

научно-технический

журнал

ISSN 2220-4245

ИЗВЕСТИЯ

№ 4(32)

2017

Транссиба



РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

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

EDITORIAL BOARD

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

Захаренко Елена Игоревна – ответственный секретарь (Омск).

СОДЕРЖАНИЕ

Подвижной состав железных дорог

- Кондратенко Е. В. Алгоритмическое решение теплового контроля технического состояния котлов железнодорожных цистерн 2
- Лукс Д. Ю. Оценка динамических качеств грузового вагона с тележкой 18-9855 16
- Сидоров О. А., Смердин А. Н., Томилов В. В. Исследование температуры нагрева полоза токоприемника и способы ее снижения 25
- Супчинский О. П. Потери мощности в узлах и агрегатах как показатель эффективности использования электровоза 35
- Харламов В. В., Попов Д. И., Афонин А. П. Экспериментальные исследования процесса коммутации в коллекторных тяговых двигателях подвижного состава 45

Транспортная энергетика

- Батрашов А. Б. Сравнение моделей токораспределения в контактных подвесах постоянного тока 54
- Горькин А. В., Гателюк О. В. Определение допустимого числа отключений быстродействующих выключателей в зависимости от величины и количества отключенных токов 68
- Ковалева Т. В., Комякова О. О., Пашкова Н. В. Математическая модель системы тягового электроснабжения переменного тока с учетом волновых процессов 77
- Лукьянова О. А., Заренков С. В., Сая И. Л. Исследование влияния силы сухого трения в узлах крепления поворотных консолей на изменение натяжения по длине анкерного участка электрифицированной железнодорожной магистрали 88
- Никифоров М. М., Ушаков С. Ю., Каштанов А. Л. Технология учета расхода электроэнергии электроподвижным составом с использованием информационно-измерительных комплексов и технические требования к таким комплексам 101

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

- Борисенко Д. В., Присухина И. В., Лунев С. А. Математическая модель рельсовой цепи для генерации обучающей выборки при решении задач машинной классификации 111
- Давыдов А. И., Соколов М. М., Анорина Е. Е., Кукина Л. В. Алгоритм выбора оптимального маршрута электромеханика при обслуживании устройств автоматики и телемеханики на железнодорожной станции 121
- Малютин А. Г., Лаврухин А. А., Окишев А. С. Архитектурные аспекты реализации корпоративной информационной системы мониторинга и учета ресурсов 130

Путь и искусственные сооружения

- Савельев С. В., Пермяков В. Б., Шушубаева М. К. О повышении эффективности использования вибрационных катков при строительстве земляного полотна железной дороги 142

Организация производства на транспорте

- Аксенов В. А., Юдаева О. С., Сорокина Е. А. Анализ условий труда и производственных факторов в аспекте влияния на здоровье мойщиков-уборщиков подвижного состава 152

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

Учредитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Омский государственный университет путей сообщения»

(ОмГУПС (ОмИИТ))

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35

УДК 533.17

Е. В. Кондратенко

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

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОТЛОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЦИСТЕРН

Аннотация. В статье рассмотрено решение задачи по контролю герметичности котлов железнодорожных цистерн с использованием современных методов контроля. Описаны мероприятия и оснастка, необходимые для оценки технического состояния сосудов больших объемов, предложены алгоритмы реализации поэтапных операций проведения контроля и анализа обработки результатов.

Предложенный метод контроля технического состояния котлов железнодорожных цистерн основан на использовании серийной тепловизионной аппаратуры, что позволяет снизить экономические затраты на проведение контроля и повысить культуру труда дефектоскописта.

Ключевые слова: тепловой контроль, железнодорожная цистерна, термограмма, неразрушающий контроль.

Yevgeny V. Kondratenko

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

ALGORITHMIC SOLUTION OF THERMAL CONTROL OF THE TECHNICAL CONDITION OF RAIL TANKS

Abstract. The author considered the problem solving of control of the boiler hermeticity of railway tanks using contemporary control methods. The author described the activities and equipment which are necessary for assessment of technical state of large-volume vessels. The implementing algorithms of step-by-step operations for monitoring and analyzing the results processing are proposed.

The proposed method of technical condition of the railway tanks boilers is based on the use of serial thermal imaging equipment, which allows to reduce the economic costs of monitoring and improve the working culture of the flaw inspector.

Keywords: thermal control, thermal image, rail tank, non-destructive testing.

В последние годы вопрос обеспечения безопасности эксплуатации подвижного состава и транспортировки грузов резко обострился из-за сильной изношенности вагонного парка и участвовавших случаев технологических аварий и катастроф. В полной мере это относится и к цистернам, которые составляют более 12 % от всех вагонов инвентарного парка ОАО «РЖД».

Утечки вещества из цистерны вызваны воздействием многих факторов, но всегда обусловлены образованием сквозных дефектов в элементах конструкции котла.

С целью обнаружения сквозных дефектов при ремонте цистерн согласно нормативно-технической документации используют методы неразрушающего контроля. К таким методам относятся ультразвуковой, визуально-измерительный, магнитный, капиллярный и манометрический. Данные методы решают задачу по локализации и определению характеристик сквозных дефектов, однако они достаточно трудоемки, что приводит к простоям цистерн при проведении контроля и являются субъективными, поэтому актуальна задача разработки и внедрения высокопроизводительного способа неразрушающего контроля, который снизит

объемы контроля и позволит оперативно определить техническое состояние котлов железнодорожных цистерн.

В существующих нормативных документах, регламентирующих неразрушающий контроль деталей и узлов подвижного состава в условиях вагоноремонтного депо, не отражены методики и аппаратные средства для проведения тепловых испытаний, поэтому необходимо создать нормативно-техническую базу с целью практического применения тепловых методов контроля на стадиях ремонта котла железнодорожной цистерны.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Подобрать аппаратные и программные средства для проведения теплового контроля, при этом учесть особенности конструкции цистерны и разрешающую способность аппаратуры с целью выявления сквозных трещин малого раскрытия.

2. Разработать методику проведения теплового контроля герметичности котлов железнодорожных цистерн. Для этого составить алгоритм проведения контроля, который включает в себя последовательность операций с целью выявления сквозных дефектов в теле котла цистерны.

3. Разработать методику обработки результатов теплового контроля котла цистерны. Для этого необходимо изложить последовательность операций, проводимых по обнаружению размеров сквозных дефектов и проведению их количественной оценки.

Разработка требований к методике и оснастке теплового контроля технического состояния котлов железнодорожных цистерн. Анализ нормативно-технической документации инфракрасного контроля различных объектов промышленности позволил сформулировать требования, предъявляемые к методике и оснастке теплового способа контроля технического состояния железнодорожных цистерн. С учетом конструктивных особенностей цистерн и условий организации работы на вагоноремонтных предприятиях методика теплового контроля должна обеспечивать [1 – 3] следующее:

- локализацию аномальных участков температуры ниже порогового уровня;
- определение количественных параметров выявленных температурных аномалий;
- применение серийной инфракрасной аппаратуры;
- использование как штатного, так и специализированного программного обеспечения

для проведения анализа полученных результатов.

Локализация и анализ температурных аномалий должны быть основаны на алгоритмах, использующих принципы сравнения с пороговым уровнем чувствительности. Обнаружение температурных аномалий должно осуществляться при наличии аппаратных шумов и внешних помех, обеспечивая при этом заданный уровень достоверной регистрации.

Применяемая при контроле тепловизионная аппаратура должна обладать оптимальными параметрами для регистрации тепловых полей поверхности контроля:

частота регистрации температурных аномалий должна обеспечивать регистрацию в течение всего времени проведения контроля;

температурная разрешающая способность должна быть в 8 – 10 раз меньше изменения температуры в области дефекта;

геометрическая разрешающая способность должна быть не более 0,5 от минимального размера дефекта;

погрешность измерения температуры не должна превышать требуемую погрешность контроля;

поле обзора аппаратуры должно полностью охватывать контролируемую зону цистерны.

Одним из важных требований, предъявляемых к контролю, является итоговая погрешность результатов, состоящая из погрешности ввода исходных данных, погрешности измерения температуры и погрешности обработки результатов. Согласно нормативно-технической

документации итоговая погрешность не должна превышать порогового уровня чувствительности.

Применяемое при контроле программное обеспечение должно удовлетворять системным требованиям тепловизионной аппаратуры и решать следующие задачи:

- определение пороговых значений;
- локализация температурных аномалий тепловизионных снимков;
- количественная оценка размеров температурных аномалий с последующим расчетом геометрических размеров дефектов;
- накопление базы данных с привязкой результатов контроля к конкретному объекту;
- формирование отчета по результатам теплового контроля.

Разработка технологии теплового контроля технического состояния котлов железнодорожных цистерн. Проведение теплового контроля технического состояния котлов железнодорожных цистерн в условиях вагоноремонтного депо требует проведения ряда обязательных операций. Принципиальная схема контроля приведена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Принципиальная схема теплового контроля

Согласно приведенной принципиальной схеме все операции контроля можно разделить на четыре группы. Каждая группа включает в себя последовательность операций, пропуск которых может повлечь за собой ошибки и снижения уровня чувствительности контроля. Для детального анализа каждой группы развернем принципиальную схему.

Подготовительные операции являются неотъемлемой частью любого вида неразрушающего контроля, так как позволяют подготовить аппаратуру и объект контроля к испытаниям.

Алгоритм проведения с пошаговым изложением подготовительных операций представлен на рисунке 2.

Согласно приведенному алгоритму подготовительные операции можно разделить на четыре этапа, а именно:

- 1) изучение объекта контроля;
- 2) подготовка теплочувствительного оборудования к контролю;
- 3) определение теплофизических характеристик окружающей среды;
- 4) введение объекта в режим контроля.

Такая последовательность операций обусловлена достижением высокого уровня достоверности проводимого контроля и исключением мешающих факторов на уровень чувствительности.

Цистерны в вагоноремонтное депо приходят в пустом виде, предварительно они прошли очистку и пропарку. Очистка котлов цистерн от остатков перевозимых веществ осуществляется на специализированных промывочно-пропарочных станциях. В результате такой очистки и дегазации котла выдается документ о допуске его к ремонту.

Прежде чем проводить контроль, котел необходимо осмотреть и изучить его технические документы. Это делается для того, чтобы выявить зоны повышенного дефектообразования. При этом во время проведения осмотра следует удалить с поверхности котла остатки перевозимых веществ и дефекты, видимые глазом: коррозию, окалину, облупившуюся краску и др. Загрязнение поверхности может привести к снижению уровня чувствительности за счет различных коэффициентов теплопроводности.

Подвижной состав железных дорог

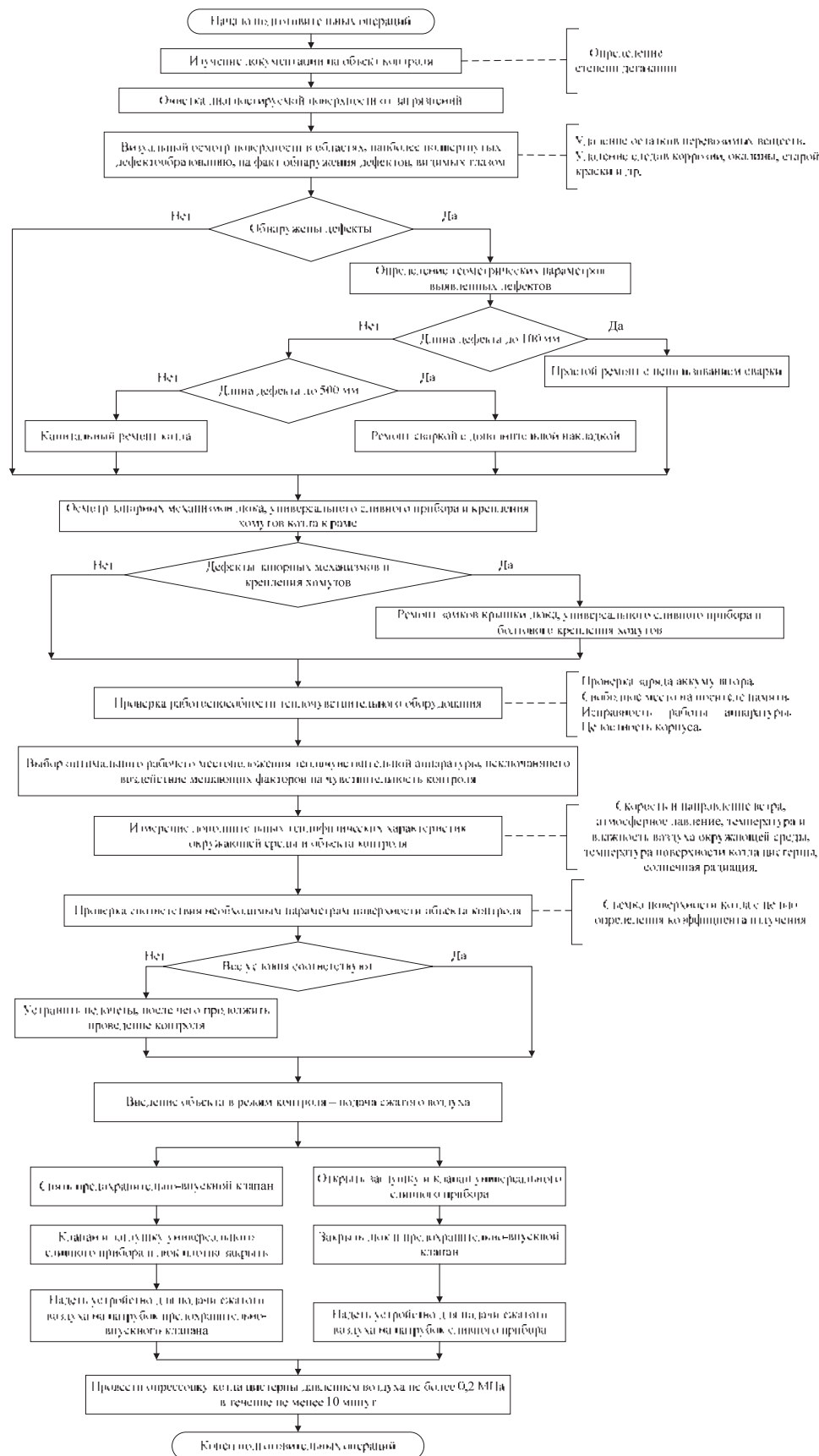


Рисунок 2 – Алгоритм проведения подготовительных операций контроля

В случае обнаружения дефекта во время осмотра необходимо произвести ремонт котла. При этом вид ремонта характеризуется размером дефекта. Если обнаружен поверхностный дефект, то его удаляют путем зачистки поверхности.

