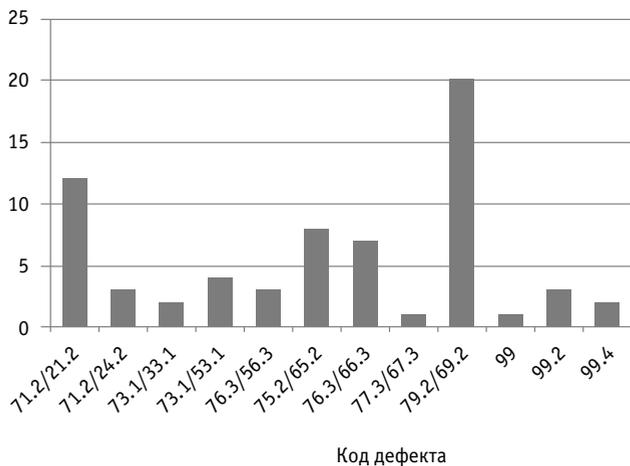


Рис. 7. Изломы рельсов на сети железных дорог по кодам дефектов в 2018 г.

Как показывает анализ статистических данных, предоставленных Екатеринбургским центром диагностики и мониторинга устройств инфраструктуры (рис. 5 и 6), за последние 15 лет на сети железных дорог России произошло 993 излома рельсов, из которых средствами дефектоскопии выявлено 745. Таким образом, было пропущено 248 дефектов, или 25 % от их общего числа. Кроме того, по причине несвоевременного выявления или пропуска дефектов за последние три года произошло 6 сходов и 2 крушения подвижного состава (см. рис. 1).

Что касается зависимости количества дефектов рельсов от сезонности и климатических условий, то, как видно из рис. 6, в холодное время года оно растет, однако установленная периодичность контроля этого не предотвращает.

Используемые в настоящее время способы диагностики также не позволяют выявлять дефекты в перьях подошвы рельсов, хотя на их долю приходится 20 % всех изломов [15]. Как видно из рис. 7, наибольшее количество изломов происходит из-за трещин в головке рельса и трещин коррозионного происхождения в подошве рельса (дефекты 21.2, 65.2 и 69.2).

Таким образом, эффективность применения рельсовых цепей для контроля целостности рельсов и диагностирования дефектов является достаточно низкой. Следовательно, контрольный режим не должен быть аргументом для отказа от использования рельсовых цепей, имеющих ряд недостатков. Сегодня уже разработаны альтернативные системы, способные выполнять эти функции, потенциал и технические возможности которых в полной мере не изучены.

Необходим поиск новых более эффективных способов дефектоскопии для диагностики и мониторинга рельсов, которые позволят выявлять дефекты во всем сечении рельсов с большей точностью и периодичностью, не потребуют больших эксплуатационных расходов и не будут тормозить процесс перевозок.

Для снижения количества дефектов в холодное время года следует пересмотреть периодичность контроля и повысить точность результатов диагностики за счет применения вместо зависимого от температуры ультразвукового способа других, более точных методов.

С целью увеличения периодичности диагностирования, минимизации технологических перерывов в движении поездов и повышения достоверности результатов необходимо рассмотреть установку диагностических датчиков на локомотивы графических поездов с дополнением вторичного контроля для уточнения места и типа дефекта.

Литература

1. Аркатов В. С., Кравцов Ю. А., Степенский Б. М. Рельсовые цепи. Анализ работы и технического обслуживание. Москва : Транспорт, 1990. 294 с.
2. Воронин В. А. Замена рельсовых цепей на аналоги — миф или реальность? // Автоматика, связь, информатика. 2019. № 2. С. 16–17. ISSN 0005–2329.
3. Российские железные дороги «РЖД». URL: https://vk.com/wall-455371_476076?z=photo-455371_456259956_%2Falbum-455371_00_%2Frev (дата обращения: 11.06.2019).
4. Могильников Ю. В., Нурекенова М. С., Феданов Н. С. Недостатки рельсовых цепей и их устранение // World science: problems and innovations : сборник статей победителей VII Международной научно-практической конференции. Пенза : Наука и Просвещение, 2017. С. 75–77.
5. Могильников Ю. В., Муллагалямова Ю. З., Соломатин Н. С. Сравнительный анализ рельсовых цепей и систем счета осей // Научные достижения и открытия современной молодежи : сборник статей IV Международной научно-практической конференции. Пенза : Наука и Просвещение, 2018. С. 75–77.
6. Тильк И. Г., Ляной В. В., Гнидько Р. В. Альтернативы рельсовым цепям. Возможности и ограничения // Автоматика, связь, информатика. 2019. № 2. С. 36–37. ISSN 0005–2329.
7. Балув Н. И. Рельсовые цепи — вчера, сегодня, завтра... // Автоматика, связь, информатика. 2019. № 2. С. 30–31. ISSN 0005–2329.
8. Воронин В. А. Обмен опытом на международном уровне // Автоматика, связь, информатика. 2014. № 1. С. 34–35. ISSN 0005–2329.
9. Попов П. А. Возможна ли жизнь без рельсовой цепи? // Автоматика, связь, информатика. 2019. № 2. С. 28–29. ISSN 0005–2329.
10. Шаманов В. И. Пути повышения устойчивости работы рельсовых цепей // Автоматика, связь, информатика. 2019. № 2. С. 20–21. ISSN 0005–2329.
11. Grundnig G. The future challenges of wheel detection and axle counting — Part 2 // Signal and Draht. 2011. No. 12. Pp. 44–51.
12. Ефанов Д. В. Интеллектуальный транспорт: естественный отбор // Автоматика, связь, информатика. 2019. № 2. С. 38–40. ISSN 0005–2329.
13. Бирюзов В. П. Об основных направлениях диагностики и мониторинга путевого хозяйства до 2025 г. // Путь и путевое хозяйство. 2015. № 4. С. 4–8. ISSN 0131–5765.
14. Бугаенко В. М. Мониторинг и диагностика инфраструктуры скоростными мобильными комплексами // Путь и путевое хозяйство. 2015. № 4. С. 12–16. ISSN 0131–5765.
15. Марков А. А. Современное состояние, проблемы и направления развития диагностики рельсов и элементов инфраструктуры // Путь и путевое хозяйство. 2015. № 4. С. 19–24. ISSN 0131–5765.

References

1. Arkatov V. S., Kravtsov Yu. A., Stepenskiy B. M. Track circuits. Operation analysis and maintenance [Rel'sovye tsepi. Analiz raboty i tekhnicheskoe obsluzhivaniye]. Moscow : Transport, 1990. 294 p.
2. Voronin V. A. Replacement of track circuits with analogues — myth or reality? [Zamena rel'sovykh tseyey na analogi — mif ili real'nost'?] // Automation, communication and informatics. 2019. № 2. С. 16–17. ISSN 0005–2329.
3. Russian Railways «RZD» [Rossiyskie zheleznnye dorogi «RZhD»]. URL: https://vk.com/wall-455371_476076?z=photo-455371_456259956_%2Falbum-455371_00_%2Frev (access date: 11.06.2019).
4. Mogilnikov Yu. V., Nurekenova M. S., Fedanov N. S. Disadvantages of track circuits and troubleshooting [Nedostatki rel'sovykh tseyey i ikh ustraneniye] // World science: problems and innovations : collection of winner's papers of the VII International research and practice conference. Penza : Science and Education, 2017. Pp. 75–77.
5. Mogilnikov Yu. V., Mullagalyamova Yu. Z., Solomatin N. S. Analysis of track circuits and axle counting systems [Srvnitel'nyy analiz rel'sovykh tseyey i sistem scheta osey] // Scientific achievements and discoveries of modern youth : collection of scientific papers of the IV International research and practice conference. Penza : Science and Education, 2018. Pp. 75–77.
6. Til'k I. G., Lyanoy V. V., Gni'ko R. V. Alternatives to track circuits. Possibilities and restrictions [Al'ternativy rel'sovym tseyeyam. Vozmozhnosti i ogranicheniya] // Automation, communication and informatics. 2019. No. 2. Pp. 36–37. ISSN 0005–2329.
7. Baluev N. I. Track circuits — yesterday, today, tomorrow... [Rel'sovye tsepi — vchera, segodnya, zavtra...] // Automation, communication and informatics. 2019. No. 2. Pp. 30–31. ISSN 0005–2329.
8. Voronin V. A. Exchange of experience at international level [Obmen opytom na mezhdunarodnom urovne] // Automation, communication and informatics. 2014. No. 1. Pp. 34–35. ISSN 0005–2329.
9. Popov P. A. Is there life without track circuits? [Vozmozhna li zhizn' bez rel'sovoy tsepi?] // Automation, communication and informatics. 2019. No. 2. Pp. 28–29. ISSN 0005–2329.
10. Shamanov V. I. Ways to improve track circuits operation stability [Puti povysheniya ustoychivosti raboty rel'sovykh tseyey] // Automation, communication and informatics. 2019. No. 2. Pp. 20–21. ISSN 0005–2329.
11. Grundnig G. The future challenges of wheel detection and axle counting — Part 2 // Signal and Draht. 2011. No. 12. Pp. 44–51.
12. Efanov D. V. Intelligent transport: natural selection [Intellektual'nyy transport: estestvennyy otbor] // Automation, communication and informatics. 2019. No. 2. Pp. 38–40. ISSN 0005–2329.
13. Biryuzov V. P. On main directions of track facilities diagnostics and monitoring up to 2025 [Ob osnovnykh napravleniyakh diagnostiki i monitoringa putevogo khozyaystva do 2025 g.] // Railway Track and Facilities. 2015. No. 4. Pp. 4–8. ISSN 0131–5765.
14. Bugaenko V. M. Monitoring and diagnostics of infrastructure by high-speed mobile complexes [Monitoring i diagnostika infrastruktury skorostnymi mobil'nymi kompleksami] // Railway Track and Facilities. 2015. No. 4. Pp. 12–16. ISSN 0131–5765.
15. Markov A. A. Current condition, problems and directions for development of rails and infrastructure elements diagnostics [Sovremennoe sostoyaniye, problemy i napravleniya razvitiya diagnostiki rel'sov i elementov infrastruktury] // Railway Track and Facilities. 2015. No. 4. Pp. 19–24. ISSN 0131–5765.

Объем статьи 0,4 авторских листа

УДК 629.424:504.3.054

Владимир Григорьевич Булаев, доктор технических наук, профессор кафедры «Техносферная безопасность» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ТЕПЛОВОЗНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Vladimir Grigorievich Bulaev, DSc in Engineering, Professor, Technospheric Safety Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Perspective exhaust fumes control systems of locomotive-type diesel engines

Аннотация

Представлен обзор основных методов снижения токсичности отработавших газов тепловозных дизелей. Рассмотрены технологии дизельных окислительных катализаторов, фильтров дисперсных частиц, селективного восстановления оксидов азота с помощью аммиака и растворов мочевины, а также использование альтернативных видов тяги на тепловозах.

Ключевые слова: дизель, каталитические нейтрализаторы, двигатель внутреннего сгорания, отработавшие газы, системы обезвреживания отработавших газов, дизельные фильтры дисперсных частиц, рециркуляция отработавших газов, селективное восстановление оксидов азота, топливные элементы, раствор мочевины.

Summary

The paper presents a review of main methods for reduction of exhaust fumes toxicity of locomotive-type diesel engines. In the paper the author considers technologies of diesel oxidation catalyst, dispersed particles filters, selective reduction of nitrogen oxides with the use ammonia and urea solutions and the use of alternative traction modes on diesel locomotives.

Keywords: diesel, catalytic converters, internal-combustion engine, exhaust fumes, exhaust fumes disposal systems, diesel dispersed particles filters, exhaust fumes recirculation, selective reduction of nitrogen oxides, fuel cells, urea solution.

DOI: 10.20291/1815-9400-2019-3-68-73

На протяжении многих лет во всем мире продолжается разработка способов снижения вредных веществ, выбрасываемых транспортными средствами с приводом от двигателей внутреннего сгорания (ДВС), как бензиновых, так и дизельных, и ведется поиск экологически чистых источников энергии, которые должны привести к замене дизельного привода. На автомобильном транспорте такие исследования проводятся не одно десятилетие, что позволило разработать новые конструктивные решения, способные значительно улучшить токсические (экологические) характеристики транспортных средств. Одновременно с этим ужесточались нормы на выброс (токсичность) вредных отработавших газов (ОГ) ДВС. В результате токсичность автомобилей снижена многократно. Дизель- и тепловозостроительные заводы со значительным отставанием, но тоже приступили к решению аналогичной проблемы. Эта тенденция обусловлена не только растущим осознанием вредного воздействия выбросов ОГ в окружающую среду, но и стремлением снизить зависимость от ископаемых видов топлива в пользу возобновляемых источников энергии, так как двигатели, установленные на транспортных средствах, — главные потребители жидкого углеводородного бензинового и дизельного топлива.

На железнодорожном транспорте основными источниками загрязнения атмосферы являются тепловозы, дизель-поезда, мотовозы и автотомотрисы, а также путевые машины. Подавляющая масса выбросов загрязняющих веществ приходится на тепловозные дизели. По расчетам, основанным на расходе дизельного топлива и инструментальном контроле, выброс вредных веществ от тепловозов в системе ОАО «РЖД» составляет 1,2 млн т/год [1]. Количество вредных выбросов определяется множеством факторов: качеством и составом используемого дизельного топлива, типом и техническим состоянием дизеля, сроком службы, качеством технического обслуживания и ремонта, режимами тяги и т.д.

Отработавшие газы дизелей представляют собой сложную многокомпонентную смесь газов, паров, капель жидкостей и дисперсных твердых частиц. Всего ОГ двигателей внутреннего сгорания содержат около 200 компонентов [2]. До недавнего времени считалось, что наибольшей токсичностью обладает выхлоп карбюраторных ДВС за счет выброса CO и NO. Однако результаты проведенных в США исследований показали, что в составе ОГ дизелей присутствует до 1000 наименований твердых частиц, которые по своей агрессивности значительно превосходят газовую составляющую. Согласно современным представлениям, в общей токсичности ОГ дизелей доля твердых ча-

стиц составляет до 80 % [3]. Хорошо известно, что сажа адсорбирует на своей поверхности канцерогены, которые, попадая в организм человека, могут провоцировать образование раковых клеток. С этой точки зрения особенно опасен 3,4-бенз(а)пирен (рис. 1), наибольшие концентрации которого обнаружены при работе дизеля на средних режимах работы (4–5-я ПК).

Стоит отметить, что попытки снизить содержание сажи в ОГ дизелей приводят к значительному повышению концентрации оксида азота, а снижение выбросов оксида азота означает резкое увеличение количества сажи, т.е. уменьшение содержания одного токсичного компонента вызывает закономерное увеличение другого. Это характерно для различных режимов работы дизельного двигателя. Твердые частицы имеют размер порядка 0,25 мкм и могут длительное время находиться во взвешенном состоянии в воздухе (до 10 сут), увеличивая тем самым отрицательное воздействие токсичных веществ на самочувствие человека.

Основываясь на полученных результатах, ВОЗ и штат Калифорния (США) отнесли ОГ дизелей к наиболее опасным для здоровья человека [3, 4].