Если обнаружен сквозной дефект (например, трещина) длиной до 100 мм, то согласно Правилам [4] ремонт проводится с использованием сварки. Для этого производится высверливание дефекта по всей длине и его заварка.

Если длина обнаруженного дефекта не превышает 500 мм, то такой дефект устраняют с использованием дополнительной накладки. При этом дефект также высверливается по всей длине, заваривается, а сверху на поверхность котла наваривается накладка из металлического листа толщиной не менее 4 мм.

Котлы, имеющие сквозной дефект, длина которого более 500 мм, отправляются на капитальный ремонт, где предусмотрена замена броневого листа.

Для создания герметичности контролируемого котла необходимо, чтобы запорные механизмы люка и универсального сливного прибора были в исправном состоянии. Если во время осмотра котла обнаружены неисправности запорных механизмов, необходимо произвести их ремонт.

Важнейшими подготовительными операциями являются настройка и проверка работоспособности используемой теплочувствительной аппаратуры. Подготовка аппаратуры начинается с непосредственного осмотра целостности корпуса и линзы устройства. Далее необходимо проверить уровень заряда основной и дополнительной аккумуляторных батарей и носителей памяти устройства. Эти операции выполняются для своевременного предупреждения отказа устройства.

Для повышения уровней достоверности и чувствительности используемого метода следующим этапом подготовительных операций являются контрольные измерения параметров окружающей среды, а именно: атмосферного давления, влажности и температуры воздуха окружающей среды, направления и силы (скорости) ветра, при необходимости – уровня солнечной радиации. Данные характеристики окружающей среды влияют на чувствительность аппаратуры, а их количественные значения используются при расчете браковочной чувствительности и размеров дефекта.

Введение котла цистерны в режим контроля заключается в подаче в него сжатого воздуха. Так как рассматриваемый способ теплового контроля является активным методом, подача газа под давлением в котел используется как тепловая стимуляция сквозных дефектов. При этом воздух в котел из центральной пневмомагистрали депо может подаваться двумя способами:

1) через патрубок предохранительно-впускного клапана, который расположен на верхнем листе котла около люка. Для этого предохранительно-впускной клапан снимают, заглушку универсального сливного прибора и люк плотно закрывают. Далее на освобожденный от клапана патрубок надевают специальное устройство для подачи воздуха в котел. Давление воздуха в последнем должно составлять не более 0,2 МПа;

2) через патрубок универсального сливного прибора. Для этого заглушку и клапан универсального сливного прибора открывают, а люк закрывают. На патрубок сливного прибора надевают специальное устройство для подачи воздуха в котел.

Для достаточной степени охлаждения берегов течи необходимо произвести опрессовку газа в течение 10 минут. Этого времени достаточно для обнаружения градиента температуры на поверхности котла дефектов, имеющих длину от 3 мм и более [6].

По завершении подготовительных операций производится контроль, который заключается в последовательном сканировании поверхности котла теплочувствительным оборудованием, например, тепловизором. Алгоритм проведения операций контроля приведен на рисунке 3.

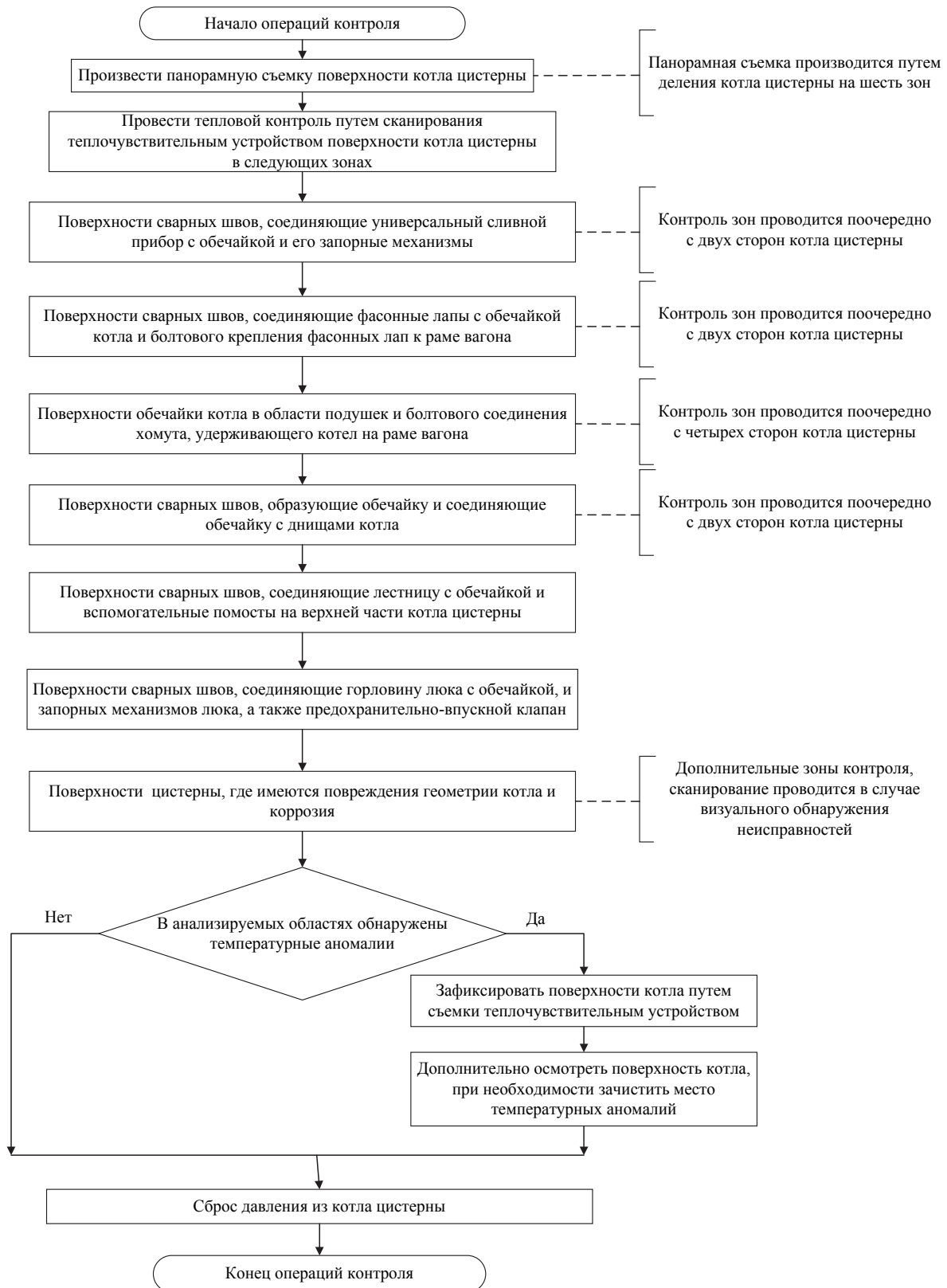


Рисунок 3 – Алгоритм проведения операций контроля

Сканирование котла начинается с панорамной съемки поверхности с целью определения среднего уровня температуры и оценки качества анализируемой поверхности.

Для этого котел цистерны условно делится на шесть частей (зон) (рисунок 4).

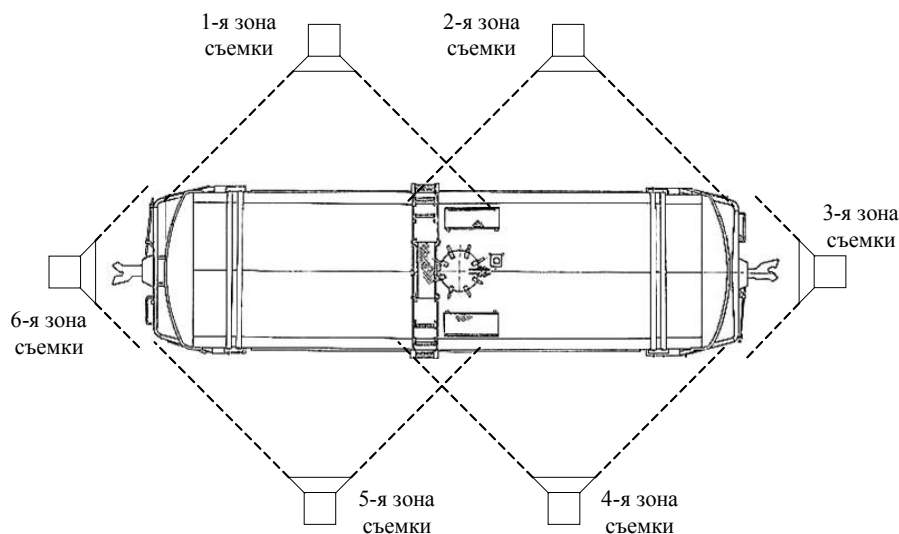


Рисунок 4 – Панорамная съемка котла цистерны по зонам

Такое распределение зон с перекрытием позволяет полностью охватить всю поверхность котла.

Далее производится последовательная съемка котла в зонах, наиболее подверженных дефектообразованию (рисунок 5).

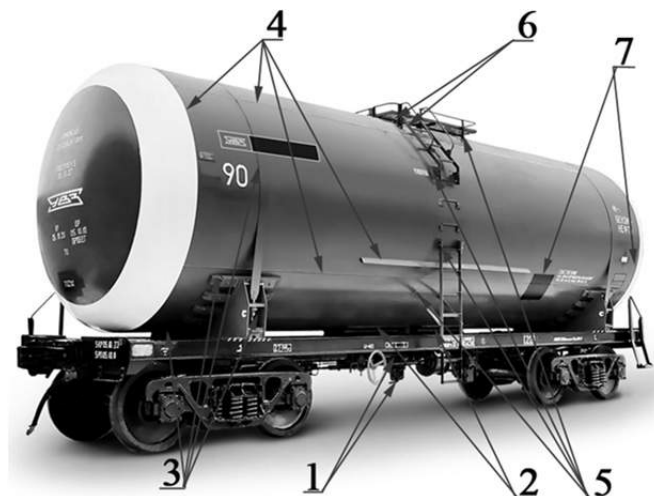


Рисунок 5 – Зоны котла цистерны, наиболее подвергнутые дефектообразованию

На рисунке 5 отмечены зоны контроля: 1 – поверхности сварных швов, соединяющие универсальный сливной прибор с обечайкой и его запорные механизмы; 2 – поверхности сварных швов, соединяющие фасонные лапы с обечайкой котла и болтовое крепление фасонных лап к раме вагона; 3 – поверхности обечайки котла под подушками и болтовое соединение хомута, удерживающего котел на раме вагона; 4 – поверхности сварных швов, образующие обечайку и соединяющие ее с днищами котла; 5 – поверхности сварных швов, соединяющие лестницу с обечайкой и вспомогательные помосты на верхней части котла цистерны; 6 – поверхности сварных швов, соединяющие горловину люка с обечайкой и его запорные механизмы люка, а также предохранительно-впускной клапан.

Контроль таких зон осуществляется поочередно, при этом оператору, выполняющему контроль, следует двигаться по заранее выбранному маршруту. Маршрут сканирования зон контроля выбирается в начале проведения контроля. Предполагается два вида маршрута: обход котла цистерны по часовой и против часовой стрелки. При таком обходе последовательно осматриваются все поверхности и зоны котла, что позволяет локализовать дефект после проведения анализа термограмм.

Проведение анализа результатов контроля (термограмм) осуществляется на персональном компьютере с использованием штатного программного обеспечения по расчету геометрических размеров дефекта. Алгоритм последовательных операций анализа термограмм представлен на рисунке 6.

Снимки, которые получены в ходе проведения контроля, импортируются на компьютер. Посредством разработанной программы по расчету геометрических размеров дефекта производится расчет порога чувствительности.

С целью уточнения порога чувствительности программа в автоматизированном режиме производит сравнение тепловизионных снимков контролируемых зон, полученных до нагружения котла цистерны избыточным давлением и после него. Такой подход позволяет скорректировать пороговое значение температуры за счет определения коэффициента излучения и исключить влияние низкочастотных составляющих шума при измерении температуры дистанционным способом.

В результате такого расчета получаем значение температуры, которое определяет уровень браковочной чувствительности. Преобразование термограмм производится с использованием функции объединения двух типов изображений. Данная функция реализована в штатном программном обеспечении тепловизионной аппаратуры. Объединение термограммы с реальным изображением производится по четырем меткам, выбранным оператором поочередно на каждом изображении. Далее устанавливаются уровень прозрачности тепловой картины и пороговый уровень чувствительности. В результате получаем изображение контролируемой поверхности с участками аномальной температуры (рисунок 7).

Области пониженной температуры на полученных изображениях характеризуются наличием дефектов на поверхности котла.

Информацию локализации градиента температуры заносим в программу по расчету геометрических размеров дефектов. В результате расчета программа выдает информацию об эквивалентных площадях и геометрических размерах выявленного дефекта.

Выявленный тепловым способом контроля дефект следует подтвердить, используя другие методы контроля. Одним из простых и наглядных методов, применяемых на железнодорожном транспорте, является магнитопорошковый метод контроля. Данный метод заключается в намагничивании зоны дефекта в перпендикулярном направлении развития дефекта и нанесении магнитного индикатора на контролируемую поверхность. По окончании подтверждающего контроля составляется отчет в виде протокола. Последовательность оформления результатов контроля и мероприятий, проводимых при обнаружении дефектов, представлена в виде алгоритма на рисунке 8.

Отчет по результатам контроля формируется по заранее разработанной форме. Форма отчета представлена в программе по расчету геометрических размеров дефекта.

В готовую форму заносятся информация о цистерне, шифр оператора и результаты теплового контроля с подробным описанием термограмм. В случае проведения подтверждающего контроля отчет дополняется дефектограммой. В конце отчета делается вывод о степени герметичности котла и допуске его к эксплуатации.

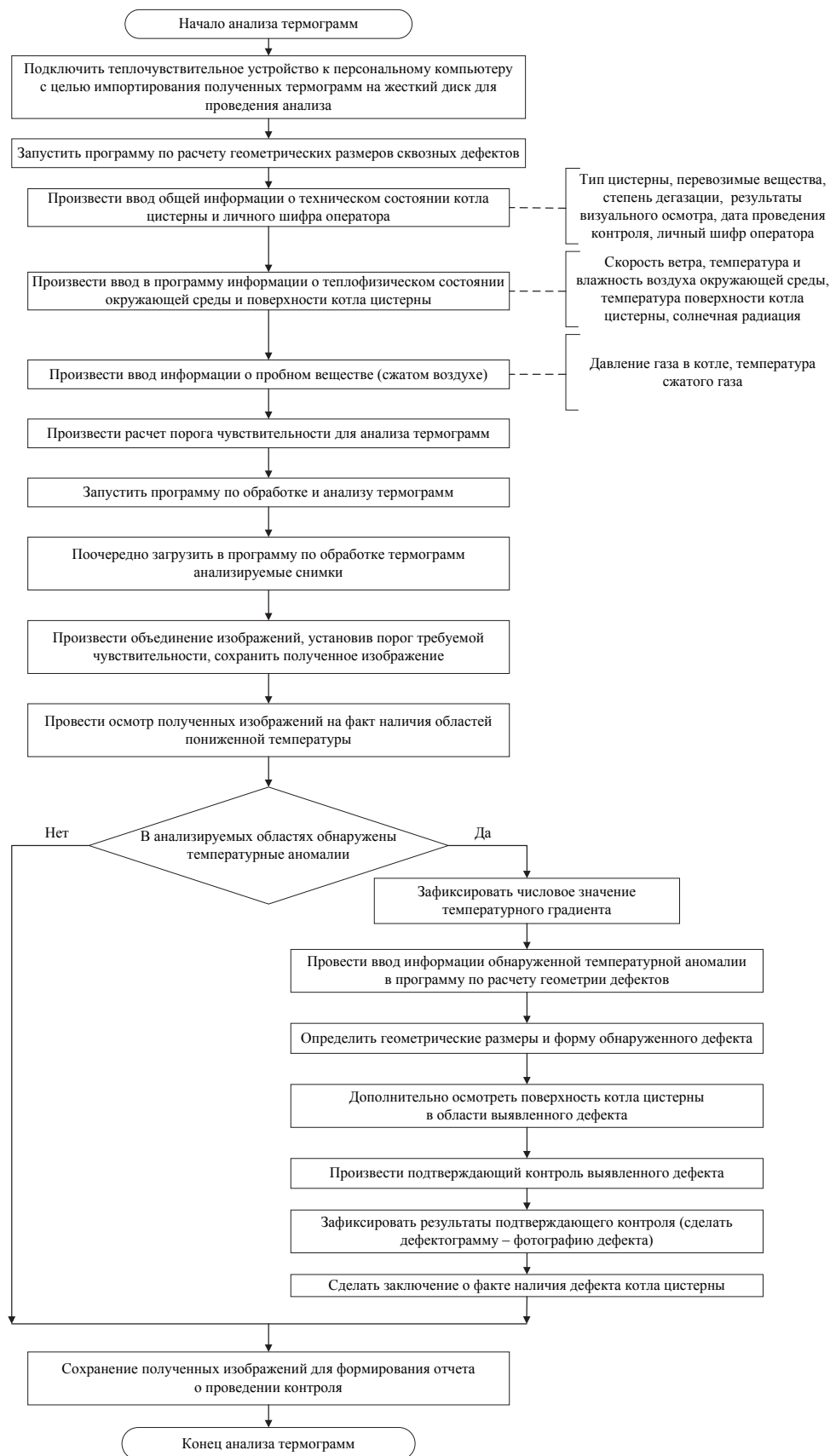


Рисунок 6 – Алгоритм проведения анализа термограмм

В случае наличия дефектов следует отправить котел в ремонт с пометкой точного типа и места расположения дефекта. После ремонта котел железнодорожной цистерны подвергается контролю повторно.

Годными к эксплуатации являются котлы, прошедшие испытания и не имеющие на своей поверхности дефектов.

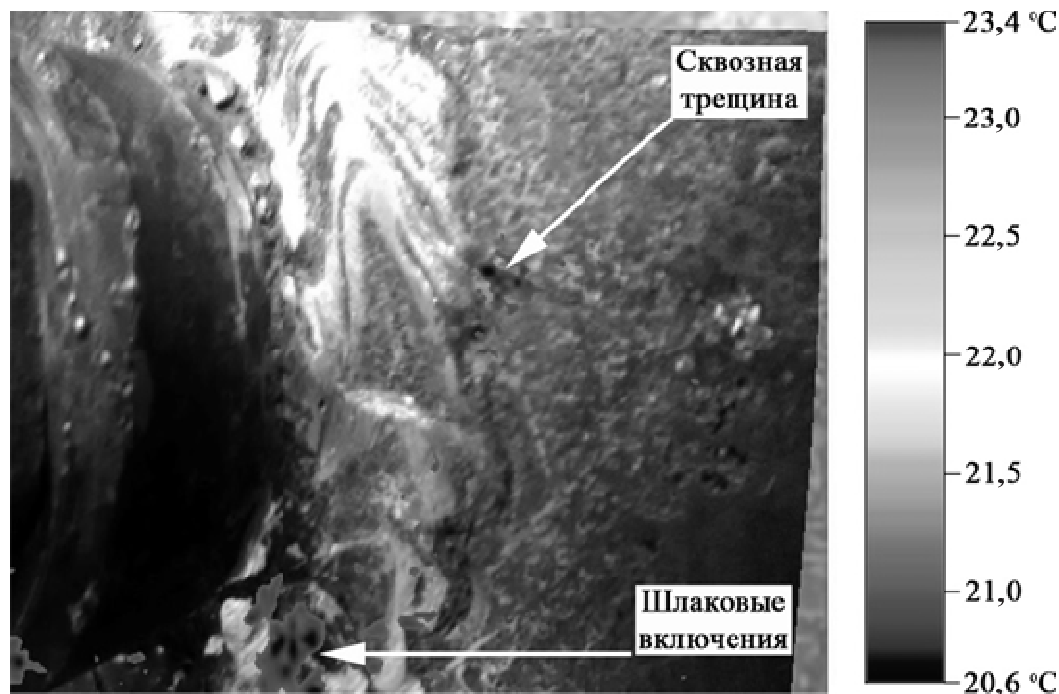


Рисунок 7 – Пример обработки термограммы

Разработка программного обеспечения теплового контроля технического состояния котлов железнодорожных цистерн. В ходе исследования разработаны алгоритмы работы программного обеспечения по анализу результатов теплового контроля и формирования отчета о контроле. Программное обеспечение имеет блочную структуру, объединенную в единый комплекс:

- блок ввода исходных данных;
- блок определения пороговых значений;
- блок расчета характеристик дефектов (расчет эквивалентных размеров);
- блок расчета погрешности результатов контроля в зависимости от погрешности вводимых данных;
- блок оценки герметичности котла:
 - а) котел герметичен – отсутствие сквозных дефектов;
 - б) котел негерметичен – наличие сквозных дефектов;
- блок формирования отчета о контроле с подробным описанием дефектов.

На рисунке 9 приведен алгоритм программного обеспечения.

Программа анализа результатов контроля имеет два режима работы: «Контроль» и «Архив». В режиме «Контроль» осуществляются анализ тепловых образов и локализация дефектов путем деления множества значений на две группы: $D_1(x, y)$ – значения, величина температуры которых меньше порогового уровня или равна ему; $D_2(x, y)$ – значения, величина температуры которых больше порогового уровня.