Экологическая безопасность двигателей оценивается по нормируемым и ненормируемым компонентам, опасность которых является общепризнанной [5] (рис. 2). Содержание нормируемых токсичных компонентов определяется достигнутым техническим уровнем конструкции ДВС, а их предельные концентрации устанавливаются международными и национальными стандартами [5], например нормами США (нормы Tier) [1], на которые ориентируются во многих странах мира. В последние годы резко ужесточились нормы на выброс оксидов азота и твердых частиц [1], что становится для владельцев транспортных средств с приводом от ДВС настоящей проблемой.

В дизелях тепловозов на увеличение токсичности состава ОГ влияют следующие неисправности: уменьшение давления впрыска топлива, покрытие иглы форсунки смолистыми отложениями, закоксование сопел распылителей, износ плунжерных пар топливных насосов, засорение воздухоочистителя, изменение угла впрыска, понижение температуры охлаждающей жидкости, износ деталей топливного насоса, износ деталей газораспределения и шатунно-кривошипного механизма и т.д.

Результаты наших исследований показали, что только приведение давления впрыска топлива в соответствие требованиям, обусловленным техническими условиями, позволило уменьшить содержание сажи в ОГ дизеля 8ЧН26/26 на 20–25 % [4]. Поэтому во многих депо при заходе тепловозов на техобслуживание производится очистка топливных форсунок и регулировка давления впрыска топлива.

Одновременно с ужесточением норм на выбросы вредных веществ изменяется и их качественная оценка. Вместо ограничений по дымности ОГ введено нормирование твердых частиц, на поверхности которых адсорбируются опасные для здоровья человека ароматические углеводороды. Нормирование выброса твердых частиц ограничивает их количество в значительно больших пределах, чем при ограничении дымности, которая позволяет оценивать только такое количество твердых частиц, которое делает ОГ видимыми.

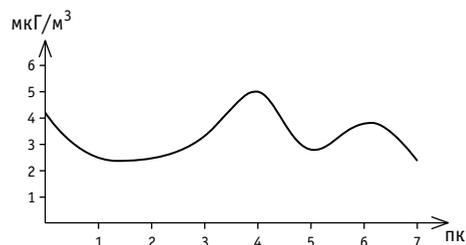


Рис. 1. Содержание 3,4-бенз(а)пирена в отработавших газах дизеля 8ЧН26/26

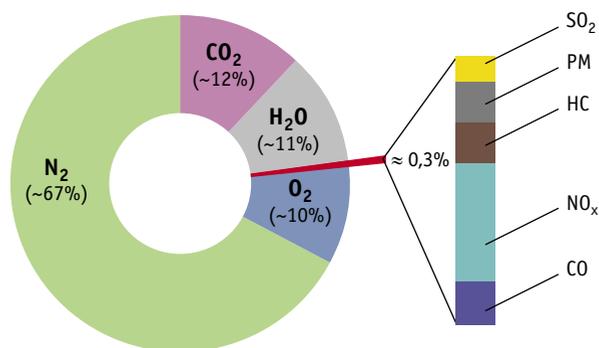


Рис. 2. Доля основных компонентов в отработавших газах дизелей:

N_2 — азот; O_2 — кислород; H_2O — парообразная вода;
 CO_2 — углекислый газ; CO — окись углерода; NO_x — оксиды азота;
PM — частицы сажи; SO_2 — сернистый ангидрид

Если вредные выбросы от автомобилей негативно сказываются на загрязнении воздушного бассейна городов (по разным оценкам, от 80 до 90 %), то выбросы от тепловозов приводят к локальному загрязнению окружающей среды на крупных сортировочных станциях, а также вблизи портов. Но самое значительное локальное загрязнение происходит при эксплуатации тепловозов на промышленных предприятиях (в основном металлургического и автомобилестроительного комплексов), когда для выполнения технологического процесса тепловозы заходят в производственное помещение на расстояние до 1200 м. В итоге воздух рабочей зоны загрязняется вредными компонентами, концентрации которых существенно превышают санитарно-гигиенические требования ГОСТа 12.1.005–89 [6].

В соответствии с техническим регламентом после ремонта производится обкатка дизеля и регулировка топливной аппаратуры. Эти процедуры выполняются на станции реостатных испытаний, расположенной на территории депо, в большинстве случаев — вблизи жилых массивов. Продолжительность обкатки составляет до 6 ч, при этом сжигается до 1,5 т дизельного топлива. При реостатных испытаниях дизели тепловозов выбрасывают в окружающую среду десятки и сотни кг вредных веществ. В целом уровень загрязнения атмосферного воздуха в районах расположения станций достигает 25–30 ПДК [7].

С тех пор как возникла проблема, связанная с необходимостью снижения выброса вредных веществ от транспортных средств, в конструкцию двигателей было внесено много

изменений, что позволило добиться соответствия существовавшим тогда (до начала текущего века) требованиям. Однако, поскольку современные нормы, регулирующие выброс, становятся все более жесткими, решить проблему можно только за счет использования эффективных технологий (систем) по обезвреживанию ОГ, так как возможности дальнейшего совершенствования конструкций дизеля практически исчерпаны.

С учетом опыта разработки систем обезвреживания ОГ дизелей на автомобильном транспорте и требований, предъявляемых к их токсичности, можно выделить следующие перспективные технические решения:

- электронный впрыск топлива;
- электронный впрыск топлива совместно с рециркуляцией охлажденных ОГ;
- электронный впрыск топлива и рециркуляция с наружным охлаждением ОГ;

сажевый фильтр или электронный впрыск топлива совместно с нейтрализатором и подачей водного раствора мочевины под катализатор для разложения оксидов азота [4].

В системе обезвреживания ОГ дизеля 8ЧН26/26 теплового ТГМ 6А были использованы каталитический нейтрализатор, в котором происходит дожигание продуктов неполного сгорания топлива (СО, СН, альдегидов, сажи и др.), и рециркуляция части ОГ во всасывающую систему дизеля, способствующая снижению выбросов оксидов азота [4].

Первоначально неохлажденные перепускаемые газы поступали непосредственно в турбокомпрессор, что приводило к отложению сажи, а также несгоревших остатков масла на внутренних частях полости турбокомпрессора. Поэтому схема перепуска была изменена — отработавшие газы стали направлять за турбокомпрессор [8].

Рециркуляция газов на линию всасывания дизеля позволяет снизить содержание оксидов азота от 18 % (на первой ПК) до 57 % (на четвертой ПК), а общую токсичность дизеля — на 16–52 %, но при этом возрастают концентрации оксида углерода и сажи [4]. При работе дизеля с рециркуляцией ОГ в режиме холостого хода происходит снижение концентрации оксидов азота на 15–33 % и часового расхода топлива на 4,5 %. Однако содержание продуктов неполного сгорания топлива растет (СО — на 20 %), причем рост содержания сажи может приводить к ее отложению в воздухоподводящем канале дизеля.

Чтобы предотвратить это, в системе рециркуляции газа непосредственно на выпускном коллекторе была установлена кассета с сотовым катализатором на металлическом носителе, в котором в качестве активного материала использовалась окись марганца (рис. 3). При прохождении рециркулируемых газов через блок частички сажи и масла доокислялись (дожигались) еще до поступления в воздухоподводящий канал дизеля.

Нами было установлено, что на катализаторах, изготовленных из окислов переходных металлов, дожигание сажи происходит при более низких температурах (450 °С), чем на катализаторах платино-палладиевой группы (600 °С) [9]. Поэтому представляется перспективным использование каталитического блока на металлическом носителе с электроподогревом, что позволяет выжигать сажу с поверхности при прохождении газов через высоконагретую область блока (рис. 4). Кроме того,

при накоплении значительного количества сажи может произойти ее неконтролируемое самовоспламенение. Использование такой схемы перепуска дает возможность значительно снизить содержание сажи в перепускаемых газах и исключить их прохождение через турбокомпрессор.

Управление перекрывающей заслонкой в системе рециркуляции газов заблокировано с ручкой контроллера, в котором установлена дополнительная шайба, т.е. управление автоматическое и связано с нагрузкой на коленчатом валу дизеля. Исполняющим механизмом служит пневмоцилиндр. Именно с контроллера посылается управляющий сигнал на открытие и закрытие перекрывающей заслонки при работе с режима холостого хода до 5-й позиции контроллера (клапана). Двигатель с рециркуляцией работает мягче и тише в режиме хо-



Рис. 3. Сотовый блок после испытаний на стенде



Рис. 4. Сотовый блок с электроподогревом

лостого хода, так как меньшее содержание кислорода приводит к понижению давления в момент сгорания топливно-воздушной смеси. Особенность этой системы состоит в том, что отбор ОГ на рециркуляцию осуществляется за сажевым фильтром дизельного двигателя. Далее газы попадают в радиатор системы рециркуляции для дополнительного охлаждения. При разработке кассеты с сотовым катализатором решалась сложная задача: с одной стороны, как можно ближе расположить блок на выпускном коллекторе для сохранения температуры газового потока, чтобы эффективно дожигать сажу (твердые частицы) и несгоревшие частички масла, а с другой стороны, как можно дальше от воздушного канала, где перепускаемые газы смешиваются со свежим воздухом для снижения температуры образовавшейся смеси.

В процессе испытаний была определена целесообразная область работы дизеля с рециркуляцией газов, которая лежит в пределах от режима холостого хода до $0,48 Ne_{ном}$. На эту область в общем балансе работы дизеля на маневровом тепловозе приходится до 80 %.

Наличие сажи в составе ОГ дизеля значительно усложняет создание систем обезвреживания выхлопа, что обусловлено ужесточением норм на выброс твердых частиц в воздушную среду: требуется снижать содержание твердых частиц в ОГ и на выпуске из нейтрализатора. Именно поэтому в городах многих стран запрещают эксплуатацию транспортных средств с дизельным приводом без установки фильтров для улавливания сажи (твердых частиц).

По мере эксплуатации в системе рециркуляции происходит засаживание поверхности блока, а также частичное отложение сажи непосредственно в его каналах. Это особенно характерно при работе на низких позициях контроллера, когда температура ОГ ниже температуры возгорания сажи и масла, и, следовательно, требуется периодически чистить блок.

Существует несколько способов повышения эффективности регенерации фильтрующего элемента дизеля:

очистка сажевого фильтра дизельного двигателя без снятия; промывка сажевого фильтра со снятием (рис. 5) [4];

выжигание сажи с поверхности фильтрующего элемента без снятия (рис. 6) [10].



Рис. 5. Промывка блока водой

При промывке со снятием возникают сложности, связанные с демонтажем сажевого фильтра из корпуса, кроме того, на промывку требуется потратить определенное количество времени.

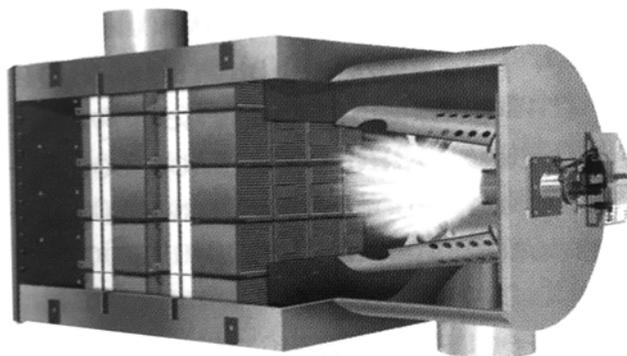


Рис. 6. Очистка сажевого фильтра с помощью пламенной горелки

При дожигании сажи (твердых частиц), уловленной в фильтрующей части на выходе из каталитического нейтрализатора, устанавливается горелка, работающая на жидком топливе. Она включается периодически по мере забивания фильтра, но при этом потребляет большое количество топлива, что является явным недостатком конструкции.

Для контроля роста давления в системе рециркуляции газов, а также в выпускном тракте устанавливаются датчики давления.

В целом использование в системе обезвреживания ОГ дизеля фильтров для улавливания сажи (твердых частиц) значительно усложняет ее конструкцию, но позволяет задержать до 97 % опасных частиц.

Система рециркуляции может выходить из строя по причине неисправностей и сбоев в работе системы питания дизельного двигателя, неполного сгорания топливно-воздушной смеси. Засаживание каналов блока приводит к снижению количества перепускаемых газов. Но с увеличением нагрузки на коленчатом валу двигателя и, как следствие, повышением температуры ОГ сажа и частицы масла выгорают, количество перепускаемых газов восстанавливается в заданных пределах, и фильтр начинает работать по полному циклу.

На бензиновых двигателях широко используются катализаторы, которые имеют в своей основе три компонента — платину, палладий и родий. Платина и палладий дожигают оксид углерода и углеводороды, в то время как родий эффективно взаимодействует с окислами азота, восстанавливая их до элементарного азота и кислорода. Преимущества таких каталитических нейтрализаторов — эффективность работы, простота изготовления и долгий срок службы.

Нейтрализаторы для дизельных двигателей инертны в отношении оксидов азота из-за большого содержания кислорода в составе ОГ, поэтому, чтобы снизить их выбросы, необходимо применять дополнительные средства.

Перспективным способом снижения содержания оксидов азота, кроме рассмотренной рециркуляции, является использование аммиака или раствора мочевины, которые подаются в поток ОГ до каталитического (селективного) нейтрализатора.

Восстановление оксидов азота аммиаком в последние 10–15 лет получило широкое развитие как базовый метод для обезвреживания NO_x в ОГ дизелей [11]. В качестве восстанавливающего реагента используют 32,5 %-й водный раствор карбамида NHCO (мочевина), который впрыскивается в поток ОГ в виде эмульсии. Мочевина хорошо растворяется в воде, ее раствор (в международной практике имеет название AdBlue) нетоксичен и удобен в эксплуатации. В качестве селективных катализаторов наибольшее распространение получили катализаторы на основе оксидов титана и ванадия, легированных промоторами в виде оксидов переходных металлов. При этом обеспечивается достаточно надежное восстановление (до 70 %) оксидов азота.

Раствор мочевины представляет собой жидкость-реагент, состоящую из деминерализованной воды и мочевины (водный раствор мочевины). Происходящая химическая реакция способствует восстановлению оксидов азота и кислорода. Однако конструкция такого устройства сложна и требует тонкой регулировки аппаратуры. Кроме того, требуется соблюдать температурный режим для предотвращения замерзания раствора мочевины (температура замерзания 32,5 %-го раствора мочевины составляет -11°C).

Если в бензиновых двигателях раствор мочевины подается сразу в топливный бак, то у дизелей он с помощью насоса через форсунку впрыскивается непосредственно в поток горячих ОГ под катализатор (чаще титановый или ванадиевый), на котором происходит разложение мочевины на аммиак и воду. В дальнейших реакциях на восстановительном катализаторе участвует аммиак. В процессе взаимодействия с ним оксиды азота (монооксид и диоксид) отдают молекулы кислорода. На поверхности катализатора под воздействием аммиака происходит восстановление оксидов азота до элементарного азота и кислорода. Использование раствора мочевины позволяет добиться ограничительных норм по выбросу оксидов азота в ОГ: в бензиновых двигателях — в соответствии с нормативами Euro 4, Euro 5 и Euro 6, в дизельных — в соответствии с требованиями Tier 4, а в дальнейшем Tier 5.

По нашему мнению, для снижения выбросов оксидов азота целесообразно применять на тепловозах рециркуляцию газа, а раствор мочевины — на станции реостатных испытаний.

Анализ систем обезвреживания ОГ дизелей на автомобильном и железнодорожном транспорте, основанный на учете ужесточающихся требований, предъявляемых к токсичности дизелей, позволяет в качестве перспективных выбрать следующие комбинированные технические меры:

- каталитический нейтрализатор с фильтром для улавливания твердых частиц и рециркуляция ОГ с фильтром для улавливания сажи;

- каталитический нейтрализатор с фильтром для улавливания твердых частиц и впрыском раствора мочевины.

Отметим, что в России технология применения аммиака или мочевины для очистки ОГ транспортных средств от NO пока не получила широкого распространения. Вместе с тем использование водного раствора мочевины для снижения выбросов оксидов азота в ОГ дизелей отличается такими достоинствами, как безопасность, удобство хранения, транспортировки и высокая

восстановительная способность аммиака, который получается из мочевины непосредственно на тепловозе (рис. 7) [12].

Ужесточение требований защиты окружающей среды от вредных выбросов активизировало деятельность тепловозостроительных компаний по разработке для подвижного состава альтернативных источников энергии, прежде всего аккумуляторных батарей, топливных элементов, солнечных батарей, которые могли бы заменить дизельный привод (рис. 8).

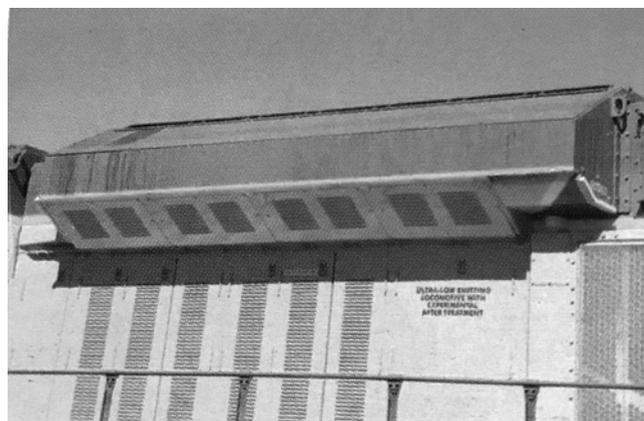


Рис. 7. Система обезвреживания ОГ для дизелей тепловоза SD 59MX № 9900

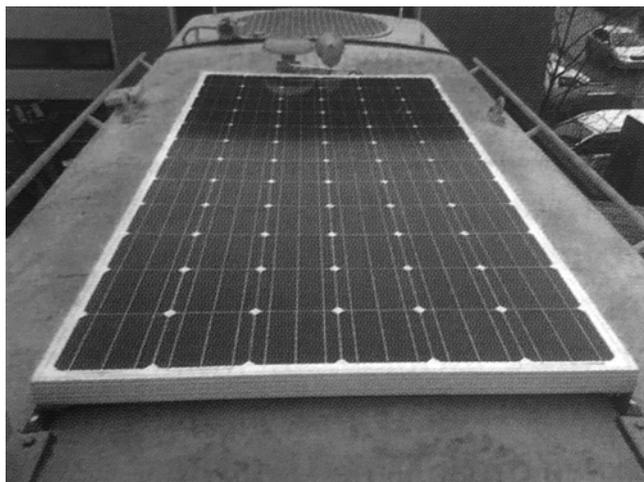


Рис. 8. Солнечная батарея, установленная на капоте тепловоза Janine [13]

Подвижной состав, оснащенный топливными элементами и аккумуляторными батареями, предназначен прежде всего для замены дизельного подвижного состава на неэлектрифицированных участках. В частности, альтернативные источники энергии должны найти применение на промышленных маневровых тепловозах, работа которых связана с заходом в производственные цеха, например, на предприятиях металлургического и автомобилестроительного комплексов.

Разработка дешевых и эффективных топливных элементов для железнодорожного транспорта — достаточно длительный

процесс, требующий существенных финансовых затрат. Внедрение топливных элементов в том числе определяется сроком их службы, а следовательно, стоимостью водорода. Предварительные результаты испытаний показали, что срок службы топливных элементов находится в пределах 15 тыс. ч работы, а срок службы тяговых батарей составляет около 10 лет [14, 15].

Производство водорода, который используется в топливных элементах, требует значительных затрат электроэнергии.

В частности, выработка 1 кВт·ч электроэнергии сопровождается образованием в среднем 0,583 кг CO₂, что фактически сводит на нет экологические преимущества использования топливных элементов, однако такие вредные выбросы создаются не при движении поездов, а на электростанциях. Поэтому использование на железнодорожном транспорте топливных элементов и других видов чистого привода вместо дизельного привода требует серьезного эколого-экономического обоснования.

Литература

1. Булаев В. Г. Экологическая безопасность тепловозов и пути ее повышения // Железнодорожный транспорт. 2011. № 8. С. 70–72. ISSN 0044–4448.
2. Марков В. А., Баширов Р. М., Габитов И. И. Токсичность отработавших газов дизелей. Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 376 с.
3. Звонов В. А., Козлов А. В., Кутенев В. Ф. Экологическая безопасность автомобиля в полном жизненном цикле / НАМИ. Москва, 2001. 248 с.
4. Булаев В. Г. Экологическая безопасность тягового подвижного состава. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2010. 164 с.
5. Новиков Л. А. Новые технологии для достижения перспективных норм вредных выбросов дизелей // Двигателестроение. 2009. № 2 (236). С. 58–59. ISSN 0202–1633.
6. ГОСТ 12.1.005–88. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. Москва : Стандартинформ, 2008. 50 с.
7. Финоченко В. А. Снижение вредных выбросов на станциях остаточных испытаний тепловозов : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Ростов-на-Дону, 1997. 20 с.
8. Восстановление оксидов азота в выхлопных газах дизельных двигателей: перспективы использования синтез-газа / В. А. Кириллов, Е. И. Смирнов, Ю. И. Амосов [и др.] // Кинетика и катализ. 2009. Т. 50. № 1. С. 22–30. ISSN 0453–8811.
9. Испытание марганец-палладиевого катализатора МПК-1 в процессе очистки отработавших газов маневровых тепловозов / В. Г. Булаев, М. А. Сагарейшвили, Л. П. Кикнадзе [и др.] // Каталитическая очистка газов : сборник научных трудов Всесоюзной конференции. Алма-Ата, 1985. С. 102–106.
10. Ввод в эксплуатацию маневрового локомотива Gravita 10 BB // Железные дороги мира. 2012. № 3. С. 49–51. ISSN 0321–1495.
11. Исследование каталитической нейтрализации отработавших газов дизеля / В. А. Звонов, З. Т. Звонова, П. П. Фесенко [и др.] // Двигатели внутреннего сгорания. 1978. № 28. С. 121–127. ISSN 0419–8719.
12. Снижение вредных выбросов тепловозов в США // Железные дороги мира. 2012. № 12. С. 37–38. ISSN 0321–1495.
13. Альтернативные источники энергии для локомотивов // Железные дороги мира. 2012. № 12. С. 32–36. ISSN 0321–1495.
14. Поезд EcoTrain с комбинированным тяговым приводом // Железные дороги мира. 2017. № 5. С. 41–43. ISSN 0321–1495.
15. Поезд Coradia iLint на топливных элементах // Железные дороги мира. 2017. № 4. С. 52–55. ISSN 0321–1495.

References

1. Bulaev V. G. Environmental safety of diesel locomotives and ways to improve it [Ekologicheskaya bezopasnost' teplovozov i puti ee povysheniya] // Railway Transport. 2011. No. 8. Pp. 70–72. ISSN 0044–4448.
2. Markov V. A., Bashirov P. M., Gabitov I. I. Toxicity of diesel exhaust fumes [Toksichnost' otrabotavshikh gazov dizeley]. Moscow : Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2002. 376 p.
3. Zvonov V. A., Kozlov A. V., Kutenev V. F. Environmental safety of motor car in full life cycle [Ekologicheskaya bezopasnost' avtomobilya v polnom zhiznennom tsikle] / NAMI. Moscow, 2001. 248 p.
4. Bulaev V. G. Ecological safety of the traction rolling stock [Ekologicheskaya bezopasnost' tyagovogo podvizhnogo sostava]. Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2010. 164 p.
5. Novikov L. A. New technologies to secure diesel engine compliance with ongoing environmental regulations [Novye tekhnologii dlya dostizheniya perspektivnykh norm vrednykh vybrosov dizeley] // Engines construction. 2009. No. 2 (236). Pp. 58–59. ISSN 0202–1633.
6. GOST 12.1.005–88. Occupational safety standards system. General sanitary requirements for working zone air [Sistema standartov bezopasnosti truda. Obshhie sanitarno-gigienicheskie trebovaniya k vozduhu rabochoy zony]. Moscow : Standardinform, 2008. 50 p.
7. Finochenko V. A. Reduction of noxious emissions at stations of diesel locomotives rheostatic tests [Snizhenie vrednykh vybrosov na stantsiyakh reostatnykh ispytaniy teplovozov] : Synopsis of PhD in Engineering Thesis. Rostov-on-Don, 1997. 20 p.
8. Reduction of nitrogen oxides in diesel exhaust: prospects for use of synthesis gas [Vosstanovlenie oksidov azota v vykhlopnykh gazakh dizeľnykh dvigateley: perspektivy ispol'zovaniya sintez-gaza] / V. A. Kirillov, E. I. Smirnov, Yu. I. Amosov, et al. // Kinetics and Catalysis. 2009. Vol. 50. No. 1. Pp. 22–30. ISSN 0453–8811.
9. Test of MPC-1 manganese-palladium catalyst in process of purification of shunting diesel locomotives exhaust fumes [Ispytanie marganets-palladiyevogo katalizatora MPK-1 v protsesse ochildki otrabotavshikh gazov manevrovyykh teplovozov] / V. G. Bulaev, M. A. Sagareyshvili, L. P. Kiknadze, et al. // Catalytic fumes purification : collection of scientific papers of the All-Union conference. Alma-Ata, 1985. Pp. 102–106.
10. Setting to work of Gravita 10 BB shunting locomotive [Vvod v ekspluatatsiyu manevrovogo lokomotiva Gravita 10 BB] // Rail International. 2012. No. 3. Pp. 49–51. ISSN 0321–1495.
11. Research of catalytic conversion of diesel exhaust fumes [Issledovanie kataliticheskoy neytralizatsii otrabotavshikh gazov dizelya] / V. A. Zvonov, Z. T. Zvonova, P. P. Fesenko, et al. // Internal Combustion Engines. 1978. No. 28. Pp. 121–127. ISSN 0419–8719.
12. Reduction of diesel noxious emissions in the USA [Snizhenie vrednykh vybrosov teplovozov v SShA] // Rail International. 2012. No. 12. Pp. 37–38. ISSN 0321–1495.
13. Alternative energy sources for locomotives [Alternativnye istochniki energii dlya lokomotivov] // Rail International. 2012. No. 12. Pp. 32–36. ISSN 0321–1495.
14. EcoTrain with combination traction drive [Poezd EcoTrain s kombinirovannym tyagovym privodom] // Rail International. 2017. No. 5. Pp. 41–43. ISSN 0321–1495.
15. Coradia iLint train on fuel cells [Poezd Coradia iLint na toplivnykh elementakh] // Rail International. 2017. No. 4. Pp. 52–55. ISSN 0321–1495.

УДК 621.33

Алексей Леонидович Каштанов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника», начальник научно-производственной лаборатории «Энергосбережение и энергоэффективность на железнодорожном транспорте» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,

Михаил Михайлович Никифоров, кандидат технических наук, заместитель директора научно-исследовательского института энергосбережения на железнодорожном транспорте Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,

Дарья Александровна Горбунова, главный технолог ЗАО «СуперОкс», Москва, Россия,

Мария Геннадьевна Медовик, младший инженер ЗАО «СуперОкс», Москва, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ ТОКОГРАНИЧИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ ДЛЯ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Alexey Leonidovich Kashtanov, PhD in Engineering, Associate Professor, Theoretical Electrical Engineering Department, Head of Research and Production Laboratory «Energy Saving and Energy Efficiency on the Railway Transport», Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,

Mikhail Mikhaylovich Nikiforov, PhD in Engineering, Deputy Director of the Research Institute for Energy Saving in Railway Transport, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,

Darya Alexandrovna Gorbunova, Production Manager, CJSC SuperOx, Moscow, Russia,

Mariya Gennadyevna Medovik, Junior Engineer, CJSC SuperOx, Moscow, Russia

Application of current limiting device based on high-temperature superconductivity for direct current traction substations

Аннотация

В статье рассматривается применение токоограничивающего устройства в качестве альтернативного решения по отношению к сглаживающим устройствам, используемым в настоящее время на тяговых подстанциях постоянного тока.

Даны сравнительные характеристики сглаживающих устройств типа РБФА-У-6500/3250, РФОСА-6500/5-3У2, РЖФА-6500 и токоограничивающего устройства на основе высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП ТОУ).

С учетом этих характеристик построена зависимость потерь электроэнергии в сглаживающем устройстве типа РБФА-У-6500 и в ВТСП ТОУ от тока нагрузки для тяговых подстанций с различным годовым расходом электроэнергии на тягу поездов.

Разработана матрица соотношения расходов электрической энергии в условиях использования сглаживающих устройств реакторного типа и ВТСП ТОУ при различных коэффициентах эффективности тяговой нагрузки.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, энергосбережение, тяговая подстанция, сглаживающее устройство, постоянный ток, токоограничивающее устройство, сверхпроводимость.

Summary

The paper considers the application of current limiting device as the alternative solution to smoothing devices currently used at direct current traction substations.

It also provides the comparative characteristics of the RBFA-U-6500/3250, RFOSA-6500/5-3U2, RZHFA-6500 smoothing devices and the current limiting device based on high-temperature superconductivity (HTSC CLD).

Taking into account this characteristics the authors have constructed the dependence of the power losses in the RBFA-U-6500 smoothing device and in the HTSC CLD from the load current for the traction substations with different annual energy consumption for motive power.

Moreover, they have also created the matrix of correlation between the energy consumption in conditions of using the reactor smoothing devices and the HTSC CLD at different coefficients of draft load efficiency.

Keywords: railway transport, energy saving, traction substation, smoothing device, direct current, current limiting device, superconductivity.

DOI: 10.20291/1815-9400-2019-3-74-79

ВВЕДЕНИЕ

Протяженность железных дорог, электрифицированных на постоянном токе, составляет около 20 тыс. км. Питание тяговой нагрузки осуществляется от постоянного (пульсирующего) напряжения 3,3 кВ, выпрямленного преобразовательными агрегатами тяговых подстанций. Наличие гармоник пульсирующего напряжения резко ухудшает, а нередко и нарушает работу устройств сигнализации, централизации, блокировки (СЦБ) и связи. Для уменьшения переменной составляющей выпрямленного напряжения между выпрямителем и тяговой нагрузкой устанавливают сглаживающее устройство (СУ) системы железнодорожного тягового электроснабжения постоянного тока [1–3].