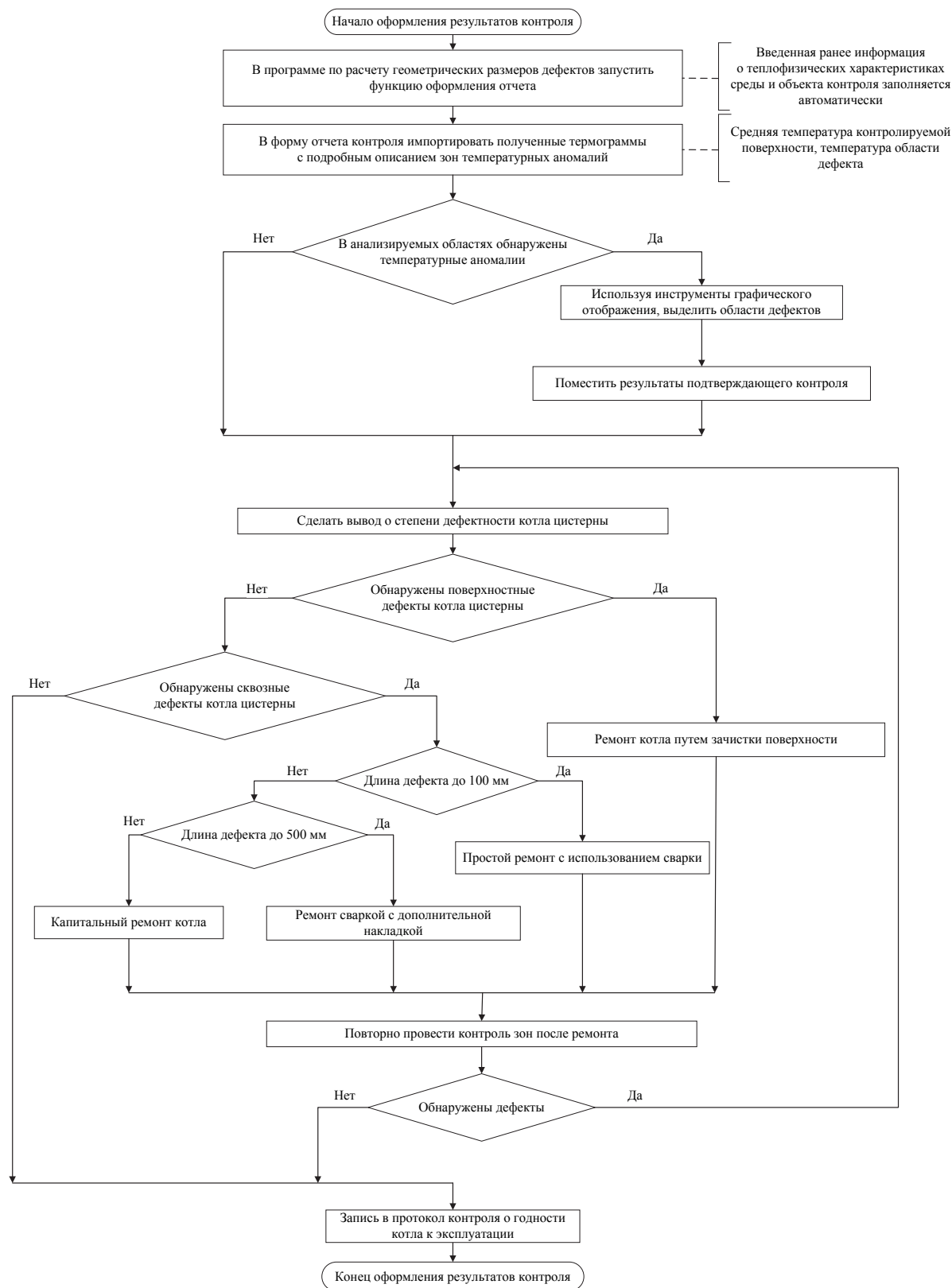


Рисунок 8 – Алгоритм оформления результатов контроля

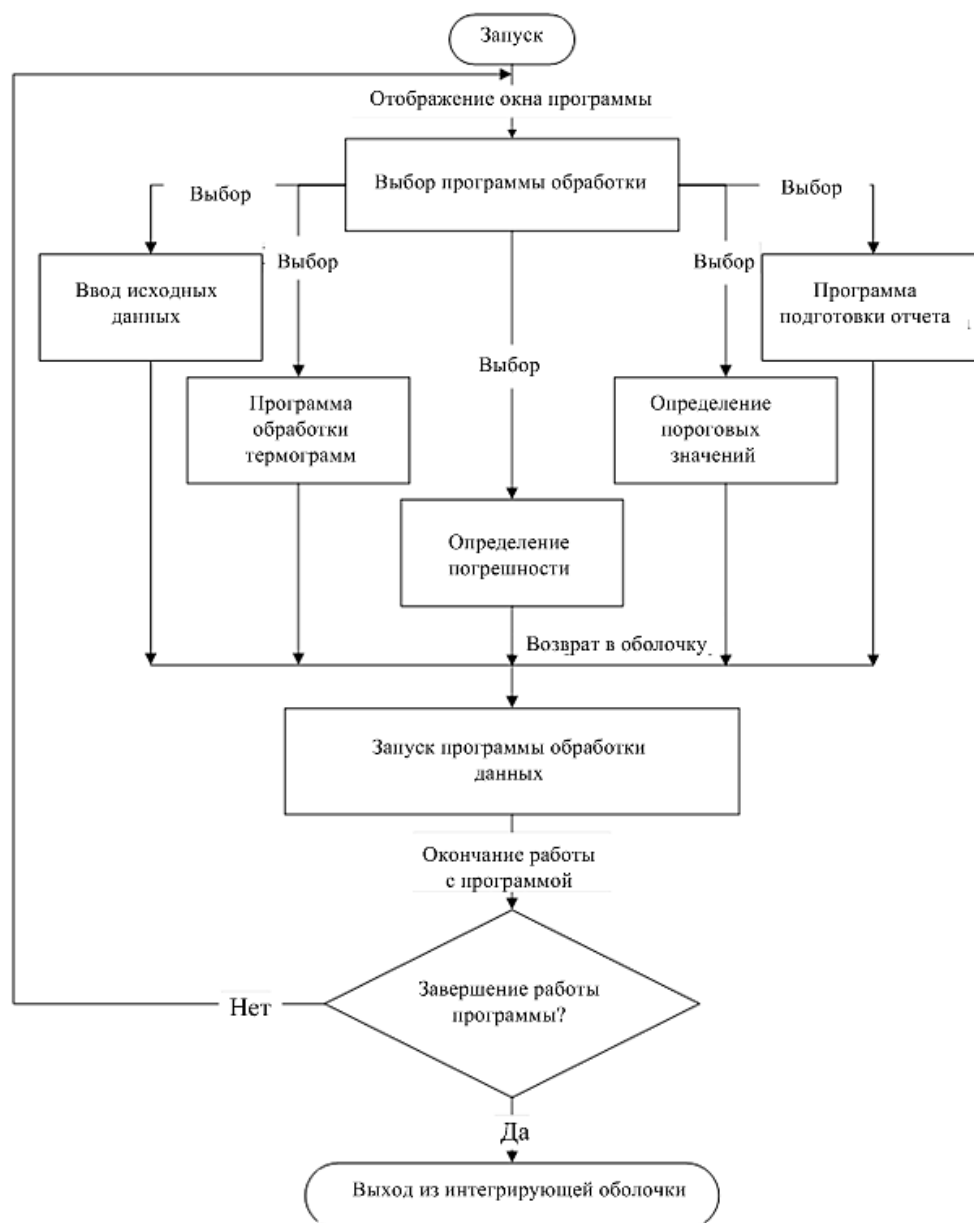


Рисунок 9 – Структурная схема программного обеспечения

Решение данной задачи сводится к определению порогового уровня температуры [5, 7]:

$$T_d = T_1 - \frac{\mu_f}{2 \cdot C_p} \left[\frac{(P_2 - P_1) \cdot S_{тр} \cdot \varphi}{4\pi \cdot \eta_f \cdot \delta} \right]^2 \times \varepsilon, \quad (1)$$

где T_d – пороговое значение температуры, К;

T_1 – начальная температура воздуха, К;

P_1, P_2 – давление окружающей среды и газа в сосуде соответственно, МПа;

$S_{тр}$ – минимальная площадь сквозного дефекта, м²;

η_f – вязкость газа, Па·с;

δ – толщина стенки сосуда, м;

φ – коэффициент скорости истечения рабочего тела;

μ_f – молярная масса газа, кг/моль;

C_p – молярная теплоемкость газа при постоянном давлении, Дж/моль К;

ε – поправочный коэффициент излучения.

Выражение (1) позволяет исключить области аномальных значений, имеющие температуру выше порогового уровня.

Дальнейшая реализация программного анализа локализации дефектов заключается в соблюдении решающих правил:

$$D_1(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{если } T(x, y) \leq T_d; \\ 0, & \text{если } T(x, y) > T_d; \end{cases} \quad (2)$$
$$D_2(x, y) = 1 - D_1(x, y).$$

Программное обеспечение производит также определение формы и размера эквивалентного диаметра поперечного раскрытия дефекта. В результате проведенных расчетов программа позволяет сформировать отчет о проведенном контроле с вынесением заключения о годности котла железнодорожной цистерны.

Второй режим работы программы анализа «Архив» позволяет сохранять данные контроля с привязкой к контролируемому объекту (цистерне).

Разработанная программа анализа результатов теплового контроля упрощает реализацию способа контроля технического состояния котлов железнодорожных цистерн в условиях вагоноремонтного депо.

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Разработаны требования к методике и оснастке теплового контроля для регистрации и анализа температурных аномалий, возникающих на внешней поверхности котлов железнодорожных цистерн.

2. Разработана методика проведения теплового контроля, основанного на анализе областей температурных аномалий, возникающих в результате истечения газа под давлением через сквозные дефекты в теле котла. Предложены алгоритмы реализации теплового способа контроля технического состояния цистерн в условиях вагоноремонтного депо с пошаговым описанием операций.

3. Определены параметры тепловизионной аппаратуры для дистанционной регистрации температурных полей из условия достоверного обнаружения аномальных участков, наибольшей производительности и технической реализуемости. Показано, что разработанный способ контроля позволяет использовать серийную тепловизионную аппаратуру.

4. Разработано программное обеспечение анализа и определения количественной оценки сквозных дефектов по полученным в ходе контроля термограммам. Программное обеспечение имеет блочную структуру, что позволяет производить замену и редактирование отдельных блоков без ущерба для основного алгоритма расчета.

Список литературы

1. Будадин, О. Н. Тепловой контроль: Учебное пособие [Текст] / О. Н. Будадин, В. П. Вавилов, Е. В. Абрамов; Под общ. ред. В. В. Ключева. – М.: Спектр, 2011. – 176 с.

2. Алексеенко, В. М. Тепловая диагностика элементов подвижного состава: Монография [Текст] / В. М. Алексеенко. – М.: Маршрут, 2006. – 398 с.

3. РД 153-34.0-20.363-99. Методика инфракрасного контроля электрооборудования и ВЛ [Текст] / ОАО «Фирма «ОРТРЭС». – М., 2000. – 136 с.
4. ПР НК В5. Правила неразрушающего контроля сварных соединений при ремонте вагонов. Специальные требования [Текст] / НИИ мостов. – М., 2013. – 61 с.
5. Кондратенко, Е. В. Совершенствование технологии контроля технического состояния цистерн тепловым методом [Текст]: Дис... канд. техн. наук: 05.11.13 / Кондратенко Евгений Владимирович. – Омск, 2015. – 159 с.
6. Кондратенко, Е. В. Построение математической модели процесса истечения газа сквозь малые отверстия в теле котла железнодорожной цистерны [Текст] / Е. В. Кондратенко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2015. – № 1 (21). – С. 11 – 20.
7. Пат. 2520952 Российская Федерация, G 01 N 25/00. Способ теплового контроля герметичности крупногабаритного сосуда [Текст] / Ахмеджанов А. Р., Кондратенко Е. В.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – № 2012152487; заявл. 05.12.2012; опубл. 28.04.2014.
8. Вавилов, В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль [Текст] / В. П. Вавилов. – М.: Спектр, 2013. – 544 с.
9. Вавилов, В. П. Тепловидение для инженеров: Учебное пособие [Текст] / В. П. Вавилов / Национальный исследоват. Томский политехн. ун-т (ТПУ). – Томск, 2012. – 127 с.
10. Тепловой контроль и мониторинг технического состояния потенциально опасных объектов в условиях ограниченного доступа [Текст] / Ю. В. Смирнов, В. А. Малай и др. // Контроль и диагностика. – 2006. – №11. – С. 2 – 27.

References

1. Budadin O. N. *Teplovoj kontrol'* (Thermal control). Moscow: Publishing house «Spectrum», 2011, 179 p.
2. Alekseenko V. M. *Teplovaja diagnostika jelementov podvizhnogo sostava* (Thermal diagnostics of rolling stock elements). Moscow: Marshrut, 2006, 398 p.
3. RD 153-34.0-20.363-99. *Metodika infrakrasnogo kontrolja jelektrooborudovanija i VL* (Method of infrared control of electrical equipment and VL). Moscow: Open Joint Stock Company ORTRJeS, 2000. 136 p.
4. PR NK V5. *Pravila nerazrushajushhego kontrolja svarnyh soedinenij pri remonte vagonov* (OL NC B5. Rules for nondestructive testing of welded joints when repairing wagons). Moscow: Institute of Bridges, 2013, 61 p.
5. Kondratenko E. V. *Sovershenstvovanie tehnologii kontrolja tehničeskogo sostojanija cistern teplovym metodom* (Improvement of technology for monitoring the technical condition of tanks by the thermal method). PhD thesis, Omsk, OmSTU, 2015, 159 p.
6. Kondratenko E. V. *Postroenie matematičeskoj modeli processa istechenija gaza skvoz' malye otverstija v tele kotla zheleznodorozhnoj cisterny*. [Construction of a mathematical model of the process of gas flow through small openings in the body of a tanker of a railway tank]. *Izvestija Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2015, no. 1, pp. 18 – 24.
7. Akhmedzhanov R. A., Kondratenko E. V. *Patent RU 2520952 G01*, 05.12.2012.
8. Vavilov V. P. *Infrakrasnaya termografiya i teplovoy kontrol* (Infrared Thermography and Thermal Control). Moscow: «Spectrum» Publishing House, 2013, 544 p.
9. Vavilov V. P. *Teplovideniye dlya inzhenerov* (Thermal imaging for engineers). Tomsk: Izd-vo TPU, 2012, 127 p.
10. Smirnov Yu.V. *Teplovoy kontrol i monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya potentsialno opasnykh obyektov v usloviyakh ogranichenogo dostupa* (Thermal monitoring and monitoring of

the technical condition of potentially hazardous facilities in conditions of limited access). Moscow: Monitoring and Diagnostics, 2006, no. 11, pp. 2 – 27.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Кондратенко Евгений Владимирович
Омский государственный университет путей
сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская
Федерация.
Доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»,
ОмГУПС.
Тел.: 8-950-792-57-27.
E-mail: evgenkond@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kondratenko Evgenij Vladimirovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation
Assistant professor of the department «Wagons and
wagon farm», OSTU.
Phone: 8-950-792-57-27.
E-mail: evgenkond@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Кондратенко, Е. В. Алгоритмическое решение
теплового контроля технического состояния котлов
железнодорожных цистерн [Текст] / Е. В. Кондратен-
ко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей со-
общения. – Омск. – 2017. – 4(32). – С. 2 – 16.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kondratenko E. V. Algorithmic solution of thermal
control of the technical condition of rail tanks. Journal of
Transsib Railway Studies, 2017, vol. 32, no 3, pp 2 – 16
(In Russian).

УДК 629.4

Д. Ю. Лукс

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

ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКИХ КАЧЕСТВ ГРУЗОВОГО ВАГОНА С ТЕЛЕЖКОЙ 18-9855

Аннотация. Выполнено исследование влияния параметров нелинейного рессорного подвешивания грузового вагона (жесткости рессорного комплекта, базы тележки, длины неровностей пути) на показатели его динамических качеств. Выявлено влияние скорости движения вагона и длины неровности пути на ускорения кузова и силы в контакте колеса и рельса с учетом дополнительной динамической добавки от продольной неравноупругости пути.

Ключевые слова: грузовой вагон с нелинейным рессорным подвешиванием, база тележки, математическая модель, ускорения кузова, давление на путь продольная неравноупругость пути.

Dmitry Y. Luks

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

EVALUATION OF DYNAMIC QUALITIES OF A FREIGHT CAR WITH A BOGIE 18-9855

Abstract. A study of the influence of non-linear parameters spring of a freight car suspension (stiffness spring, length base of a bogie, roughnesses railway) on the amplitude and phase fluctuations bouncing body is completed. Defined own vibrational frequency jumps car body as a function of the parameters.

Keywords: freight wagon with of nonlinear spring suspension, base of bogie, mathematical model, roughness of railway, vibrations, longitudinal nonstifness of rail way.

В работе [1] выполнена аппроксимация ломаной силовой характеристики рессорного комплекта тележки «Barber-S-2-R», которой оснащаются инновационные вагоны, выпускаемые Тихвинским вагоностроительным заводом, получены математическая модель колебаний подпрыгивания кузова и зависимость собственной частоты колебаний от параметров системы.

Здесь мы будем оценивать поведение грузового вагона, оснащенного тележкой «Barber-S-2-R», по общепринятым показателям динамических качеств железнодорожного экипажа: по ускорению подпрыгивания кузова вагона и по оказываемому колёсной парой давлению на железнодорожный путь.

Ускорение подпрыгивания кузова вагона, на величину которого влияют параметры внешнего воздействия, база тележки и другие факторы, определим по формуле:

$$\ddot{z} = B \sin(\omega \cdot t + \alpha), \quad (1)$$

где $B = \sqrt{\left(A\omega^2\right)^2 + \left(2h\omega^2 \cos 2\pi \frac{l_T}{l_H}\right)^2 - 4Ah\omega^4 \cos 2\pi \frac{l_T}{l_H} \cos \varphi}$ – амплитуда ускорения подпрыгивания кузова вагона (м);

$$\alpha = \arctg \frac{2h\omega \cos 2\pi \frac{l}{l} \cos \varphi}{-A\omega + 2h\omega \cos 2\pi \frac{l}{l} \sin \varphi} - \text{угол сдвига фазы колебаний (рад)}.$$

Усилие в рессорном подвешивании кузова вагона вычисляем с помощью выражения:

$$Q_6 = Q(D_0, A) + \sqrt{\frac{1}{4} \beta^2 \omega^2 A^2 + H^2(D_0, A)} \sin(\omega t - \gamma + \theta), \quad (2)$$

здесь

$$\begin{cases} Q(D_0, A) = G(D_0) + \frac{1}{2}(a_3 + 3a_4 D_0) A^2; \\ H(D_0, A) = \mathcal{H}(D_0) + \frac{3}{4} a_4 A^2. \end{cases} \quad (3)$$

Давление колёсной пары на железнодорожный путь определяется по формуле, которая легко находится согласно второму закону Ньютона или с помощью принципа Даламбера:

$$\begin{aligned} P_p = Q(D_0, A) - m_{\text{кп}} h \omega^2 \cos 2\pi \frac{l_T}{l_H} \sin(\omega t - \gamma) + \\ + \sqrt{\left(\frac{1}{2} \beta \omega\right)^2 + H^2(D_0, A)} A \sin(\omega t - \gamma + \theta), \end{aligned} \quad (4)$$

здесь $m_{\text{кп}}$ – масса колёсной пары вагона; $P_{\text{ст}}$ – статическое давление колёсной пары на путь (в нашем случае $P_{\text{ст}} = 25$ тс), которое отсутствует в выражении (4) потому, что в случае нелинейного рессорного подвешивания экипажа выделить эту составляющую практически невозможно.