Основное предназначение СУ — обеспечить электромагнитную совместимость тяговой сети за счет сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения, а фактически за счет снижения действующей величины напряжения отдельных гармонических составляющих выпрямленного напряжения до требуемых значений.

Применяемые в настоящее время на тяговых подстанциях СУ представляют собой совокупность фильтрующего и одного или нескольких сглаживающих реакторов.

В силу технического устаревания не все элементы установленных в настоящее время на тяговых подстанциях сглаживающих устройств могут в полной мере удовлетворять современным требованиям, поэтому необходима их планомерная модернизация или замена [4].

Например, индуктивность используемых на тяговых подстанциях реакторов, за редким исключением, составляет 5 мГн. Такая величина индуктивности в период электрификации (1940–1950 гг.) была обоснована необходимостью снизить влияние на воздушные линии связи и ограничить аварийные токи из-за низкой коммутационной способности быстродействующих выключателей того времени (ВАБ-2, АБ-2/3, АБ-2/4). Современные быстродействующие выключатели (например, ВАБ-206) способны отключать безындуктивные цепи с токами до 25 кА. К тому же сегодня тяговые подстанции оборудованы устройствами разряда УР-2, УР-3, которые радикально изменили ситуацию с отключением токов короткого замыкания, в несколько раз уменьшая рассеиваемую энергию в дугогасительных камерах быстродействующих выключателей и тем самым облегчая их работу.

Что касается требований к реактору в схеме сглаживающего устройства системы тягового электроснабжения, то с середины прошлого века также произошли значительные изменения, в том числе:

- 1) вместо ртутных 6-пульсовых повсеместно применяются надежные 12-пульсовые выпрямители, генерирующие меньшие значения токов высших гармоник;
- 2) воздушные линии связи с допустимым значением пофотометрического напряжения менее 4 В заменяются на кабельные с допустимым значением 20 В и на волоконно-оптические линии;
- 3) происходит перевод кодовой автоблокировки с несущей частотой 50 Гц на частоту 25 Гц, внедряется автоблокировка тональной частоты;

4) в эксплуатации применяется более надежное и стойкое к динамическим воздействиям токов короткого замыкания оборудование.

Перечисленные факты значительно меняют требования к принятому ранее значению индуктивности реактора.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИМЕНЯЕМЫХ СГЛАЖИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

В составе сглаживающих устройств на тяговых подстанциях постоянного тока ОАО «РЖД» используются реакторы типа РБФА-У-6500/3250 и РФОСА-6500/5–3У2 производства ООО «НИИЭФА-Энерго» (Санкт-Петербург). В настоящее время проходят экспертизу новые реакторы с пониженным сопротивлением РЖФА-6500 производства ООО «КИНЕТИК» (Москва).

В 95 % случаев на тяговых подстанциях установлены однозвенные реакторы типа РБФА-У-6500/3250 с активным сопротивлением 0,006–0,008 Ом, которые уже не выпускаются отечественной промышленностью.

С 2005 г. ООО «НИИЭФА-Энерго» производит реакторы типа РФОСА-6500, активное сопротивление одного блока которых составляет 0,008 Ом. Число блоков в СУ определяется индуктивностью реакторов, требуемой для достижения необходимого значения коэффициента сглаживания. Конструктивное исполнение блоков позволяет осуществить параллельно-последовательное (смешанное) соединение секций между собой. Активное сопротивление реактора данного типа, как правило, составляет 0,002 Ом.

Одна из последних разработок — реактор РЖФА-6500 [5]. По сравнению с реакторами других типов он имеет ряд преимуществ (табл. 1). Однако в процессе опытной эксплуатации на тяговых подстанциях Лётная Свердловской железной дороги и Углерод Западно-Сибирской железной дороги наблюдалось перенасыщение и снижение индуктивности этого устройства при повышенных токах нагрузки, что не позволяет рекомендовать его для использования до устранения несоответствия всех параметров заявленным значениям и требованиям ГОСТ.

При этом в зависимости от схемы СУ, типа реактора и величины тяговой нагрузки тяговой подстанции технологические потери в СУ изменяются в диапазоне от 0,02 до 0,35 % [6, 7].

К недостаткам СУ перечисленных типов можно отнести: повышенное активное сопротивление реакторов РБФА-У-6500/3250, а следовательно, повышенный расход на потери электрической энергии;

значительные массогабаритные показатели (значительная площадь реакторных помещений);

повышенные требования к электромагнитной совместимости вблизи места установки реактора.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ТОКОГРАНИЧИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

В качестве аналога перечисленных СУ рассмотрим целесообразность применения с точки зрения снижения потерь электрической энергии токоограничивающего устройства на основе высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП ТОУ).

ВТСП ТОУ на класс напряжения 3,3 кВ постоянного тока представляет собой новый тип электротехнических устройств, предназначенный для снижения потерь электроэнергии и продления срока службы электротехнического оборудования тяговых подстанций постоянного тока за счет ограничения токов короткого замыкания. Разработчик ВТСП ТОУ — ЗАО «СуперОкс» (Москва).

В электрическую сеть тяговых подстанций ВТСП ТОУ монтируется вместо токоограничивающих реакторов. Ограничение тока происходит посредством нелинейной характеристики сопротивления ВТСП ТОУ. При токе тяговой нагрузки менее 8 кА активное сопротивление ВТСП ТОУ стремится к нулю, а при токе более 8 кА составляет 0,9 Ом. Технические характеристики ВТСП ТОУ приведены в табл. 2.

Суточные потери энергии в реакторах СУ определяются по выражению

$$\Delta W^{СУ} = \frac{\sum_{i=1}^n I_{\text{тяг.}i}^2 \cdot (R_1 + R_2) \cdot t_i}{10^3}, \text{ кВт}\cdot\text{ч}, (1)$$

где $I_{\text{тяг.}i}$ — действующее значение тока нагрузки за период времени усреднения t_i , А;

R_1 и R_2 — омическое сопротивление реактора первого и второго звена, Ом (справочная информация);

t_i — продолжительность периода усреднения тока нагрузки, ч;

n — количество периодов усреднения тока нагрузки за сутки (например, при одноминутном интервале усреднения $n = 1440$).

Как видно из (1), потери в СУ зависят от действующего значения тока нагрузки и времени его протекания. В момент отсутствия электроподвижного состава в границах межподстанционных зон, получающих питание от тяговой подстанции, потери в СУ равны нулю.

В отличие от СУ с применением реакторов, расход электроэнергии на собственные нужды ВТСП ТОУ зависит только от тока, протекающего в главной цепи устройства, и не зависит от времени наличия тяговой нагрузки в смежных межподстанционных зонах, получающих питание от рассматриваемой тяговой подстанции. В соответствии с техническими

Таблица 1

Сравнительная характеристика реакторов РБФА-У-6500/3250, РФОСА-6500/5–3У2 и РЖФА-6500

Технические данные	РБФА-У-6500/3250	РФОСА-6500	РЖФА-6500
Номинальное напряжение, кВ	3,3	3,3	3,3
Номинальный ток, А	6500/3250	6500/7500	6500
Индуктивность, мГн	5	5	5
Масса реактора, кг	9840	6700	6000
Масса провода, кг	5520	6150	1000
Тип провода	А-240	АППТСД	А-400
Активное сопротивление, Ом	0,006/0,008	0,0023	0,002
Стоимость, млн руб.	≈8,0	18,5	7,5
Стоимость монтажа, руб.	≈100 000	≈100 000	49 900
Габаритные размеры (высота × диаметр), мм	3200×2500	—	2200×1300
Резистентность к коротким замыканиям в сети	Нет	—	Да
Обеспечение системной надежности контактной сети	Нет	Да	Да

Таблица 2

Технические характеристики ВТСП ТОУ

Характеристика	Единицы измерения	Значение
Номинальное напряжение	кВ	3,3
Наибольшее рабочее напряжение	кВ	4,1
Номинальный ток	А	1500
Ток перегрузки в течение 2 ч	А	7000
Ток срабатывания	А	> 8000
Активное сопротивление (в рабочем режиме)	мОм	0,125
Активное сопротивление (в режиме токоограничения)	Ом	0,9
Индуктивность	мГн	5
Длительность ограничения тока короткого замыкания, не менее	мс	100
Габариты (ширина × глубина × высота)	мм	1600×1740×2100
Масса	кг	2000
Электропитание	Трехфазная сеть переменного тока 380 В	
Энергопотребление:		
без нагрузки	кВт	1,5
при токе тяговой нагрузки 3,0 кА	кВт	4,5
при токе нагрузки 7,0 кА	кВт	10
Срок эксплуатации, не менее	лет	25
Климатическое исполнение по ГОСТу 15150–69 [8]	УХЛ1 от –45 до +50 °С	
Система охлаждения*	Закрытая	

*Закрытая система охлаждения не требует подпитки ВТСП ТОУ хладагентом за время эксплуатации.

характеристиками ВТСП ТОУ энергопотребление устройства имеет линейную зависимость и составляет без нагрузки 1,5 кВт·ч, при токе 3000 А — 4,5 кВт·ч,

при токе перегрузки 7000 А — 10 кВт·ч. Таким образом, расход электроэнергии на собственные нужды ВТСП ТОУ можно определить по выражению, кВт·ч:

$$W_{\text{СН}}^{\text{ТОУ}} = (5 \cdot 10^{-8} \cdot I_{\text{ТЯГ}}^2 + 0,0008 \cdot I_{\text{ТЯГ}} + 1,5) \cdot t_p \quad (2)$$

На рис. 1 приведен график соотношения потерь электроэнергии на примере произвольного графика нагрузки при использовании сглаживающих устройств (типа РБФА-У-6500) и ВТСП ТОУ.

Как видно из рис. 1, эффективность ВТСП ТОУ по сравнению с СУ других типов во многом зависит от значения тока тяговой нагрузки, с ростом которой возрастает и его экономическая привлекательность. Вторым фактором, который следует рассматривать, является график движения поездов, так как при отсутствии тяговой нагрузки, в отличие от СУ реакторного типа, ВТСП ТОУ потребляет электроэнергию на собственные нужды.

МАТРИЦА СООТНОШЕНИЯ РАСХОДОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СУ И ВТСП ТОУ

На практике, как правило, для расчета потерь энергии в СУ применяют выражение на основе расхода электроэнергии, кВт·ч:

$$\Delta W^{\text{СУ}} = \left[\frac{k_{\text{эф}} W_{\text{ТП}}^{\text{ТЯГ}}}{t_p \cdot U_d} \right]^2 \frac{(R_1 + R_2) \cdot t_p}{10^3}, \quad (3)$$

где $k_{\text{эф}}$ — коэффициент эффективности тяговой нагрузки;
 $W_{\text{ТП}}^{\text{ТЯГ}}$ — переработка электрической энергии на тягу поездов за расчетное время, кВт·ч;
 t_p — продолжительность расчетного периода, ч;
 U_d — среднее значение выпрямленного напряжения за расчетный период (при отсутствии отчетных данных принимается равным 3,4 кВ).

Как следует из выражения (3), уровень потерь во многом определяется коэффициентом $k_{\text{эф}}$, который с увеличением расхода электроэнергии на тягу поездов стремится к теоретическому значению 1,1–1,3. Поскольку тяговая нагрузка носит явно выраженный переменный характер, коэффициент $k_{\text{эф}}$ должен быть увеличен по сравнению с принятым коэффициентом $k'_{\text{эф}}$ и может достигать значений 1,4–1,65 [9], что, в свою очередь, увеличивает расчетное значение потерь электроэнергии.

С целью экспертной оценки эффективности применения ВТСП ТОУ в табл. 3 приведена матрица соотношения расходов электрической энергии при использовании СУ реакторного типа и ограничительных реакторов в зависимости от различных коэффициентов эффективности тяговой нагрузки.

ВЫВОДЫ

Токоограничивающее устройство на основе высокотемпературной сверхпроводимости представляет собой новое альтернативное решение для использования в составе сглаживающего устройства на тяговых подстанциях постоянного тока.

К преимуществам ВТСП ТОУ по сравнению с аналогами относятся:

- массогабаритные показатели;
- повышенная электробезопасность, в том числе за счет заземления корпуса устройства;
- компактное конструктивное исполнение (не требуется ограждения устройства);
- низкий уровень расхода электроэнергии на собственные нужды устройства при установке на тяговых подстанциях с высокой тяговой нагрузкой;
- отсутствие магнитных полей.

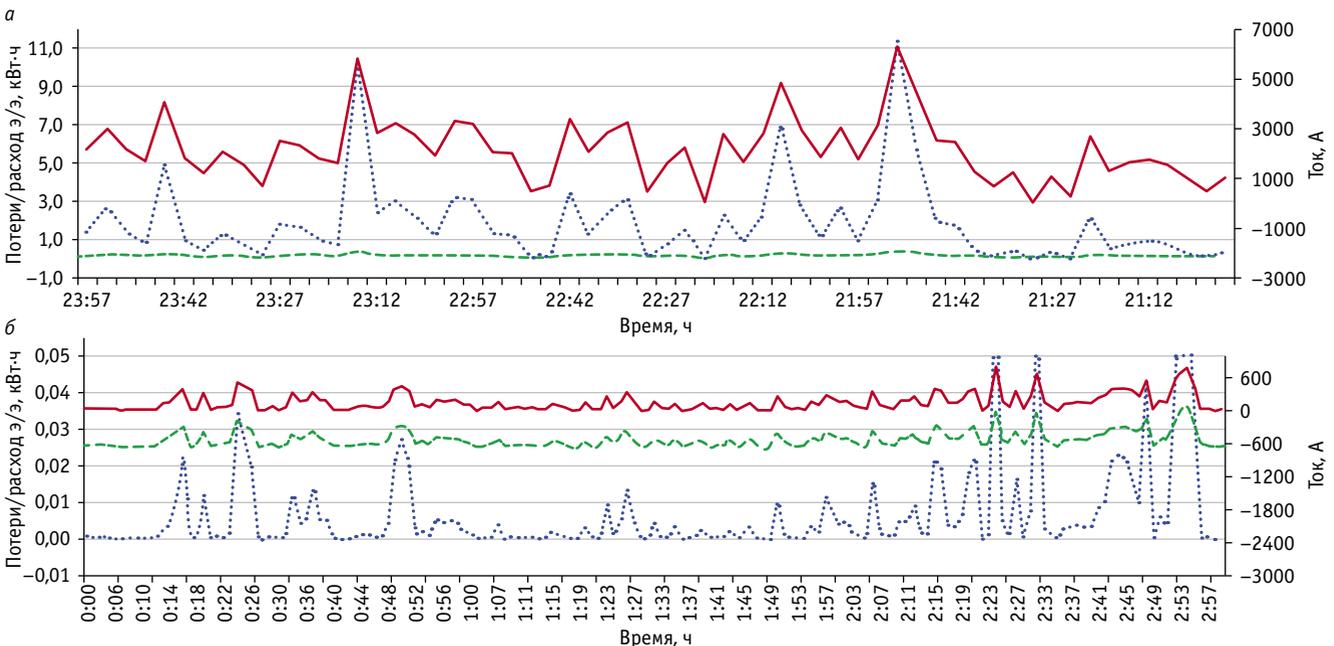


Рис. 1. Зависимость потерь электроэнергии в СУ и ВТСП ТОУ от тока нагрузки для тяговых подстанций с годовым расходом 45 млн кВт·ч (а) и 6 млн кВт·ч (б):
 — потери в СУ; - - - - - — потери ВТСП ТОУ; — — — — ток