Угол сдвига фазы определяем по формуле:

$$\theta = \operatorname{arctg} \frac{1}{2} \frac{\beta \omega}{\mathcal{K}(D_0) + \frac{3}{4} a_4 A^2}. \quad (5)$$

Найдём амплитуду переменной составляющей давления вагона на путь:

$$P_{p0} = \sqrt{\Gamma_1^2 + \Gamma_2^2 - 2\Gamma_1\Gamma_2 \cos \theta}, \quad (6)$$

здесь

$$\begin{cases} \Gamma_1 = -m_{\text{к.п}} h \omega^2 \cos 2\pi \frac{l_{\text{т}}}{l_{\text{н}}}; \\ \Gamma_2 = A \sqrt{\left(\frac{1}{2} \beta \omega\right)^2 + \left[\mathcal{K}(D_0 + \frac{3}{4} a_4 A^2)\right]^2}. \end{cases} \quad (7)$$

По полученным формулам выполним расчёты, используя математический пакет Mathcad. Начнём с того, что аналитически определим статический прогиб полученной нелинейной характеристики рессорного подвешивания вагона. Для этого необходимо вычислить корни кубического уравнения:

$$\sum_{k=1}^4 a_k \Delta^{k-1} = \frac{1}{2} mg, \quad (8)$$

где коэффициенты a_k имеют следующие значения: $a_1 = 9,377356$; $a_2 = -1032,72078$; $a_3 = 46425,900496$; $a_4 = -102667,212$. Из высшей математики известно, что уравнения данного типа обязательно имеют один действительный и два комплексно-сопряжённых корня или все три действительных корня. Так как у нас есть возможность воспользоваться стандартной функцией Mathcad, например, **polyroots (...)**, которая численными методами вычисляет все корни полинома заданной степени и определяется программой по порядку вектора коэффициентов a_k , то в результате получаем следующие значения корней этого полинома:

$$p = \begin{pmatrix} -0.056637 \\ 0.093636 \\ 0.415198 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Минимальное положительное значение корня и есть статический прогиб рессорного подвешивания кузова вагона исходя из того факта, что статическая нагрузка от колёсной пары на путь составляет 25 тс, этот прогиб $f_{\text{ст}} = 91,645$ мм. Отметим здесь, что в работе [2] значение этого параметра рессорного комплекта тележки в груженом состоянии вагона равно 90,3 мм, что очень незначительно отличается от полученного здесь значения.

Определим резонансные скорости движения вагона на тележках Барбера, учитывая, что его колебания описываются нелинейными дифференциальными уравнениями. Известно, что в случае линейного рессорного подвешивания резонанс характеризуется совпадением собственной частоты с частотой возмущающей силы. В нашем случае характеристика рессорного подвешивания описывается нелинейной функцией с четной симметрией, следовательно, в решении дифференциальных уравнений обязательно будет присутствовать постоянная составляющая, относительно которой и будут происходить колебания подпрыгивания кузова

вагона. Кроме того, в системе будут возбуждаться гармоники, отличные от собственной частоты линейной консервативной системы, и при их совпадении с частотой вынуждающей силы в системе будет наблюдаться явление резонанса. Оставаясь в парадигме линейного подхода, но помня о том, что собственная частота консервативной нелинейной системы зависит от амплитуды подпрыгивания кузова вагона, определим резонансную скорость:

$$V_{\text{рез}} = \frac{1,8 l_n \omega_0(D_0)}{\pi}. \quad (10)$$

Очевидно, что резонансная скорость вагона определяется длиной волны геометрической неровности пути и собственной частотой консервативной нелинейной системы, зависящей от амплитуды подпрыгивания кузова. На рисунке 1 представлен график собственной частоты подпрыгивания кузова вагона, оснащенного тележками Барбера.

Из приведенного графика (см. рисунок 1) следует, что собственная частота существенным образом зависит от амплитуды подпрыгивания кузова вагона.

Ещё раз отметим, что резонанс может развиваться на суб- и супергармониках, хотя и не так остро, но это необходимо учитывать, особенно тогда, когда интерпретируются эмпирические материалы.

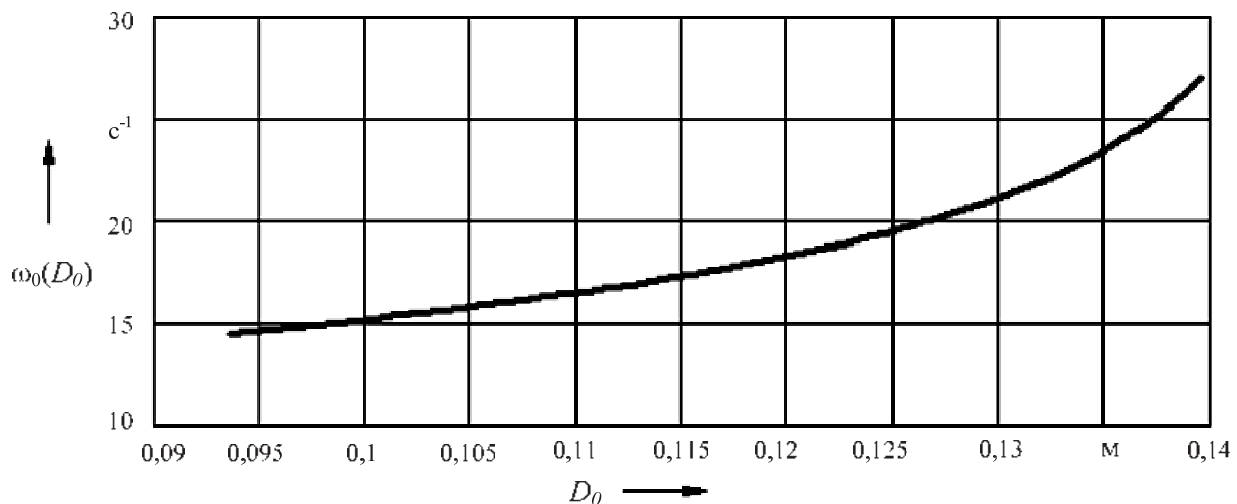


Рисунок 1 – График изменения собственной частоты колебаний вагона

Результаты исследований вертикальной динамики вагона на тележках Барбера для конкретной длины неровности, равной 3 м, как наиболее часто встречающейся на железнодорожном пути, приведены на рисунках 2 и 3. В качестве возмущения амплитуда неровности здесь принималась согласно регрессионному уравнению $h = 0,0004 l_n$ и она была равна 1,2 мм при длине неровности 3 м. Такая длина неровности также может определяться часто встречающимся в практике неравномерным прокатом поверхности катания колес.

График, приведенный на рисунке 2, убеждает нас в том, что приведенные выше вычисления выполнены корректно.

Сдвиг фазы между вынужденными колебаниями и возбуждающей силой представлен на рисунке 3, при этом колебания подпрыгивания кузова вагона на тележках Барбера происходят относительно положения, которое мало отличается от статического.

На рисунке 4 представлены зависимости отношения амплитуды ускорения кузова вагона на тележках Барбера к ускорению свободно падающего тела, т. е. ускорения подпрыгивания кузова в долях g . Из этого графика видно, что зона резонансных скоростей движения вагона по неровностям пути длиной 3 – 7 м приходится на диапазон 25 – 50 км/ч.

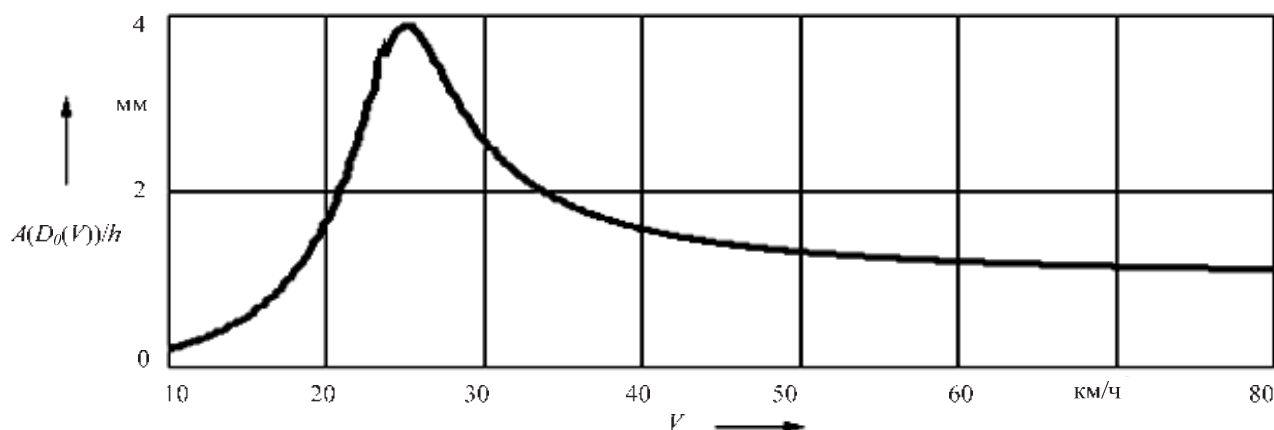


Рисунок 2 – График изменения отношения амплитуды деформации рессорного подвешивания кузова вагона на тележках Барбера к амплитуде геометрической неровности пути, т. е. коэффициента динамичности по перемещениям

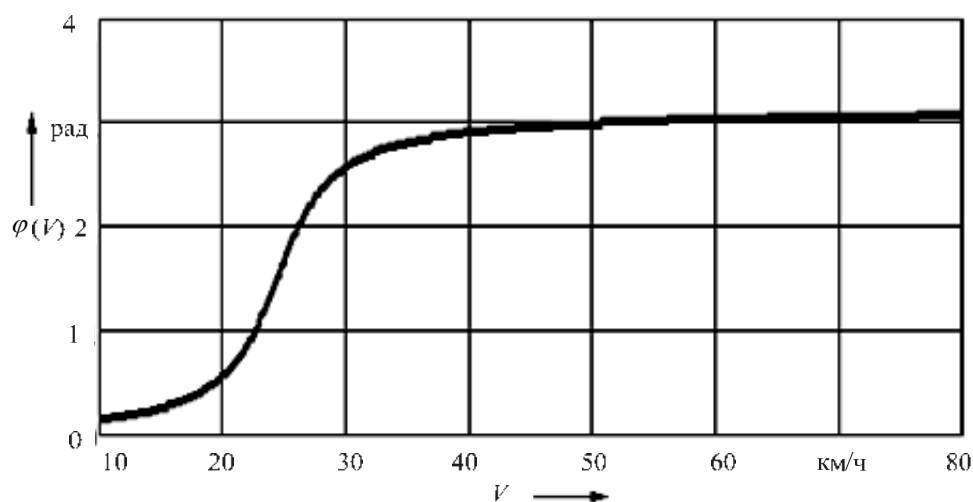


Рисунок 3 – Изменение сдвига фазы колебаний, рад φ

Приведенный на рисунке 4 график также наглядно иллюстрирует негативное влияние трения в системе обрессоривания в зарезонансной зоне колебаний кузова вагона – с ростом скорости движения вагона по неровностям пути (частоты возмущающего воздействия) ускорения подпрыгивания кузова увеличиваются. При движении вагона по перегону с установленной (с принятой в практике эксплуатации грузовых поездов на российских железных дорогах) скоростью, близкой к 80 км/ч, наибольшее влияние на колебания подпрыгивания кузова оказывают неровности длиной 4 и 4,5 м при типовой базе тележки вагона. Максимальное значение ускорения кузова вагона при движении по неровности длиной 4 м на этой скорости равно 0,19 g . Отметим, что амплитуда неровности принята равной всего 1,2 мм, а на практике, при удовлетворительном состоянии пути, как показано в работе [3], амплитуда не-

ровностей пути достигает величин порядка 12 – 15 мм. Кроме того, в работе [4] отмечен факт накопления деформаций верхнего строения пути. Так, за период с июня 2014 по октябрь 2015 г. при пропуске порядка 2 млн т в вагонах с повышенной осевой нагрузкой суммарные осадки составили от 8,5 до 12,8 мм. Это можно объяснить накоплением деформаций подрельсового основания, обусловленных износом частиц щебеночного балласта при динамическом воздействии подвижного состава на путь.