Таблица 3

Матрица соотношения расходов электрической энергии при использовании ВТСП ТОУ и сглаживающих устройств

Расход электроэнергии на тягу поездов, млн кВт·ч/год	Коэффициент соотношения расхода электроэнергии (%)* при коэффициенте эффективности тяговой нагрузки					
	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
РФОСА-6500/5–3У2, R = 0,0023 Ом						
10	-0,09	-0,09	-0,08	-0,08	-0,07	-0,06
15	-0,08	-0,07	-0,06	-0,05	-0,04	-0,03
20	-0,07	-0,05	-0,04	-0,03	-0,02	0,00
25	-0,05	-0,04	-0,02	-0,01	0,01	0,03
30	-0,04	-0,02	0,00	0,01	0,03	0,05
35	-0,02	-0,01	0,01	0,04	0,06	0,08
40	-0,01	0,01	0,03	0,06	0,08	0,11
45	0,00	0,03	0,05	0,08	0,11	0,14
РБФА-У-6000, R = 0,006 Ом						
10	-0,05	-0,03	-0,02	0,00	0,01	0,03
15	-0,01	0,01	0,03	0,05	0,08	0,11
20	0,02	0,05	0,08	0,11	0,15	0,18
25	0,06	0,09	0,13	0,17	0,21	0,26
30	0,10	0,14	0,18	0,23	0,28	0,34
35	0,13	0,18	0,23	0,29	0,35	0,41
40	0,17	0,22	0,28	0,34	0,41	0,49
45	0,20	0,26	0,33	0,40	0,48	0,56
РБФА-У-3250/6500, R = 0,008 Ом						
10	-0,02	-0,01	0,01	0,03	0,06	0,08
15	0,02	0,05	0,08	0,11	0,15	0,18
20	0,07	0,11	0,15	0,19	0,24	0,28
25	0,12	0,16	0,21	0,27	0,32	0,39
30	0,17	0,22	0,28	0,34	0,41	0,49
35	0,21	0,28	0,35	0,42	0,50	0,59
40	0,26	0,34	0,41	0,50	0,59	0,69
45	0,31	0,39	0,48	0,58	0,68	0,79

* Коэффициент рассчитан в зависимости от расхода электрической энергии на тягу поездов.

Литература

1. ГОСТ 18624–73. Реакторы электрические. Термины и определения. Москва : Стандартинформ, 2005. 16 с.
2. ГОСТ 32676–2014. Реакторы для тяговых подстанций железной дороги сглаживающие. Общие технические условия. Москва : Стандартинформ, 2015. 12 с.
3. ГОСТ 32895–2014. Электрификация и электроснабжение железных дорог. Термины и определения. Москва : Стандартинформ, 2014. 36 с.
4. Каштанов А. Л., Комяков А. А., Комякова Т. В. Анализ эффективности работы сглаживающих устройств тяговых подстанций электрифицированных железных дорог постоянного тока по данным измерительных систем // Омский научный вестник. 2015. № 3 (143). С. 233–237. ISSN 1813–8225.
5. Шевелев Д. Ю. Модернизация схем сглаживающих фильтров тяговых подстанций электрифицированных железных дорог // Научное знание современности. 2017. № 6 (6). С. 134–137. eISSN 2541–7827.

References

1. GOST 18624–73. Reactors. Terms and definitions [Reaktory elektricheskie. Terminy i opredeleniya]. Moscow : Standardinform, 2005. 16 p.
2. GOST 32676–2014. Smoothing reactors for railway traction substation. General specifications [Reaktory dlya tyagovykh podstantsiy zheleznoy dorogi sglazhivayushhie. Obshhie tekhnicheskie usloviya]. Moscow : Standardinform, 2015. 12 p.
3. GOST 32895–2014. Electrification and electric supply of the railways. Terms and definitions [Elektrifikatsiya i elektrosnabzhenie zheleznykh dorog. Terminy i opredeleniya]. Moscow : Standardinform, 2014. 36 p.
4. Kashtanov A. L., Komyakov A. A., Komyakova T. V. Performance analysis of smoothers in traction substations of DC electrified railways using measurement systems [Analiz effektivnosti raboty sglazhivayushhikh ustroystv tyagovykh podstantsiy elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog postoyannogo toka po dannym izmeritel'nykh sistem] // Omsk Scientific Bulletin. 2015. No. 3 (143). Pp. 233–237. ISSN 1813–8225.
5. Shevelev D. Yu. Modernization of circuits of smoothing filters on traction substations of electrified railways [Modernizatsiya skhem sglazhivayushhikh fil'trov tyagovykh podstantsiy elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog] // Scientific knowledge of contemporaneity. 2017. No. 6 (6). Pp. 134–137. eISSN 2541–7827.

6. Никифоров М. М., Вильгельм А. С., Язов А. В. Оценка технологических потерь электроэнергии в системе тягового электроснабжения постоянного тока // Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте: материалы научно-практической конференции, посвященной Дню российской науки / ОмГУПС. Омск, 2012. С. 40–45.
7. Cheremisin V. T., Nikiforov M. M., Ushakov S. Y. Assessment of train traction electric energy losses // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). doi: 10.1109/FarEastCon.2018.8602528.
8. ГОСТ 15150–69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. Москва : Стандартинформ, 2005. 68 с.
9. Незевак В. Л., Эрбес В. В. Оценка влияния интервалов усреднения измерений электроэнергии на результат определения энергетической эффективности // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте : материалы III всероссийской научно-технической конференции с международным участием / ОмГУПС. Омск, 2018. С. 164–171.
6. Nikiforov M. M., Vilgelm A. S., Yazov A. V. Estimation of technological losses of electric power in the DC traction power supply system [Otsenka tekhnologicheskikh poter' elektroenergii v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka] // Innovative projects and technologies in education, industry and transport : proceedings of science and practice conference dedicated to the Day of Russian Science / OSTU. Omsk, 2012. Pp. 40–45.
7. Cheremisin V. T., Nikiforov M. M., Ushakov S. Y. Assessment of train traction electric energy losses // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). doi: 10.1109/FarEastCon.2018.8602528.
8. GOST 15150–69. Machines, instruments and other industrial products. Modifications for different climatic regions. Categories, operating, storage and transportation conditions as to environment climatic aspects influence [Mashiny, pribory i drugie tekhnicheskije izdeliya. Ispolneniya dlya razlichnykh klimaticheskikh rayonov. Kategorii, usloviya eksploatatsii, khraneniya i transportirovaniya v chasti vozdeystviya klimaticheskikh faktorov vneshney sredy]. Moscow : Standardinform, 2005. 68 p.
9. Nezevak V. L., Erbes V. V. Electricity measuring averaging interval influence evaluation on energy efficiency determination result [Otsenka vliyaniya intervalov usredneniya izmereniy elektroenergii na rezul'tat opredeleniya energeticheskoy effektivnosti] // Instruments and methods of measurement, quality control and diagnostics in industry and transport : proceedings of 3rd All-Russian scientific and technical conference with international participation / OSTU. Omsk, 2018. Pp. 164–171.

Объем статьи 0,6 авторских листа

УДК 621.332.3

Иван Павлович Неугодников, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Денис Александрович Ефимов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

КОНТРОЛЬ НАГРЕВА ПРОВОДОВ КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКИ

Ivan Pavlovich Neugodnikov, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Denis Alexandrovich Efimov, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Thermal control of catenary suspension wires

Аннотация

В статье проанализированы существующие методы контроля температуры проводов контактной подвески. Представлено устройство, которое позволяет оценить изменение температуры проводов контактной подвески в процессе эксплуатации по положению грузов компенсатора и выявить ряд неисправностей, таких как обрыв провода, опускание грузов на землю, подъем грузов выше допустимого уровня, поворот фиксаторов на угол больше допустимого и др. Диагностическая информация, полученная при помощи предлагаемого устройства, может использоваться оперативным персоналом тяговых подстанций и применяться в работе устройств релейной защиты.

Ключевые слова: контактная подвеска, контактный провод, несущий трос, компенсатор, температурное удлинение, защита, диагностика.

Summary

The paper analyses the existing methods of thermal control of catenary suspension wires. It presents a device that allows assessing the temperature changes in catenary suspension wires in operation according to the position of compensatory loads and detecting a number of faults such as wire brake, lowering of loads to the ground, lifting of loads above the permissible level, turn of the pull-off at an angle greater than the permissible angle and etc. Diagnostic information obtained with the help of the proposed device can be used by operational personnel of traction substations and can be applied in the operation of relay protection devices.

Keywords: catenary suspension, contact wire, carrying wire, compensator, thermal expansion, protection, diagnostics.

DOI: 10.20291/1815-9400-2019-3-80-84

Развитие скоростного и тяжеловесного движения на электрифицированных участках железных дорог в условиях растущих объемов перевозок — одно из главных направлений технической политики ОАО «РЖД», что предъявляет повышенные требования к системе тягового электроснабжения в целом и ее составной части — контактной сети. При этом изменяются параметры эксплуатации тяговой сети, в частности связанные с ростом потребляемой подвижным составом электрической мощности.

При увеличении токовой нагрузки на провода контактной подвески их температура растет и при определенных условиях превышает допустимые значения. Это может привести к ряду негативных последствий, например к отжигу проводов на протяженных участках контактной сети.

В настоящее время на электрифицированных железных дорогах России для компенсации температурного удлинения проводов контактной подвески применяются в основном блочные и блочно-полиспастные компенсаторы, что обусловлено простотой их конструкции, достаточной надежностью и удобством в эксплуатации. Немаловажную роль играет и их относительно низкая стоимость.

Вместе с тем в случае использования таких устройств при перегреве проводов возможно опускание грузов компенсаторов на землю и, как следствие, разрегулировка контактной подвески и нарушение нормальных условий токосъема.

Отметим еще один момент, который необходимо учитывать при анализе работы контактной подвески в условиях повышения температуры проводов: смещение вдоль пути дополнительного стержня фиксатора в месте крепления к контактному проводу не должно превышать при крайних значениях температуры воздуха $1/3$ длины фиксатора в каждую сторону от его среднего положения [1]. Превышение этого смещения нарушает нормальную регулировку контактной подвески, что может особенно негативно сказаться на токосъеме при скоростном движении.

Кроме того, нормируется угол наклона струны вдоль подвески при крайних расчетных значениях температуры, который не должен превышать 30° к вертикали [1].

В связи с вышесказанным можно сделать вывод, что контроль температуры проводов контактной подвески — задача достаточно актуальная.

Известно, что для определения нагрева проводов контактной подвески используются устройства, основанные на непосредственном измерении температуры провода с помощью различного рода датчиков температуры [2]. Они имеют сложную конструкцию, так как требуют высоковольтной развязки между проводами контактной сети и вторичными низковольтными цепями устройства контроля.

Кроме них, применяются устройства, основанные на косвенном измерении температуры провода с помощью различного рода датчиков тока и на решении уравнения нагрева проводов контактной сети [2]. Они содержат датчик тока, датчик температуры окружающей среды и скорости ветра, вычислительный комплекс и выходной орган. Алгоритм контроля предусматривает определение температуры провода для каждого текущего значения тока при данных о температуре окружающей среды и скорости ветра. Эти устройства имеют недостаточную точность измерения температуры проводов, связанную с точностью самой математической модели и исходных данных. Например, температура окружающей среды и скорость ветра вдоль участка контактной сети могут существенно отличаться от соответствующих значений, измеренных возле тяговой подстанции.

Еще один способ оценки основан на таком косвенном признаке измерения температуры проводов контактной подвески, как их удлинение при нагреве [2]. Суть данного метода заключается в следующем. При перемещении грузов компенсатора температурных изменений длины провода и достижении ими конечного выключателя подается сигнал о том, что температура провода соответствует заданному значению. В этом случае удлинение проводов, находящихся под высоким напряжением, для упрощения устройства измеряют по перемещению грузов компенсаторов анкерного участка контактной сети. Например, контактный провод марки МФ-100 полукомпенсированной контактной подвески с двухблочным компенсатором на анкерном участке длиной 1200 м при изменении температуры от 0 до 90°C вызовет перемещение грузов компенсатора примерно на 1,8 м, т.е. на 20 мм на каждый градус температуры провода [2].

Однако это устройство имеет следующие недостатки:

ограниченные функциональные возможности, что не позволяет вести постоянный контроль за положением грузов компенсатора по высоте и соответственно за температурой провода контактной подвески во всем возможном диапазоне температур воздуха окружающей среды (как при максимальных положительных, так и при максимальных отрицательных значениях), при котором должны обеспечиваться нормальная работа компенсатора и поддерживаться постоянное натяжение провода контактной подвески;

невозможность однозначно определить причину перемещения грузов компенсатора и срабатывания концевого выключателя

(например, перемещение грузов может быть вызвано не только изменением температуры провода, но и его обрывом).

ООО «Мостовое бюро» совместно со специалистами ПГУПС разработана система удаленного мониторинга контактной сети «СДУМ_КС» [3]. Система позволяет регистрировать обрыв проводов, прокачку грузов, прохождение поезда и ряд других событий, связанных с резким изменением положения грузов компенсатора.

Примером устройств, основанных на косвенном измерении температуры проводов контактной подвески, применяемых на зарубежных железных дорогах, может служить система контроля и диагностики контактной сети Sicat CMS фирмы Siemens, которая регистрирует отклонение качающегося рычага, укрепленного на блоке компенсатора, с помощью магнитных датчиков. Но необходимо подчеркнуть, что используемые на железных дорогах России и Германии конструкции компенсаторов отличаются [4].

Чтобы расширить возможности приведенных систем и учесть их недостатки, авторами статьи было предложено устройство, позволяющее не только постоянно контролировать положение грузов компенсатора по высоте и температуру провода контактной подвески во всем возможном диапазоне температур воздуха окружающей среды, но и выявлять конкретную причину перемещения грузов. Схема предлагаемого устройства приведена на рис. 1.

Устройство для контроля нагрева проводов контактной подвески содержит анкерную опору контактной сети 15, на которой закреплены анкерный хомут 16 с анкерной оттяжкой 17. К анкерному хомуту 16 прикреплена подвеска 11, к которой присоединен компенсатор температурных изменений длины провода контактной подвески. В состав устройства также входят: датчик температуры воздуха окружающей среды 6, контроллер 7 с блоком питания (блок питания на рис. 1 не показан), датчик начальных условий 8 и драйвер линии связи 9.

Компенсатор состоит из большого неподвижного блока 12, малого неподвижного блока 21 и подвижного блока 22 и предназначен для анкеровки контактного провода 13 (например, контактного провода полукомпенсированной контактной подвески или контактного провода и несущего троса компенсированной контактной подвески). Через блоки компенсатора протянут трос 20, к которому прикреплена штанга для крепления грузов 18 с грузом 19. На подвеске 11 компенсатора установлена рамка 10, выполненная в виде кольца и расположенная соосно неподвижному блоку 12 компенсатора. На рамке 10 по окружности установлены пять индуктивных датчиков положения 1–5 таким образом, чтобы при вращении неподвижного блока 12 в любой момент времени в активной зоне одного из индуктивных датчиков положения 1–5 находилась одна из четырех взаимно перпендикулярных между собой спиц 14 неподвижного блока 12 компенсатора и вызывала его срабатывание. Индуктивные датчики положения 1–5 разделены на две группы (первая группа с нечетными номерами 1, 3 и 5, вторая группа с четными номерами 2 и 4) и размещены по окружности в порядке возрастания номеров внутри каждой группы против часовой стрелки через 36° относительно друг друга. При этом датчики положения с четными

номера 2 и 4 смещены относительно датчиков положения с нечетными номерами 1, 3 и 5 на угол $180^\circ + 18^\circ = 198^\circ$ в порядке возрастания номеров против часовой стрелки. Индуктивные датчики положения 1–5 предназначены для определения величины угла поворота и направления вращения неподвижного блока 12 компенсатора, вызываемых удлинением провода контактной подвески. Величина угла поворота и направление вращения неподвижного блока 12 позволяют определить

положение грузов компенсатора по высоте, а следовательно, и фактическую температуру провода контактной подвески в любой момент времени.

Выходы индуктивных датчиков положения 1–5, датчика температуры окружающей среды 6 и датчика начальных условий 8 подключены к соответствующим входам контроллера 7, который, в свою очередь, выходом соединен с драйвером линии связи 9.

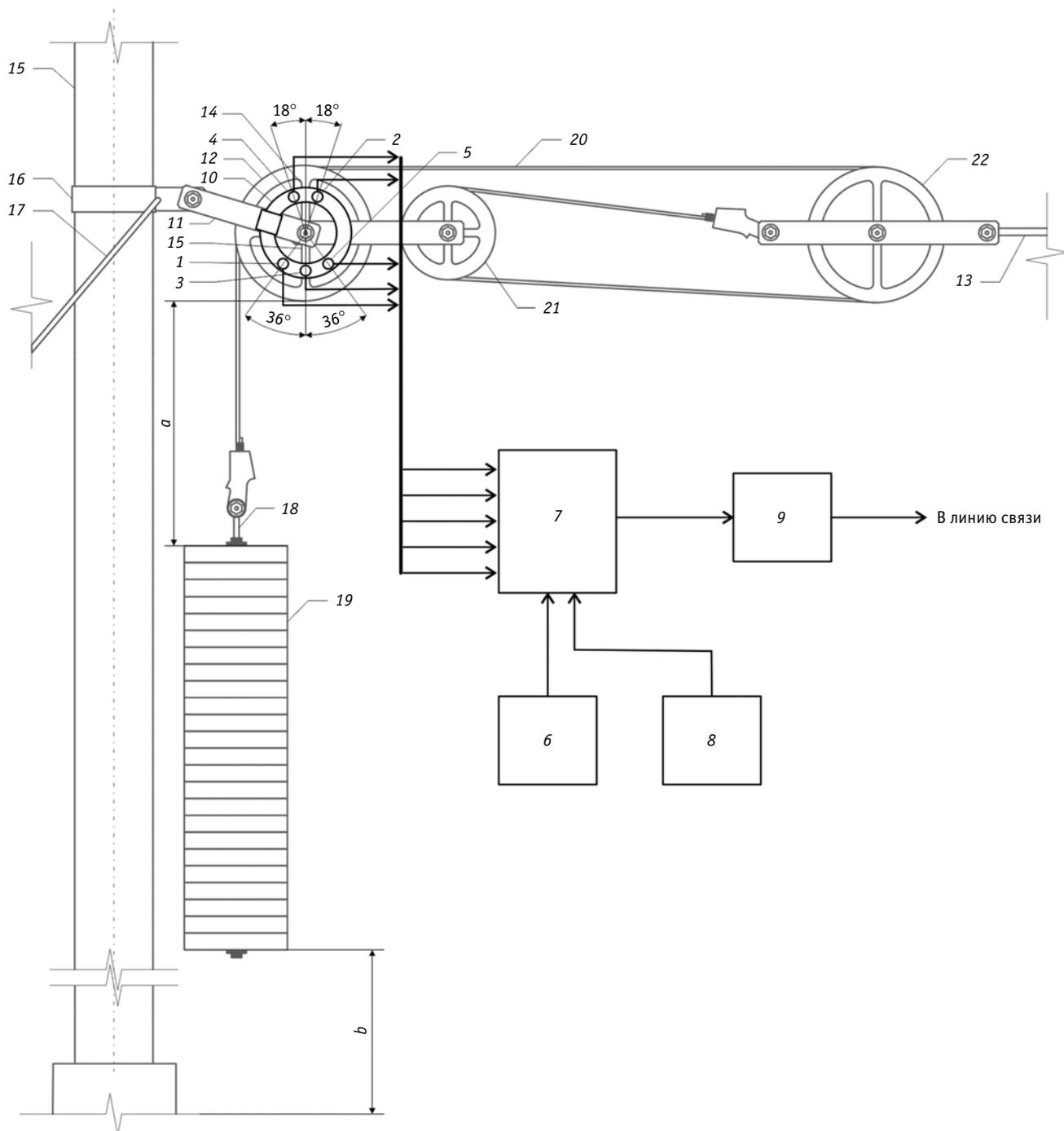


Рис. 1. Схема устройства контроля нагрева проводов контактной подвески

При подаче напряжения в контактную сеть от тяговой подстанции по контактной подвеске начинает протекать ток. В случае увеличения тока или повышения температуры окружающей среды происходит растяжение провода 13 контактной подвески вследствие его нагрева и опускание грузов 19 компенсатора, при этом обеспечивается постоянство натяжения провода 13 (например, контактного провода при полукомпенсированной подвеске). При уменьшении величины тока в контактной подвеске или снижении температуры окружающей среды происходит сокращение провода 13 в результате остывания и подъем грузов 19 компенсатора, при этом также обеспечивается постоянство натяжения провода 13, и в обоих случаях сохраняется нормальная работа контактной подвески. Подъем или опускание грузов сопровождается вращением неподвижного блока 12 компенсатора соответственно по часовой стрелке или против нее. Направление вращения и угол поворота неподвижного блока 12 фиксируются индуктивными датчиками положения 1–5.

Например, на рис. 1 показано такое положение неподвижного блока 12 компенсатора, при котором одна из спиц 14, расположенная в крайнем нижнем положении неподвижного блока 12, находится в активной зоне индуктивного датчика положения 3 и вызывает его срабатывание.

Регулировку положения грузов 19 компенсатора по высоте осуществляют в зависимости от температуры воздуха окружающей среды и расстояния от компенсатора до средней анкерной контактной подвески таким образом, чтобы расстояние a между верхом грузов 19 и неподвижным блоком 12 компенсатора при минимальной температуре воздуха окружающей среды и расстояние b между низом грузов 19 и поверхностью земли (или фундамента) при максимальной температуре воздуха окружающей среды были не менее 200 мм [1].

Предварительно после регулировки положения грузов 19 компенсатора по высоте измеряют расстояния a и b , определяющие начальное положение грузов 19. Затем начальные значения расстояний a_0 и b_0 записывают в память контроллера 7 с помощью задатчика начальных условий 8. При этом в момент настройки предлагаемого устройства контроллер 7 с выхода датчика температуры 6 фиксирует значение температуры воздуха окружающей среды.

Кроме того, в память контроллера 7 с помощью задатчика начальных условий 8 записывают: номер анкерной опоры, тип компенсатора, тип провода контактной подвески, расстояние от анкерной опоры до средней анкерной контактной подвески.

При опускании грузов 19 компенсатора происходит вращение неподвижного блока 12 против часовой стрелки, при этом последовательно срабатывают индуктивные датчики положения в порядке возрастания номеров 3, 4 и 5. При дальнейшем вращении против часовой стрелки срабатывает датчик 1, и цикл срабатывания датчиков продолжается.

При подъеме грузов 19 компенсатора происходит вращение неподвижного блока 12 по часовой стрелке, при этом последовательно срабатывают индуктивные датчики положения в порядке уменьшения номеров 2, 1. При дальнейшем вращении по часовой стрелке срабатывает датчик 5, и цикл срабатывания датчиков продолжается.

Сигналы с выходов индуктивных датчиков положения 1–5 поступают на соответствующие входы контроллера 7. При этом контроллер 7 по количеству и последовательности срабатывания индуктивных датчиков положения 1–5 определяет угол поворота неподвижного блока 12 от начального положения с шагом 18° . Контроллер 7 по изменению сигналов на выходах датчиков перемещения 3 и 4 фиксирует сокращения провода 13 на величину Δh и вычисляет новые значения расстояний a и b :

$$a_1 = a_0 - \Delta h;$$

$$b_1 = b_0 + \Delta h,$$

$$\text{где } \Delta h = \frac{360^\circ}{18^\circ} \cdot \pi d = \frac{\pi d}{20};$$

d — диаметр обода (по желобу) неподвижного блока 12 компенсатора.

В случае снижения температуры окружающей среды, если расстояние a между верхом грузов 19 и неподвижным блоком 12 компенсатора становится менее нормируемой величины (200 мм), контроллер 7 через драйвер линии связи 9 подает предупредительный сигнал оперативному персоналу о возможном нарушении работы компенсатора. При дальнейшем понижении температуры окружающей среды и расстоянии $a = 0$ контроллер 7 через драйвер линии связи 9 выдает аварийный сигнал в устройства защиты о возможном нарушении регулировки контактной подвески и необходимости отключения участка контактной сети.

Соответственно в случае повышения температуры окружающей среды, если расстояние b между низом грузов 19 и поверхностью земли (или фундамента) становится менее нормируемой величины (200 мм), контроллер 7 через драйвер линии связи 9 подает предупредительный сигнал оперативному персоналу о возможном нарушении работы компенсатора. При дальнейшем повышении температуры окружающего воздуха и расстоянии $b = 0$ контроллер 7 через драйвер линии связи 9 выдает аварийный сигнал в устройства защиты о возможном нарушении регулировки контактной подвески и необходимости отключения участка контактной сети.

Контроль за положением грузов компенсатора 19 позволяет оценивать угол поворота фиксаторов и наклона струн в контролируемой зоне анкерного участка. В случае превышения допустимого угла поворота фиксаторов или наклона струн контроллер 7 через драйвер линии связи 9 подает аварийный сигнал оперативному персоналу о возможном нарушении регулировки контактной подвески.

Одновременно контроллер 7 фиксирует время Δt , за которое произошло изменение длины провода 13 на величину Δh , и вычисляет скорость изменения длины провода 13:

$$v_{\text{пр}} = \frac{\Delta h}{\Delta t}.$$

По величине скорости изменения длины провода $v_{\text{пр}} = \frac{\Delta h}{\Delta t}$ контроллер 7 выявляет неисправность работы компенсатора, например, при превышении скорости изменения длины

провода выше критической можно диагностировать обрыв анкеруемого провода.

Если при изменении температуры окружающего воздуха не происходит вращения неподвижного блока 12, это может свидетельствовать о заклинивании компенсатора.

ВЫВОДЫ

1. На основании анализа выявлены недостатки существующих методов контроля температуры проводов контактной подвески.

2. Предложено устройство для контроля нагрева проводов контактной подвески. Оно позволяет в любой момент времени во всем возможном диапазоне температуры воздуха окружающей среды определять температуру провода контактной

подвески по положению грузов компенсатора (по значениям расстояний a и b с точностью Δh) и скорость изменения длины провода $v_{\text{пр}} = \frac{\Delta h}{\Delta t}$, а также при достижении критических

значений контролируемых параметров подавать оперативно-му персоналу предупредительный сигнал о возможном нарушении работы компенсатора или аварийный сигнал о нарушении регулировки контактной подвески (либо перегрева провода контактной подвески) и необходимости отключения участка контактной сети.

3. Внедрение предложенного устройства контроля нагрева проводов контактной подвески обеспечит расширение функциональных возможностей существующих устройств.

Литература

1. Правила устройства и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог (ЦЭ-868). Москва : Трансиздат, 2002. 184 с.
2. Фигурнов Е. П. Релейная защита : учебник. Ч. 2. Москва : УМЦ ЖДТ, 2009. 604 с.
3. Система удаленного мониторинга состояния железнодорожной контактной сети / К. Ю. Долинский, А. А. Лыков, В. Б. Соколов [и др.] // Транспорт Российской Федерации. 2010. № 5. С. 14–17. ISSN 1994–831X.
4. Шапиро К. С., Соколов В. А., Соколов В. Б. Системы мониторинга контактной сети на железной дороге // Известия ПГУПС. 2011. № 3 (28). С. 99–106. ISSN 1815–588X.

References

1. Rules of the device and technical operation of a contact line of the electric railway (TsE-868) [Pravila ustroystva i tekhnicheskoy ekspluatatsii kontaktnoy seti elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog (TsE-868)]. Moscow : Transizdat, 2002. 184 p.
2. Figurnov E. P. Relay protection [Releynaya zashhita] : textbook. Part. 2. Moscow : UMTs ZhDT, 2009. 604 p.
3. Remote monitoring of railway catenary state [Sistema udalennogo monitoringa sostoyaniya zheleznodorozhnoy kontaktnoy seti] / K. Yu. Dolinskiy, A. A. Lykov, V. B. Sokolov, et al. // Transport of the Russian Federation. 2010. No. 5. Pp. 14–17. ISSN 1994–831X.
4. Shapiro K. S., Sokolov V. A., Sokolov V. B. Monitoring systems for railway overhead contact network [Sistemy monitoringa kontaktnoy seti na zheleznoy doroge] // Proceedings of Petersburg Transport University. 2011. No. 3 (28). Pp. 99–106. ISSN 1815–588X.

Объем статьи 0,6 авторских листа

УДК 621.317

Александр Николаевич Смердин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,
Антон Сергеевич Голубков, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,
Елена Александровна Бутенко, аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УСТРОЙСТВ ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Alexander Nikolaevich Smerdin, PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Supply of Railway Transport Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,
Anton Sergeevich Golubkov, PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Supply of Railway Transport Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,
Elena Alexandrovna Butenko, postgraduate student, Electric Supply of Railway Transport Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia

Research of possibility of fiber optics devices application for monitoring catenary parameters

Аннотация

В статье рассмотрено устройство контроля параметров контактной сети, основанное на применении волоконно-оптических элементов и предназначенное для определения температуры и натяжения контактного провода. Оно может использоваться в диагностических системах, предотвращающих отказы оборудования контактной сети, а также в системах удаленного мониторинга. Преимущество предлагаемого решения заключается в том, что устройство работает под напряжением 220 В без дополнительного питания датчиков, находящихся под потенциалом контактной сети.

Ключевые слова: распределенная система диагностики, система удаленного мониторинга контактной сети, встроенные устройства диагностики, волоконно-оптические датчики, волоконные оптические элементы.