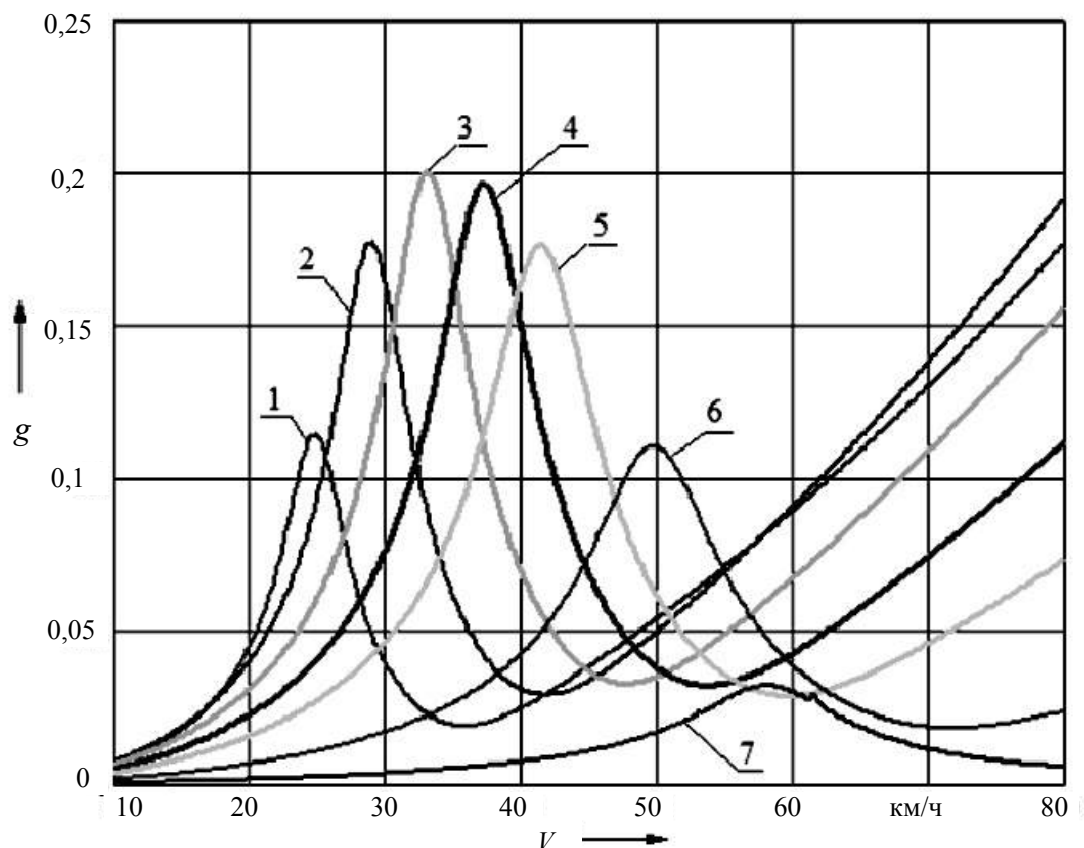


Рисунок 4 – Зависимость ускорения кузова вагона от скорости движения при движении по неровностям пути различной длины: 1 – длина неровности 3 м; 2 – 3,5 м; 3 – 4 м; 4 – 4,5 м; 5 – 5 м; 6 – 6 м; 7 – длина неровности 7 м

Кроме того, очевидно, что мы не можем выделить какую-либо одну конкретную реальную доминирующую длину кривой неровности пути на конкретном участке железной дороги, так как ее трудно определить вследствие того, что путеизмеритель, во-первых, фиксирует суммарные неровности (совокупность геометрических и силовых) и, во-вторых, нагрузка на ось современных вагонов-путеизмерителей (ЦНИИ-4 и КВЛ-П2.1) не превышает 160 кН в отличие от нагрузки на ось груженого вагона и, в результате, не отражает реальной картины состояния неровностей пути под действующими осевыми нагрузками 23,5 и 25 тс.

Одним из важных показателей динамических качеств подвижного состава является воздействие вагона на путь. Влияние скорости движения вагона и длины неровности пути на динамическую добавку давления колесной пары на путь представлено на рисунке 5.

Постоянная составляющая давления вагона на железнодорожный путь не зависит ни от скорости движения, ни от длины геометрической неровности на рельсах. Амплитуда давления колесной пары вагона на путь при её безотрывном движении по рельсам с увеличением скорости движения сначала возрастает, а затем, начиная со скорости 70 км/ч, снижается.

Наибольшее значение равно 42,529 кН (4,34 тс). Максимальное давление колесной пары на путь составляет порядка 287,83 кН (29,34 тс).

Учитывая, что на железнодорожном пути может встречаться практически любая длина геометрических неровностей, обусловленная неравномерными просадками рельсов и несовершенством колесных пар, с большой долей вероятности можно утверждать, что в составе поезда любой вагон с нелинейным рессорным подвешиванием может двигаться в резонансном режиме колебаний, величина амплитуды которых ограничивается диссипативными силами и нелинейностью в подвешивании.

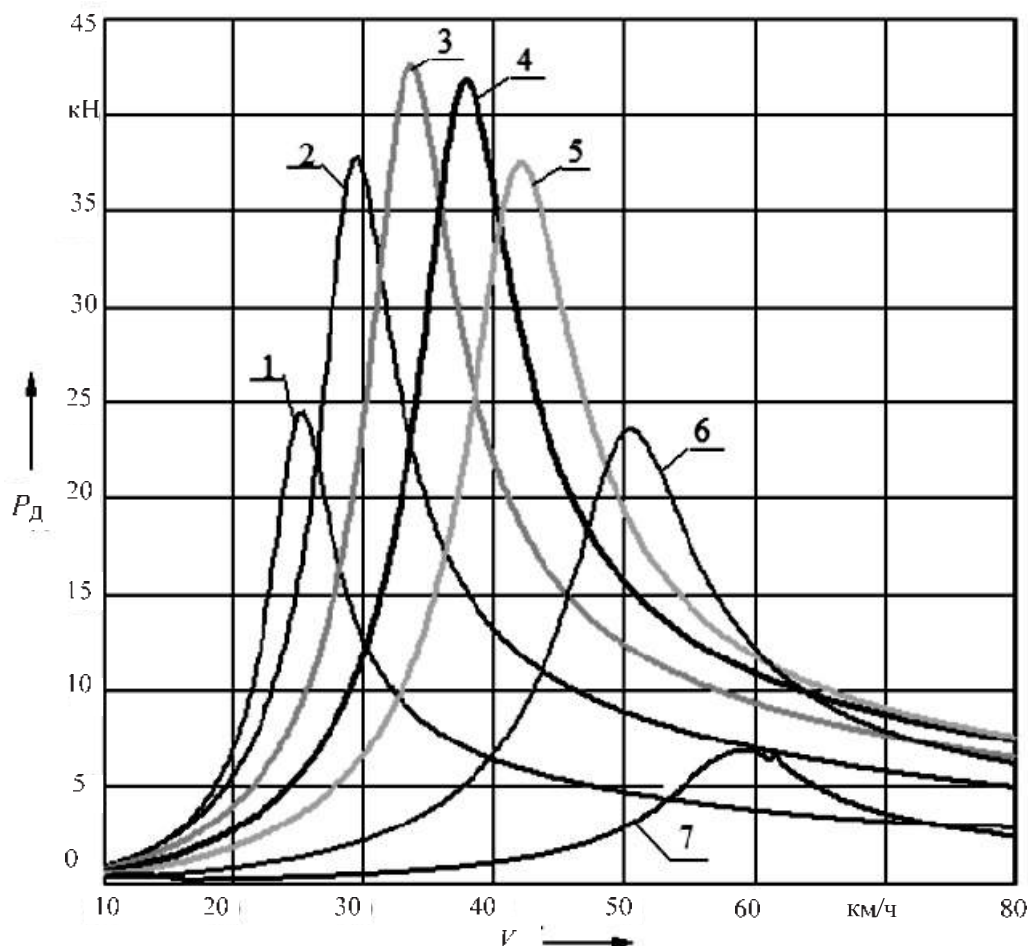


Рисунок 5 – Амплитуды динамических добавок давления на путь вагона на тележках Барбера:
1 – длина неровности 3 м; 2 – 3,5 м; 3 – 4 м; 4 – 4,5 м;
5 – 5 м; 6 – 6 м; 7 – длина неровности 7 м

Приводя показатели воздействия вагона на путь, необходимо учитывать также влияние дополнительной динамической добавки давления на путь, возникающей из-за переносного ускорения колёсной пары, являющегося результатом влияния переменной жесткости пути в сечениях под шпалой и между шпалами на экипаж [5]. На рисунке 6 представлен график изменения дополнительной динамической добавки давления на неравноупругий путь в зависимости от скорости движения вагона при коэффициенте параметрического возбуждения $\mu = 0,04$ и средней жесткости пути, равной 7800 тс/м.

Очевидно, что с увеличением скорости данная добавка возрастает и при скорости движения вагона 80 км/ч достигает величины 35,6 кН (3,63 тс). Если сюда прибавить динамическую добавку от геометрических неровностей пути, которая равна 4,3 тс, то получим, что

максимум суммарной динамической добавки может достигать 4,43 тс при 80 км/ч и 5,083 тс при скорости 37,6 км/ч. Такие колебания вертикальных сил взаимодействия колеса и рельса, во-первых, снижают коэффициент запаса устойчивости против вкатывания колеса на головку рельса и, во-вторых, оказывают негативное воздействие на работоспособность элементов пары «колесо – рельс».

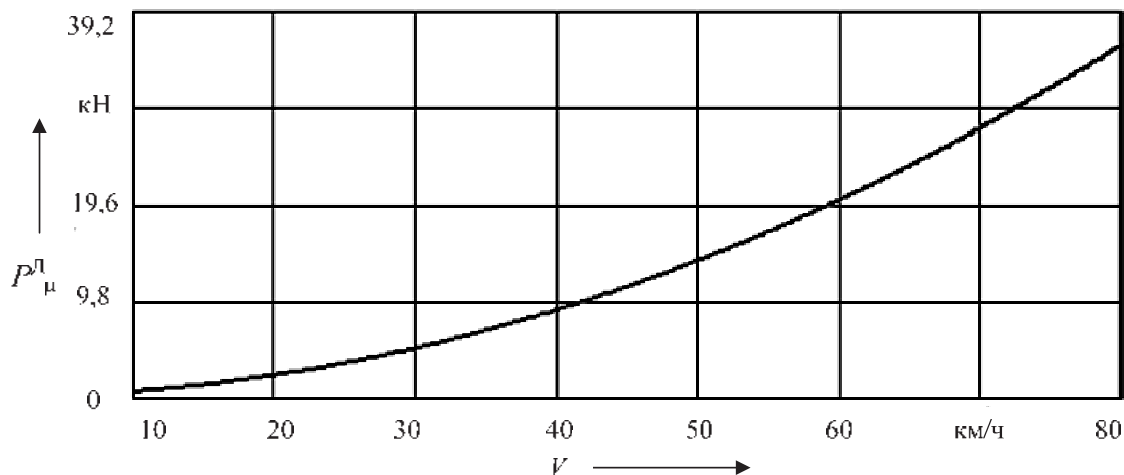


Рисунок 6 – Влияние скорости вагона на изменение динамической добавки давления колесной пары вагона на неравноупругий по протяженности путь

Влияние суммарного действия геометрических неровностей пути и её шпальной неравноупругости на давление колесной пары на путь представлено на рисунке 7.

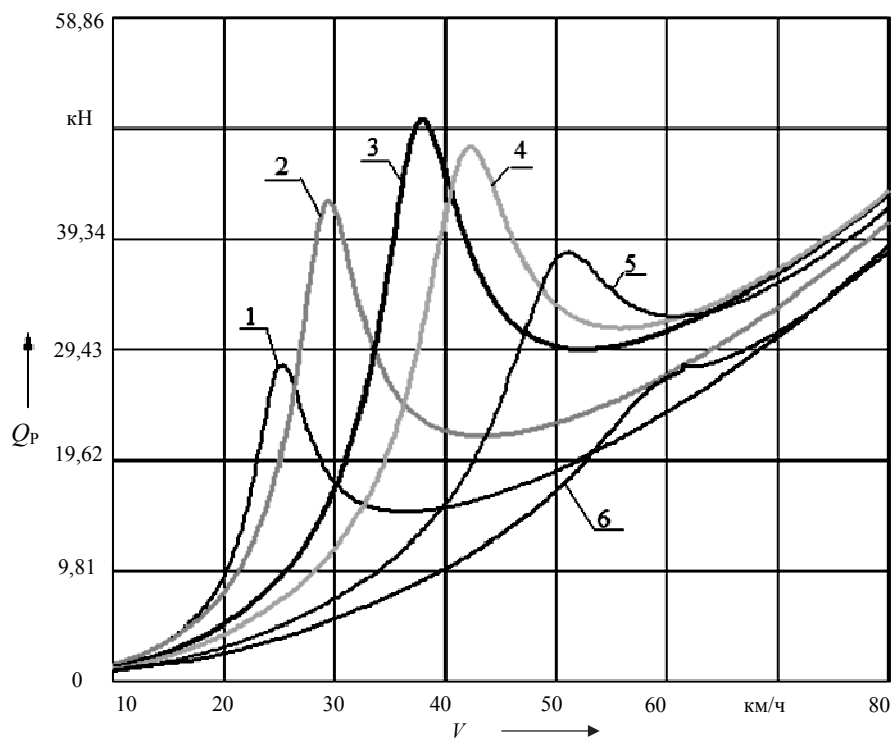


Рисунок 7 – Влияние скорости вагона, геометрических неровностей рельсов и переменной жесткости пути в сечениях под шпалой и между шпалами на суммарную добавку динамического давления колесной пары на рельсы: 1 – длина неровности 3,5 м; 2 – 4 м; 3 – 4,5 м; 4 – 5 м; 5 – 6 м; 6 – длина неровности 7 м

Таким образом, в статье [1] и в данной работе изложена методика исследования динамических качеств нового подвижного состава – инновационных вагонов с нелинейным рессорным подвешиванием. Выполнена оценка аппроксимации силовой характеристики системы рессорного подвешивания кузова вагона полиномом седьмой степени, создан алгоритм расчётов, написана программа в среде Mathcad, и получены оценки показателей динамических качеств этих вагонов при движении по неровностям пути с различной скоростью.

Необходимо отметить также, что учет неравноупругости железнодорожного пути (по его протяженности) в математической модели поведения железнодорожного экипажа сразу приводит к тому, что исследование дифференциальных уравнений с переменными, а может быть, и случайными коэффициентами, существенным образом усложнит их интегрирование, особенно если рассматривать полноразмерную пространственную модель колебаний механической колебательной системы «вагон – путь».

В заключение выражаю благодарность профессорам, докторам технических наук Нехаеву Виктору Алексеевичу и Николаеву Виктору Александровичу за консультацию при подготовке материалов к данной статье.