Summary

The paper considers a device for monitoring the catenary parameters. The device is based on fiber-optic elements application and is designed to determine the temperature and the tension of contact wire. It can be used in diagnostic systems that prevent catenary equipment failures as well as in systems of remote monitoring. The advantage of the proposed solution is that the device operates from a 220 V electrical grid without additional power supply of sensors under the potential of the catenary.

Keywords: distributed diagnostic system, catenary remote monitoring system, built-in diagnostic devices, fiber-optic sensors, fiber-optic elements.

DOI: 10.20291/1815-9400-2019-3-85-89

Согласно Стратегии развития железнодорожного транспорта Российской Федерации, до 2030 г. планируется расширение полигона скоростного и высокоскоростного движения до 7000 км, увеличение весовых норм поездов, повышение надежности работы устройств и снижение эксплуатационных затрат [1].

Контактная сеть, от надежной работы которой зависит выполнение графика движения поездов, являясь нерезервируемым компонентом инфраструктуры, испытывает повышенные нагрузки. Под действием внешних факторов отдельные параметры элементов и узлов контактной сети могут выходить за пределы рабочего диапазона и вызывать сбои в системе токосъема [2–4]. В результате повышенных токовых нагрузок может произойти перегрев и, как следствие, отжиг или перегорание проводов контактной подвески, что чревато нарушением графика движения поездов.

В настоящее время контроль температуры устройств контактной сети осуществляют с помощью тепловизоров в ходе инспекционных поездок. При этом для проявления возможных дефектов контактная сеть должна быть прогрета (транзитным либо тяговым током электроподвижного состава). Ее состояние после инспекционной поездки может измениться достаточно быстро, и тогда ранее полученные данные не будут отражать текущую ситуацию. Поэтому для контроля температуры необходимо использовать встроенные диагностические устройства, размещенные в критических местах возможного перегрева: там, где установлены электрические соединители, на участках начала движения, на затяжных подъемах и др. Контроль температуры контактной сети должен осуществляться непрерывно, для этого предназначены устройства встроенной диагностики,

которые позволяют на ранней стадии обнаружить неисправность и не допустить развития аварийных ситуаций, а также прогнозировать ресурс элементов контактной сети при обслуживании «по состоянию» [5, 6].

Широкое применение получили системы распределенной диагностики контактной сети, использующие устройства регистрации электромагнитных помех, акселерометры, датчики нажатия, перемещения, измерители температуры [7, 8].

Элементы таких систем, имеющие беспроводные средства обмена информацией, размещаются на устройствах контактной сети (рис. 1а). При этом они оснащены автономными источниками питания либо получают электроэнергию с помощью разделительных трансформаторов. Устройства, размещенные за пределами контактной подвески, питаются от сети, солнечных панелей и аккумуляторных батарей, используют проводные линии связи с высокой пропускной способностью (рис. 1б).

Известные реализации систем распределенной диагностики включают в себя датчики натяжения проводов, акселерометры для регистрации колебаний контактных проводов, вызванных проходящими токоприемниками электроподвижного состава (ЭПС) или ветровыми воздействиями, устройства для измерения температуры проводов и окружающей среды. Для запуска системы при приближении поезда используются датчики движения. Оцифровка показаний комплекса датчиков устройства выполняется при помощи аналогово-цифрового преобразователя (АЦП).

Данные, получаемые с устройств распределенной диагностики, обрабатываются на сервере методами операционного модального анализа, в том числе определяется спектральная плотность колебаний и основные частоты.

В России разработана система диагностики и удаленного мониторинга (СДУМ) [9] контактной сети железной дороги (рис. 2), включающая в себя блоки сбора информации о состоянии элементов контактной сети и блоки передачи информации, которые стационарно размещаются вдоль контактной сети по всей протяженности диагностируемого участка. Каждый блок стационарного устройства мониторинга (СУМ) содержит комплект датчиков для измерения параметров технического состояния элементов контактной сети, в том числе датчик натяжения (СУМ 1), перемещения (СУМ 2), температуры (СУМ 3), состояния опор контактной подвески (СУМ 4), гололеда (СУМ 5) и отжата проводов (СУМ 6). От них через стационарную линию передачи данных информация поступает на блок связи с объектом (БСО). Система получает питание от линий 220 В частотой 50 Гц [10].

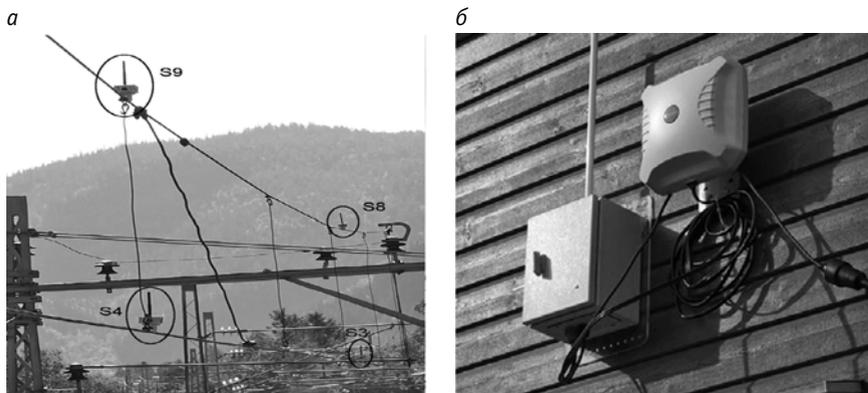


Рис. 1. Распределенная система диагностики контактной сети на линии Осло — Тронхейм: а — беспроводные датчики; б — базовый блок с приемно-передающим устройством

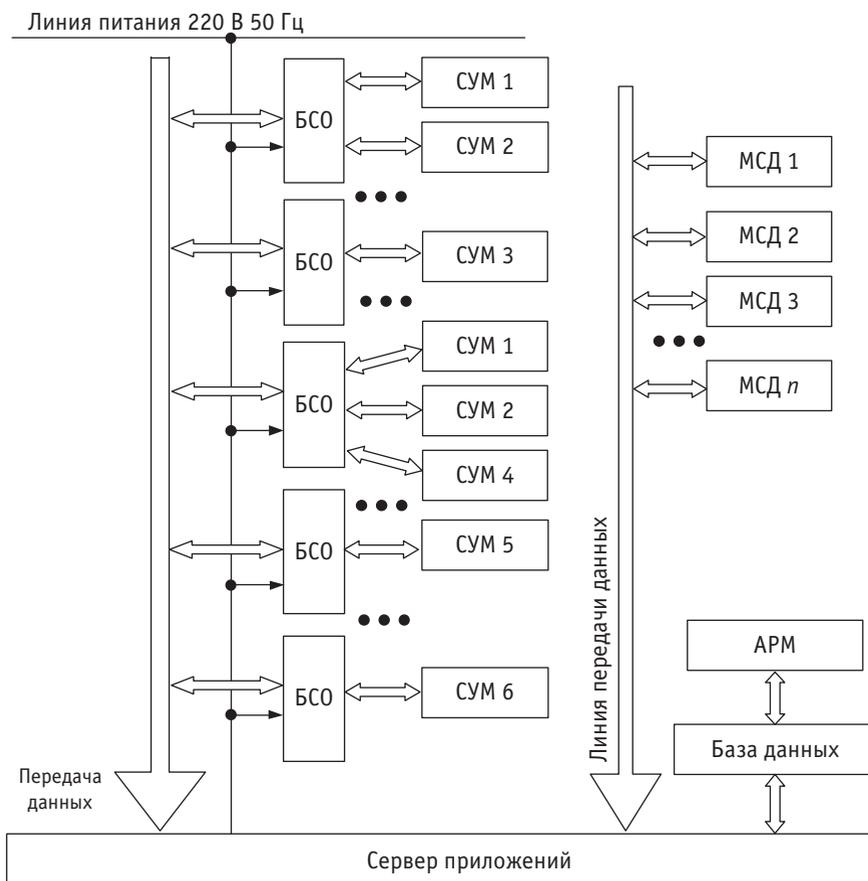


Рис. 2. Схема системы диагностики и удаленного мониторинга контактной сети железной дороги

Данные передаются со стационарных устройств на мобильную систему диагностики контактной сети (МСД), размещенную на специальном подвижном составе либо на крыше высокоскоростного подвижного состава. Далее данные передаются на автоматизированное рабочее место (АРМ) диспетчера.

В состав используемых систем диагностики и удаленного мониторинга входят электронные датчики, для бесперебойной работы которых необходимы стабильные источники питания и надежная изоляция от высокого напряжения и от заземленных частей электрооборудования. Передача данных с таких устройств затруднительна, так как проводные каналы не являются электробезопасными, а радиопомехи от ЭПС и коммутационных устройств мешают радиосвязи. Всех этих недостатков лишены системы, основанные на волоконно-оптических датчиках.

В настоящее время волоконно-оптические датчики получают все большее распространение (рис. 3). Основные их преимущества — возможность работы без дополнительного электрического питания и обеспечение электрической изоляции, что позволяет размещать сенсоры измерительных блоков под высоким напряжением.

В целях проверки пригодности данной технологии для диагностики контактной сети в ОмГУПС создан макет, демонстрирующий физические принципы работы датчиков, в осно-

ве которых используются волоконно-оптические элементы, при измерении натяжения и температуры контактного провода (рис. 4). Разработан стенд, содержащий источник когерентного излучения, оптический ввод для подачи светового излучения в оптическое волокно, коллиматор, фокусатор, отражатель, сенсор (решетка Брэгга). Оптический анализатор спектра и интерферометр используются для визуализации изменения свойств лазерного луча.

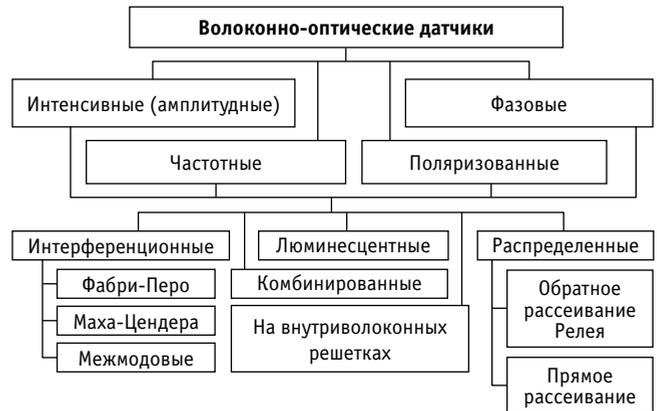


Рис. 3. Классификация волоконно-оптических датчиков

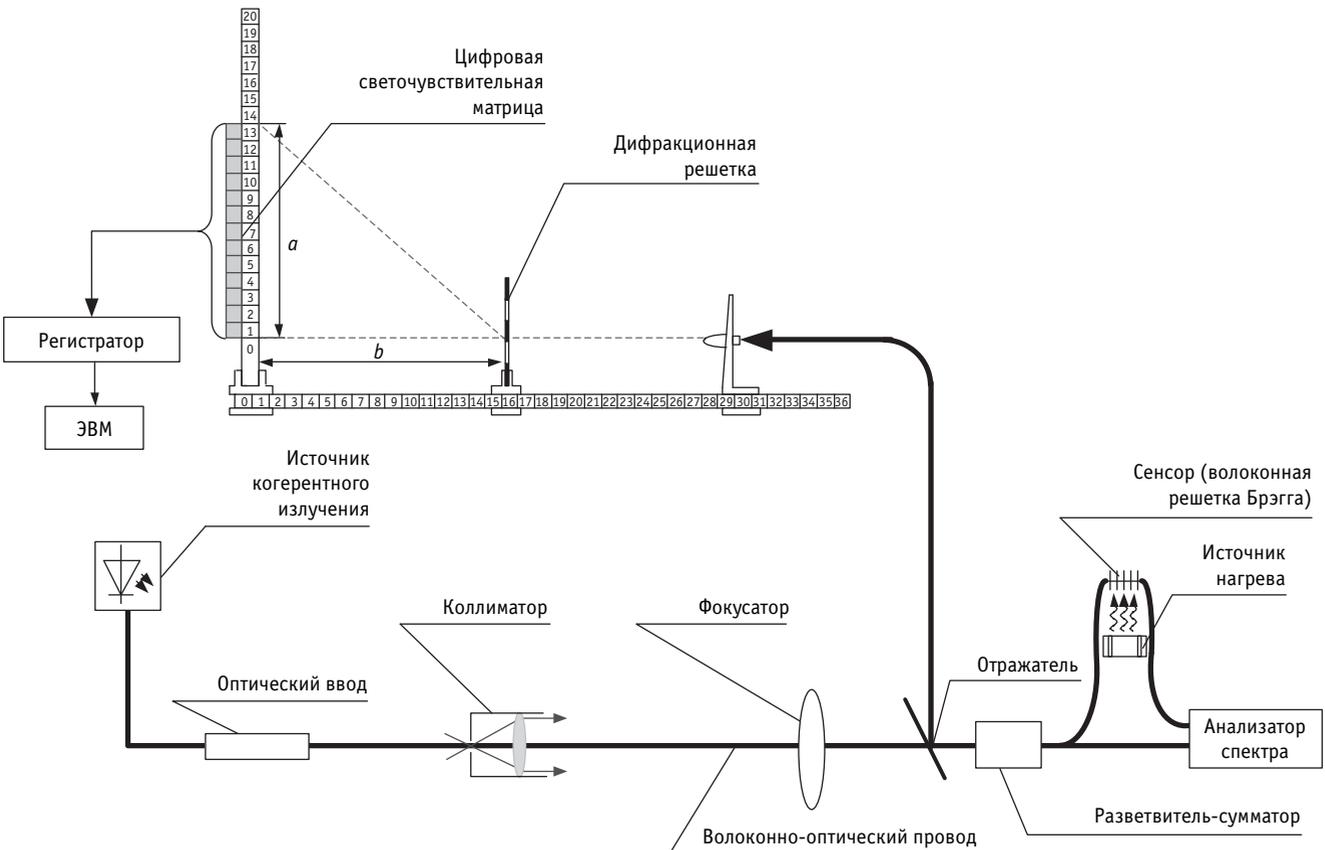


Рис. 4. Технологический макет прибора для диагностирования контактной сети с помощью дифракционной решетки

Световое излучение проходит по оптическому волокну через коллиматор для получения параллельных пучков лучей света, затем с помощью фокусатора луч подается в оптический кабель и далее поступает на решетку Брэгга, где происходит его частичное отражение от неоднородностей в сердечнике оптоволокна. При изменении температуры провода длина волны отраженного света изменяется, а измерительные приборы [11] позволяют это визуализировать в соответствии с зависимостью

$$\Delta\lambda_B = 2 \cdot \left(\Lambda \cdot \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \cdot \Delta T = \lambda_B \cdot (\alpha + \sigma) \cdot \Delta T, \quad (1)$$

где $\alpha = \frac{1}{\Lambda} \cdot \frac{\partial \Lambda}{\partial T}$ — коэффициент температурного расширения;

$\sigma = \frac{1}{n_{eff}} \cdot \frac{\partial n_{eff}}{\partial T}$ — термооптический

коэффициент оптического волокна;

n_{eff} — эффективный показатель преломления моды волоконного световода;

λ_B — постоянная длина волны, нм;

Λ — период решетки Брэгга;

T — температура, °С.