Список литературы

1. Лукс, Д. Ю. Исследование влияния параметров нелинейной системы «вагон – путь» на динамику железнодорожного экипажа [Текст] / Д. Ю. Лукс // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, – № 3 (31). – 2017. – С. 69 – 79.
2. Вершинский, С. В. Динамика вагона [Текст] / С. В. Вершинский, В. Н. Данилов, В. Д. Хусидов. – М.: Транспорт, 1991. – 359 с.
3. Механическая часть локомотивов [Текст] / И. В. Бирюков, А. Н. Савоськин и др. – М.: Транспорт, 1989. – 440 с.
4. Гарг, В. К. Динамика подвижного состава [Текст] / В. К. Гарг, Р. В. Дуккипати. – М.: Транспорт, 1988. – С. 130.
5. Мещерин, Ю. В. О рессорном подвешивании тележек грузовых вагонов [Текст] / Ю. В. Мещерин // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2016. – № 2 (46). – С. 33 – 35.
6. Камаев, В. А. Оптимизация параметров ходовых частей железнодорожного подвижного состава [Текст] / В. А. Камаев. – М.: Машиностроение, 1980. – 215 с.
7. Воздействие длинносоставных поездов на путь [Текст] / В. С. Коссов, А. А. Лунин и др. // Вестник ВНИИЖТа / ВНИИЖТ. – М. – 2016. – Т. 75. – № 4. – С. 224 – 232.
8. Воздействие на путь вагонов с повышенной осевой нагрузкой [Текст] / В. В. Третьяков, И. Б. Петропавловская и др. // Вестник ВНИИЖТа / ВНИИЖТ. – М., – 2016. – Т. 75. – № 5. – С. 233 – 237.
9. Инфраструктура в условиях интенсификации перевозок [Текст] / В. А. Гапанович, В. О. Певзнер и др. // Железнодорожный транспорт. – 2016. – № 2. – С. 16 – 18.
10. Нехаев, В. А. Неравноупругость железнодорожного пути как возмущающий фактор [Текст] / В. А. Нехаев, Р. Д. Сабиров // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2013. – № 3 (15). – С. 42 – 54.

References

1. Luks D.Yu. Issledovanie vliyaniya parametrov nelinejnoj sistemy «vagon-put'» na dinamiku zheleznodorozhnogo ehkipazha [Investigation of the influence of the parameters of the non-linear «wagon-path» system on the dynamics of the railway crew]. *Izvestija Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, no. 3 (31), 2017. P. 69 – 79.

2. Vershinsky S. V., Danilov V. N., Khusidov V. D. *Dinamika vagona* (Dynamics of the car). Moscow: Transport, 1991. 359 p.
3. Biryukov I. V. *Mekhanicheskaya chast' lokomotivov* (Mechanical part of locomotives). Moscow: Transport, 1989. 440 p.
4. Garg V. K. *Dinamika podvizhnogo sostava* (Dynamics of the rolling stock). Moscow: Transport, 1988. 130.
5. Meshcherin, Yu. V. O ressonom podveshivani telezhek gruzovykh vagonov [On the spring suspension of cargo wagon carriages]. *Wagons and wagon facilities*. no. 2 (46), 2016. P. 33 – 35.
6. Kamaev V. A. *Optimizatsiya parametrov hodovykh chastej zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava* (Optimization of parameters of running parts of railway rolling stock). Moscow: Mechanical Engineering, 1980. 215 p.
7. Kossov V. S. Vozdejstvie dlinnosostavnykh poezdov na put' [The impact of long train on the way]. *Vestnik VNIIZhT*. 2016. T. 75. № 4. P. 224 – 232.
8. Tretyakov V. V. Vozdejstvie na put' vagonov s povyshennoj osevoj nagruzkoy [Influence on the way of cars with increased axial load]. *VNIIZhT Bulletin*. vol. 75, no. 5, 2016. P. 233 – 237.
9. Gapanovich V. A. Infrastruktura v usloviyah intensifikatsii perevozok [Infrastructure in conditions of traffic intensification]. *Railway Transport* 2016, № 2. P. 16 – 18.
10. Nekhaev V. A. Neravnoprugost' zheleznodorozhnogo puti kak vozmushchayushchij faktor [Non-elasticity of the railway track as a disturbing factor] *Izvestiya Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2013. № 3 (15). pp. 42 – 54.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Лукс Дмитрий Юрьевич

Управление вагонного хозяйства Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД».
Каланчевская, 35, г. Москва, 129090, Российская Федерация.
Заместитель начальника технического отдела.
Тел.: 8-499-262-54-27.
E-mail: luksdu@center.rzd.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lucks Dmitry Yurkevich

Administration of the Central Infrastructure Directorate, an RZD JSC Business unit.
Kalanchevskaya 35, Moscow, 129090, Russian Federation.
Deputy Director of the technical Department.
Phone: 8-499-262-54-27.
E-mail: luksdu@center.rzd.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Лукс, Д. Ю. Оценка динамических качеств грузового вагона, оснащенного тележкой 18-9855 [Текст] / Д. Ю. Лукс // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 4(32). – С. 16 – 25.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Luks D. Y. Evaluation of Dynamic qualities of a freight car, fitted with a bogie 18-9855 *Journal of Transsib Railway Studies*, vol. 32, no 3, pp 16 – 25 (In Russian).

УДК 621.336.2

О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, В. В. Томилов

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА ПОЛОЗА ТОКОПРИЕМНИКА И СПОСОБЫ ЕЕ СНИЖЕНИЯ

Аннотация. Нагрев полоза токоприемника электроподвижного состава происходит в результате съема тягового электрического тока. Увеличение температуры контактных и токопроводящих материалов подвес-

ки и токоприемника обусловлено их характеристиками. Низкое качество токосъема также приводит к перегреву контактных материалов и ограничивает пропуск максимально допустимого длительного тока при движении электровоза. Неравномерность распределения температуры приводит к локальным точкам перегрева и нерациональному использованию поверхности контактных вставок. Приведенные графики распределения зигзага контактного провода указывают на зависимость плотности распределения зигзага от профиля участка пути и типа контактной подвески, обуславливающих теплораспределение по полозу. Предлагаемая методика факторного анализа влияния на нагрев полоза токоприемника позволяет определить причины его неравномерного нагрева и предложить мероприятия по снижению доли влияния каждого из факторов и обеспечить увеличение съема тягового тока.

Ключевые слова: токоприемник, температура, контактное нажатие, полоз, тяговый ток, контактная подвеска.

Oleg A. Sidorov, Alexandr N. Smerdin, Valery V. Tomilov
Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

RESEARCH OF PANTOGRAPH PANHEAD HEATING TEMPERATURE AND ITS REDUCTION METHODS

Abstract. The heating of the pantograph panhead of an electric rolling stock is caused by the removal of the traction electric current. The increase in temperature is due to the characteristics of the catenary and conductive materials of the suspension and current collector. Current collection low quality also leads to overheating of contact materials and limits the passage of the maximum permissible long-time current when the electric locomotive moves. The uneven distribution of temperature leads to local points of overheating and an inefficient use of the surface of the contact strips. The presented graphs of the density distribution of the position of the contact wire in the plan indicate their dependence on the profile of the path section and the type of the catenary, which determine the heat distribution along the panhead. The proposed methodology of the factor analysis of the effect on the current collector's panhead heating makes it possible to determine the causes of its uneven heating and propose measures to reduce the share of influence of each factors and to provide an increase in the removal of the traction current.

Keywords: current collector, temperature, contact pressure, panhead, traction current, catenary.

Систему токосъема с сильноточным подвижным контактом «токоприемник – контактная подвеска» принято рассматривать комплексно, учитывая характеристики контактной сети и токоприемника. Требования к токоприемнику и контактной подвеске регламентируются индивидуально. Таким образом достигается наилучшее качество токосъема и передача электроэнергии на подвижной состав с минимальными потерями. Исследование процессов нагрева полоза токоприемника указывает на то, что конструкции токоприемника и контактной подвески по-разному влияют на величину и распределение нагрева полоза [1 – 4]. Существующие требования к контактной подвеске и токоприемнику в отношении их характеристик задают начальные и граничные условия для разработки и поиска различных методов и способов снижения температуры полоза токоприемника и возможности съема больших токов.

Нагрев полоза токоприемника главным образом обусловлен потреблением тягового электрического тока. При нормальной эксплуатации и качественном (удовлетворительном) токосъеме нагрев дуговыми разрядами незначителен. Величина тягового тока обусловлена типом электроподвижного состава, режимом его движения по конкретному участку и массой поезда. Существующие тенденции характеризуют грузовые перевозки как использующие тяжеловесные длинносоставные поезда, а пассажирские – со скоростным и высокоскоростным движением, в том числе на постоянном токе, где проблема стоит острее ввиду необходимости передачи одинаковой мощности при меньшем напряжении. В отношении системы

токосяема фактором, ограничивающим потребление тягового тока или мощности, является достижение предельной температуры материалов полоза токоприемника.

Существующая методика проверки электрических показателей токоприемника проводится согласно ГОСТ 32204-2013 «Токоприемники железнодорожного электроподвижного состава. Общие технические условия» [5]. Допустимый длительный ток при движении, снимаемый движущимся токоприемником, определяют тепловизором. На термограммах определяют наиболее нагретую площадку контактных элементов протяженностью не менее 30 мм, среднюю температуру которой и принимают как наибольшую температуру нагрева.

Методика определения максимально длительного тока подробно изложена в работах [6 – 9]. Термограмма токоприемника с исследуемыми 22 площадками (элементами) на каждый полз приведена на рисунке 1.

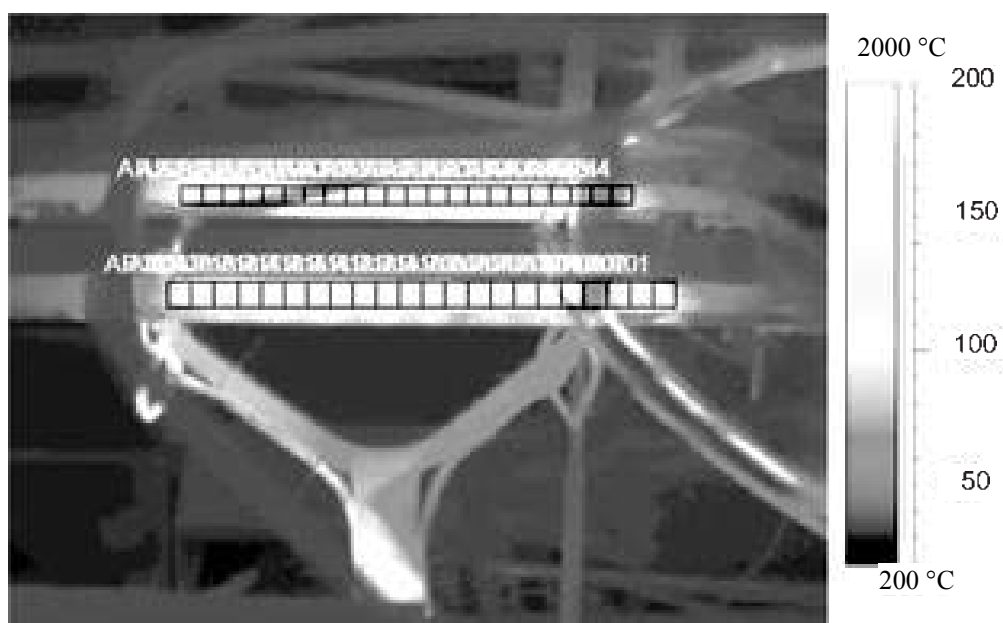


Рисунок 1 – Обработка термограммы полоза токоприемника Faiveley

Уравнение теплового баланса для расчетной схемы полоза токоприемника, приведенной на рисунке 2, можно представить следующим образом:

$$\Delta P_i = Q_{Ci} + Q_{Ai} + Q_{lk} + Q_{li-1} + Q_{li+1}, \quad (1)$$

где ΔP_i – тепловые потери в электрическом скользящем контакте, отнесенные к источнику тепловой энергии U_i на схеме замещения (рисунок 2, б);

Q_{Ci} – тепловой поток, расходуемый на повышение температуры dT_i i -го элемента вставки с удельной теплоемкостью c_i массой m_i :

$$Q_{Ci} = c_i \cdot m_i \cdot dT_i; \quad (2)$$

Q_{Ai} – тепловой поток, рассеиваемый в окружающую среду температурой T_0 через поверхность площадью F_i :

$$Q_{Ai} = \alpha \cdot F_i \cdot (T_i - T_0); \quad (3)$$

Q_{lk} – тепловой поток, передающийся в каркас полоза температурой $T_{\text{каркаса}}$:

$$Q_A = \frac{(T_i - T_{\text{каркаса}})}{R_{\lambda ki}}; \quad (4)$$

$Q_{\lambda i \pm 1}$ – тепловой поток между соседними элементами:

$$Q_{\lambda i \pm 1} = \frac{(T_i - T_{i \pm 1})}{R_{\lambda}}; \quad (5)$$

α – коэффициент теплоотдачи;

T_i – температура i -го элемента токоприемника.

Тепловое сопротивление «вставка – каркас»:

$$R_{\lambda ki} = \frac{\lambda_k \cdot \delta}{S}, \quad (6)$$

где S – площадь контакта;

λ_k – коэффициент теплопроводности «вставка – каркас»;

δ – толщина вставки.

Тепловое сопротивление вставки

$$R_{\lambda} = \frac{\lambda \cdot \delta_1}{f}, \quad (7)$$

где f – площадь сечения вставки;

λ – коэффициент теплопроводности вставки;

δ_1 – расстояние между центрами i -х элементов вставки.