В лабораторных условиях наблюдение за изменением длины волны ведется с помощью анализаторов спектра. Однако применять эти приборы для диагностики нецелесообразно из-за их значительной стоимости, высокого энергопотребления и избыточности функциональных возможностей. Вместо них предлагается использовать оптический интерферометр, состоящий из дифракционной решетки и двух измерительных линеек с цифровой светочувствительной матрицей. При помощи дифракционной решетки длина волны определяется по формуле [12]

$$\Delta\lambda = \frac{c}{m} \cdot \frac{\Delta a}{\sqrt{\Delta a^2 + b^2}}, \quad (2)$$

где c — период дифракционной решетки;

m — порядок главных максимумов ($m = 2$);

Δa — расстояние на шкале, м;

b — расстояние от решетки до экрана, м.

При повышении температуры расстояние a увеличивается, что свидетельствует

об увеличении длины волны. После преобразования расчетных выражений [13] температура контактного провода определяется следующим образом:

$$T = T_0 + \frac{c}{m} \cdot \frac{\Delta a}{\lambda \cdot (\alpha + \sigma)} - \lambda, \quad (3)$$

где T_0 — температура монтажа датчика температуры, °С;

$\Delta\lambda$ — заданная длина волны, нм.

За счет точного определения расстояния a с помощью интерферометра можно определить температуру контактного провода по номограмме (рис. 5).

Результаты экспериментальной проверки позволили сделать вывод, что предлагаемое устройство обладает высокой чувствительностью к изменению температуры контактного провода и высокой скоростью отклика.

Устройство может быть использовано не только в лабораторных условиях, но и в натурных исследованиях контактной сети. При этом волоконно-оптические датчики устанавливаются на узлах контактной сети, а устройство размещается на потенциале земли (рис. 6). Источник питания для когерентного излучения, БСО, блок с устройствами фокусировки сигнала

устанавливаются на заземленных частях опоры контактной сети. Решетка Брэгга для определения температуры размещается на питающем зажиме. Световой луч, отраженный решеткой, поступает на интерферометр, который устанавливается на опоре, показания интерферометра преобразуются в данные о температуре и передаются на сервер приложения.

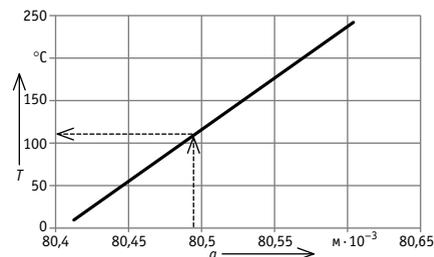


Рис. 5. Номограмма определения температуры по показаниям оптического интерферометра

Таким образом, представленное устройство может применяться в диагностических системах и при мониторинге для оценки температуры состояния контактной сети в режиме реального времени. Предлагаемая схема позволит создать точную и надежную систему встроенной диагностики контактной сети на скоростных участках железных дорог.

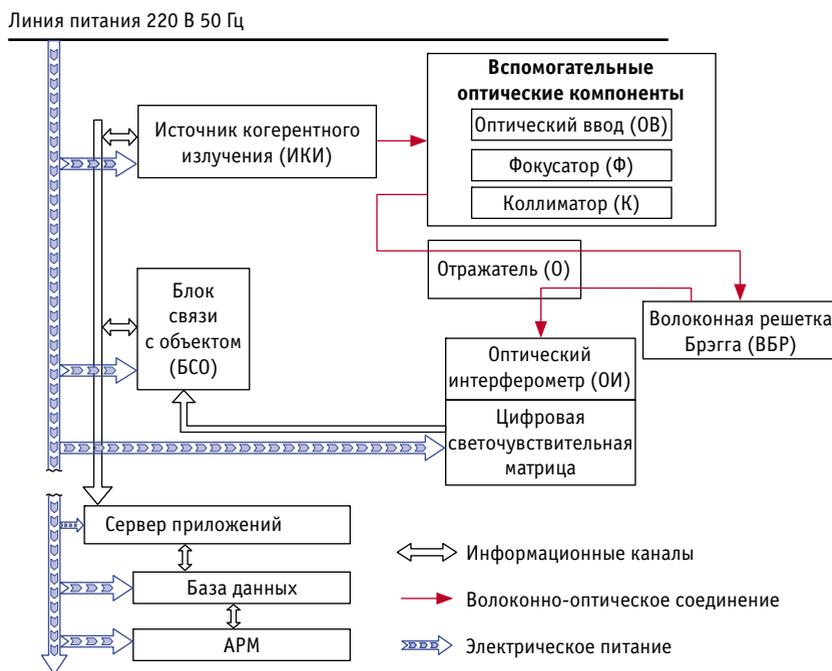


Рис. 6. Система диагностики контактной сети

Литература

1. Стратегия развития холдинга «РЖД» на период до 2030 года («Белая книга» ОАО «РЖД») / ОАО «РЖД». Москва, 2011. 340 с.
2. ГОСТ 32679–2014. Контактная сеть железной дороги. Технические требования и методы контроля. Москва : Стандартинформ, 2015. 12 с.
3. ГОСТ 55647–2013. Провода контактные из меди и ее сплавов для электрифицированных железных дорог. Технические условия. Москва : Стандартинформ, 2014. 10 с.
4. Правила устройства и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог (ЦЭ-868). Москва : Трансиздат, 2002. 184 с.
5. Михеев В. П. Контактные сети и линии электропередачи : учебник. Москва : Маршрут, 2003. 416 с.
6. Ковалев А. А., Шаюхов Т. Т. Оценка риска отказа участка контактной сети // Транспортное дело России. 2015. № 5 (120). С. 142–145. ISSN 2072–8689.
7. Huang X., Sun Q., Han X. An on-line monitoring method of temperature of conductors and fittings based on GSM SMS and Zigbee // 3rd IEEE conference on industrial electronics and applications, 2008. Pp. 1522–1527.
8. Navik P., Ronnquist A., Stichel S. A wireless railway catenary structural monitoring system: Full-scale case study // Case Studies in Structural Engineering. 2016. No. 6. Pp. 22–30. ISSN 2214–3998.
9. Способ и система диагностики и удаленного мониторинга контактной сети железной дороги / В. Г. Непомнящий, Г. В. Осадчий, Д. Н. Пристенский [и др.] : патент 2444449 Российская Федерация. № 2010137656/11; заявл. 07.09.10; опубл. 10.03.12. Бюл. № 7.
10. Проект КС-400.Э3–15. Схемные и конструктивные решения по контактной сети участка Москва — Казань — Екатеринбург.
11. Шлемба И. С. Методы опроса распределенных волоконно-оптических измерительных систем и их практическое применение : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Новосибирск, 2018. 135 с.
12. Определение длины волны излучения гелий-неонового лазера с помощью дифракционной решетки. URL: https://studopedia.ru/9_116730_opredelenie-dlini-volni-izlucheniya-geliiy-neonovogo-lazera-s-pomoshchyu-difraktsionnoy-reshetki.html (дата обращения: 14.05.2019).
13. Мисбахов Р. Ш. Волоконно-оптическая многосенсорная система для контроля температуры коммутационных и токоведущих элементов энергетических объектов на основе брегговских решеток с двумя симметричными фазовыми сдвигами : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Казань, 2017. 174 с.

References

1. Strategy of the development of the holding Russian Railways for the period up to 2030 (White Paper of JSC Russian Railways) [Strategiya razvitiya kholdinga «RZhD» na period do 2030 goda («Belaya kniga» ОАО «RZhD»)] / JSC Russian Railways. Moscow, 2011. 340 p.
2. GOST 32679–2014. Contact line for railway. Technical requirements and control methods [Kontaktynaya set' zheleznoy dorogi. Tekhnicheskiye trebovaniya i metody kontrolya]. Moscow : Standardinform, 2015. 12 p.
3. GOST 55647–2013. Copper and copper alloys trolley wires for electric railways. Specifications [Provoda kontaktnye iz medi i ee splavov dlya elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog. Tekhnicheskiye usloviya]. Moscow : Standardinform, 2014. 10 p.
4. Rules of the device and technical operation of a contact line of the electric railway (TsE-868) [Pravila ustroystva i tekhnicheskoy ekspluatatsii kontaktnoy seti elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog (TsE-868)]. Moscow : Transizdat, 2002. 184 p.
5. Mikheev V. P. Contact networks and power lines [Kontaktnye seti i linii elektropredachi] : textbook. Moscow : Route, 2003. 416 p.
6. Kovalev A. A., Shayuhov T. T. The risk assessment phase failure contact network [Otsenka riska otkloneniya uchastka kontaktnoy seti] // Transport business of Russia. 2015. No. 5 (120). Pp. 142–145. ISSN 2072–8689.
7. Huang X., Sun Q., Han X. An on-line monitoring method of temperature of conductors and fittings based on GSM SMS and Zigbee // 3rd IEEE conference on industrial electronics and applications, 2008. Pp. 1522–1527.
8. Navik P., Ronnquist A., Stichel S. A wireless railway catenary structural monitoring system: Full-scale case study // Case Studies in Structural Engineering. 2016. No. 6. Pp. 22–30. ISSN 2214–3998.
9. Method and system for diagnostics and remote monitoring of railway contact network [Sposob i sistema diagnostiki i udalennogo monitoringa kontaktnoy seti zheleznoy dorogi] / V. G. Nepomnyashhiy, G. V. Osadchiy, D. N. Pristenskiy, et al. : patent 2444449 Russian Federation. No. 2010137656/11; filed 07.09.10; publ. 10.03.12, Bulletin No. 7.
10. Project KS-400.E 3–15. Schematic and design solutions for the contact network of the Moscow — Kazan — Ekaterinburg section [Proekt KS-400.E3–15. Skhemnye i konstruktivnye resheniya po kontaktnoy seti uchastka Moskva — Kazan' — Ekaterinburg].
11. Shlemba I. S. Methods of interviewing distributed fiber-optic measuring systems and their practical application [Metody oprosa raspredelennykh volokonno-opticheskikh izmeritel'nykh sistem i ikh prakticheskoe primeneniye] : PhD in Engineering Thesis. Novosibirsk, 2018. 135 p.
12. Determination of the wavelength of a helium-neon laser using a diffraction grating [Opredelenie dliny volny izlucheniya geliy-neonovogo lazera s pomoshh'yu difraktsionnoy reshetki]. URL: https://studopedia.ru/9_116730_opredelenie-dlini-volni-izlucheniya-geliiy-neonovogo-lazera-s-pomoshchyu-difraktsionnoy-reshetki.html (access date: 14.05.2019).
13. Misbakhov R. Sh. Fiber-optical multi-sensor system for controlling the temperature of switching and current-carrying elements of energy objects based on Bragg gratings with two symmetric phase shifts [Volonno-opticheskaya mnogosenornaya sistema dlya kontrolya temperatury kommutatsionnykh i tokovedushhih elementov energeticheskikh ob'ektov na osnove breggovskikh reshetok s dvumya simmetrichnymi fazovymi sdvigami] : PhD in Engineering Thesis. Kazan, 2017. 174 p.

Объем статьи 0,6 авторских листа

Уважаемые читатели и авторы журнала «Транспорт Урала»!

Если вам нравится наш журнал, вы можете оказать содействие в его развитии, перечислив денежные средства по реквизитам:

Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС

ИНН-КПП 6670317893/667001001

ОГРН 1156600001470

620075, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. Шевченко, д. 20, помещение 1

Р/с 40703810863010000192

в ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ

к/с 30101810900000000795

БИК 046577795

Назначение платежа: «Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС».

Ваша финансовая поддержка позволит нам увеличить число публикаций, повысить индексы цитирования журнала и наших авторов.

Уважаемые руководители инновационных компаний и предприятий!

Предлагаем вам услуги по продвижению вашей продукции через сеть Ассоциации выпускников УЭМИИТ-УрГУПС.

Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС — это кооперация большого числа неравнодушных людей различных сфер деятельности, окончивших наш университет.

Кроме того, предлагаем услуги по подбору молодых специалистов, по организации поиска решений прикладных и научных задач в рамках диссертационных работ, выполняемых в УрГУПС.

Всю необходимую информацию вы можете получить по тел. (343) 221-24-67 или на сайте <http://www.usurt.ru/vypusknikam/assotsiatsiya-vypusnikov-urgups>

Извещение	<p>Получатель: Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС КПП: 667001001 ИНН: 6670317893 ОКТМО: 65701000 Р/сч.: 40703810863010000192 в: ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ БИК: 046577795 К/сч.: 30101810900000000795 Код бюджетной классификации (КБК): _____ Платеж: Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС Плательщик: _____ Адрес плательщика: _____ ИНН плательщика: _____ № л/сч. плательщика: _____ Сумма: _____ руб. ____ коп. Подпись: _____ Дата: «___» _____ 2019 г.</p>
Квитанция	<p>Получатель: Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС КПП: 667001001 ИНН: 6670317893 ОКТМО: 65701000 Р/сч.: 40703810863010000192 в: ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ БИК: 046577795 К/сч.: 30101810900000000795 Код бюджетной классификации (КБК): _____ Платеж: Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС Плательщик: _____ Адрес плательщика: _____ ИНН плательщика: _____ № л/сч. плательщика: _____ Сумма: _____ руб. ____ коп. Подпись: _____ Дата: «___» _____ 2019 г.</p>

Научно-технический журнал «Транспорт Урала» DOI:10.20291/1815-9400

№ 3 (62), 2019 год

Издается с июня 2004 г. Выходит 1 раз в квартал

Подписной индекс в общероссийском каталоге «Почта России» — 46463

Свидетельство о регистрации средства массовой информации Роскомнадзора
ПИ № 77-18098 от 27 мая 2004 г.

Свидетельство на товарный знак (знак обслуживания) № 577040.

Зарегистрировано в Государственном реестре товарных знаков
и знаков обслуживания Российской Федерации 6 июня 2016 г.

Учредитель и издатель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС)

Адрес учредителя и издателя:

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Адрес редакции:

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66.

Тел. (343) 221-24-90

<http://www.usurt.ru/transporturala>

e-mail: EPupova@usurt.ru

Главный редактор:

Александр Геннадьевич Галкин

Научный редактор:

Александр Эрнстович Александров

Выпускающий редактор и корректор:

Елена Семеновна Пупова,

тел. (343) 221-24-90, 8-912-61-07-229,

e-mail: EPupova@usurt.ru

Верстка и дизайн:

Андрей Викторович Трубин

Автор фотографии на обложке:

Дмитрий Васильевич Поморцев

Журнал включен ВАК в перечень рецензируемых научных изданий,
в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций
на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

Подписано в печать 30.09.2019 Выход в свет 16.10.2019

Тираж 250 экз. Формат 60×90/8

Цена 330 руб.

Отпечатано в соответствии с качеством предоставленного оригинал-макета

в типографии ООО «Универсальная Типография «Альфа Принт».

620049, Свердловская обл., г. Екатеринбург, пер. Автоматики, д. 2ж.

Тел. 8-800-300-16-00. Сайт: www.alfaprint.ru

Заказ № 10704

© ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», 2019