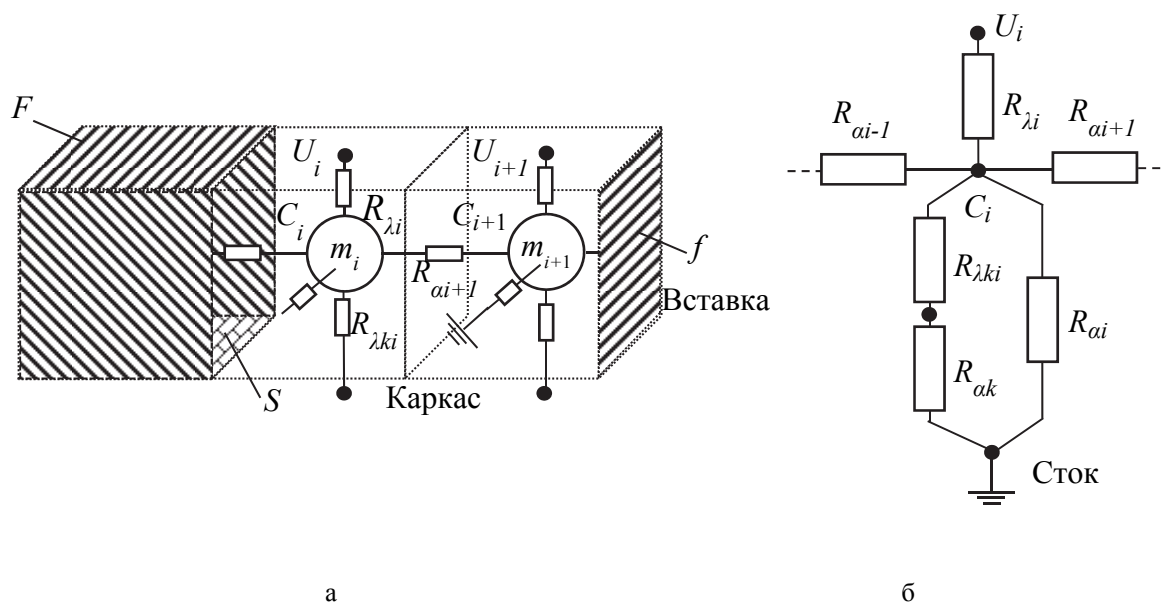


Рисунок 2 – Тепловая схема замещения полоза (а), приведенная схема для одного элемента (б)

Результат численного моделирования распределения температуры по полозу токоприемника в течение времени достижения установившегося режима согласно уравнению (1), приведен на рисунке 3, а. Расчет реализован с применением метода эквивалентных тепловых схем замещения [10].

Полученное распределение может быть описано законом распределения, близким к нормальному. Однако многочисленные экспериментальные исследования указывают на неравномерность распределения температуры по полозу токоприемника (рисунок 3, б). Кроме того, указанная неравномерность существенно отличается у различных токоприемников (рисунок 4) при одинаковых условиях воздействия со стороны контактной подвески.

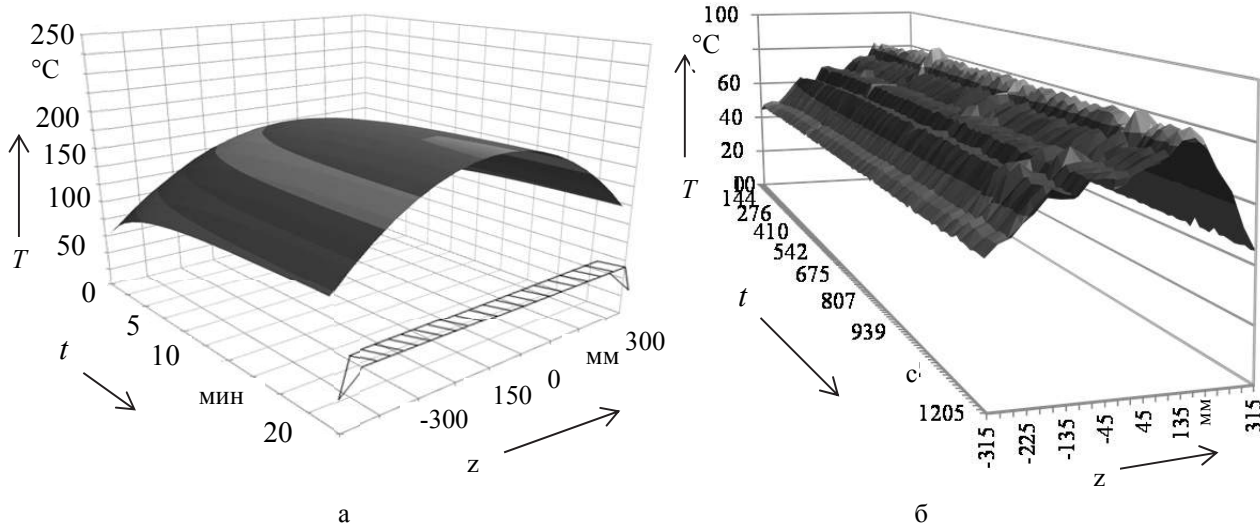


Рисунок 3 – Распределение установившейся температуры по полозу токоприемников:
а – моделирование; б – эксперимент

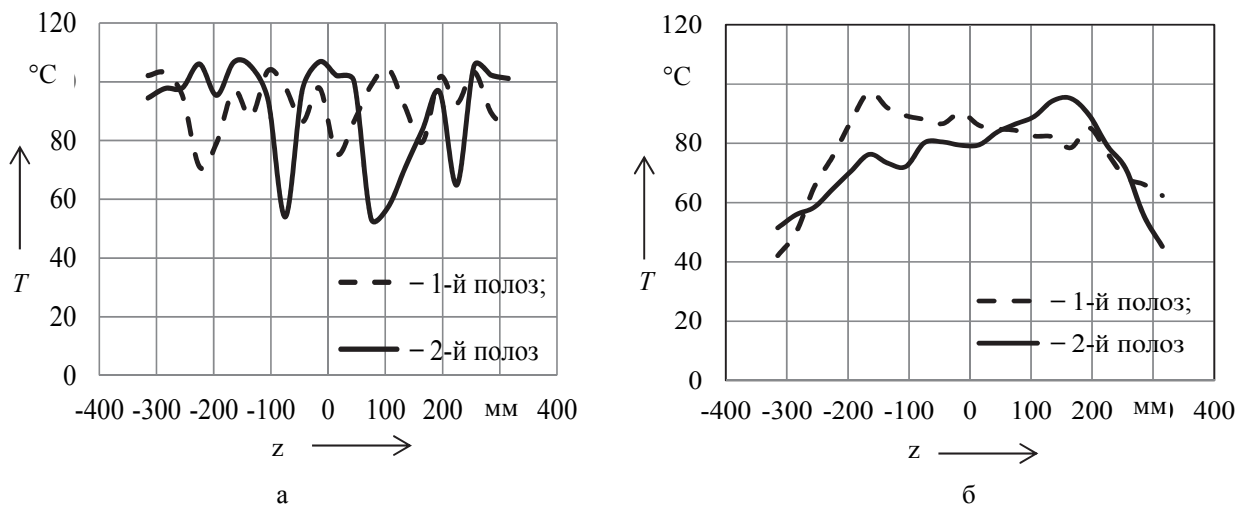


Рисунок 4 – Распределение установившейся температуры по полозу токоприемников:
а – Faiveley; б – ТАС-24

Для определения возможности увеличения пропускаемого тягового тока была разработана карта влияния факторов на нагрев полоза токоприемника (таблица), в соответствии с которой видна роль каждого из факторов, к которым относятся электроподвижной состав (ЭПС), токоприемник, контактная сеть и окружающая среда, выполнен анализ причин неравномерности нагрева.

Нагрев токоприемника обусловлен протеканием тягового электрического тока и тепловым воздействием электрической дуги при ухудшении токосъема. Нагрев, вызванный трени-

ем в зоне контакта, значительно меньше нагрева, обусловленного указанными выше причинами.

Теплоемкость и теплоотдача контактных элементов определяются составом материалов и их конфигурацией, влияют на постоянную времени нагрева и охлаждения.

Карта влияния факторов на нагрев полоза токоприемника

Темпе- ратура полоза	Состав- ляющие теплового потока		Влияющие факторы														
			ЭПС			Токоприемник			Контактная подвеска				Окружающая среда				
			тип	режим	масса	количество	полоз (конфи- гурация)	тип вставок	P_p	e	Δh	n	количество проводов	$T_{\text{возд}}$	$V_{\text{ветр}}$	ИФ-излуче- ние	влажность
									$P_{\text{КТ}}$								
T	$Q_{\text{Дж}}$	I^2	+	+	+	+	+										
		R					+	+	+				+				
		t		+								+	+				
	$Q_{\text{искр}}$					+			+								
	C						+	+									
	$-O_{\text{охл}}$			+			+	+						+	+	+	+

Определяющим фактором интенсивности теплообмена является разность температуры между рассматриваемым элементом и соседними, между рассматриваемым элементом и окружающей его средой. Коэффициент теплопроводности может учитываться как постоянная величина, например, при отводе тепла с нижней поверхности вставок через каркас полоза, на котором они закреплены, а коэффициент теплоотдачи зависит от скорости движения электроподвижного состава при охлаждении набегающим воздушным потоком.

Температура полоза токоприемника определяется главным образом мощностью джоулевого нагрева $Q_{Дж}$ в результате протекания тягового электрического тока. Сама величина тока определяется типом электроподвижного состава, режимом движения и массой поезда. Наиболее сложным условием является токосяем тяжеловесным и длинносоставным поездом, потребляющим наибольшую величину тока, например, в режиме движения в гору при постоянном токе. Особо актуальным является вопрос с затяжными подъемами. Необходимо отметить, что согласно закону Джоуля – Ленца величина $Q_{Дж}$ пропорциональна квадрату тока, следовательно, для уменьшения температуры полоза токоприемника наиболее эффективным мероприятием является деление тока путем увеличения точек контакта. В реальности это достигается различным количеством токоприемников, например, для электричек, пригородных поездов с распределенной тягой характерно поднятие большого числа токоприемников, установленных на каждой моторвагонной секции. Для грузового состава используются вспомогательные локомотивы – электровозы. Одновременное поднятие двух и более токоприемников на одной локомотивной секции может приводить к чрезмерному уровню отжата контактного провода и достижению им недопустимой величины, что предусматривается инструкцией для локомотивных бригад. Эффективным способом токосяема является применение двух крайних токоприемников двух- и трехсекционных электровозов.

Для той же цели применяются двух-, трех-, четырехполосные токоприемники. Например, большинство современных скоростных токоприемников имеют разнесенные на 400 – 600 мм самонесущие токосяемные элементы с индивидуальным подрессориванием.

На сопротивление в скользящем контакте влияет нажатие, которое отличается на передних и задних ползках по ходу движения, что вызывает разницу в их нагреве.

Объемные подвески, к которым относятся ромбическая и ромбовидная, приводят к неравномерности распределения температуры по поверхности полоза.

Переходное сопротивление определяется типом вставки. Угольные токосъемные элементы имеют значительно большее сопротивление по сравнению с металлокерамическими. Добавление металлических компонентов в состав импегнированных углеграфитовых токосъемных элементов приводит к значительному снижению их сопротивления.

Количество теплоты пропорционально времени действия теплового потока, его распределение определяется расположением контактного провода в плане, количеством проводов, что особо актуально для пространственных подвесок.

График плотности распределения положения канатного провода в плане для реального участка электрифицированной железной дороги приведен на рисунке 5, а, для кольцевого стенда ОмГУПС [6] – на рисунке 5, б.

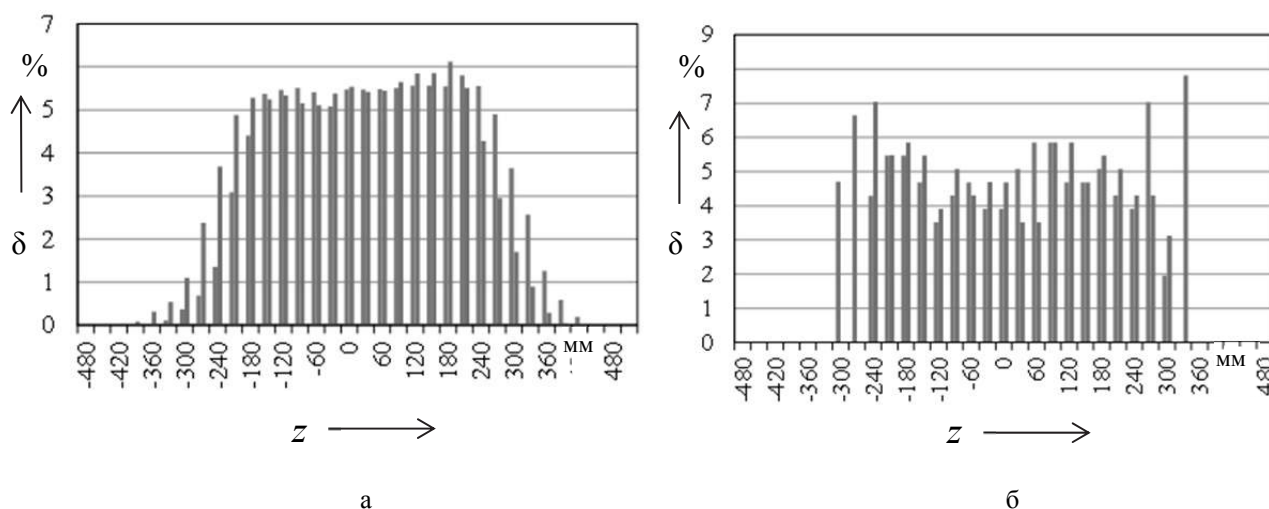


Рисунок 5 – Плотность распределения положения контактного провода в плане:
а – реальный участок; б – кольцевой стенд ОмГУПС

Тепловой поток определяется также режимом движения электроподвижного состава, поскольку ЭПС может двигаться медленно с повышенной токовой нагрузкой или не потреблять ток на «выбеге».

В соответствии с формальным подходом рассмотренные факторы можно сгруппировать по ключевой величине для разработки организационных и технических мероприятий, направленных на повышение нагрузочной способности токоприемника (рисунок 6).

Предлагаемые в блок-схеме способы, связанные с применением систем автоматического регулирования (САР) и направленные на увеличение числа точек контакта, могут быть использованы при проектировании новых систем токосъема и для модернизации существующих за счет доработки конструкции токоприемников. Чередование токоприемников активно применяется при прибытии электропоездов на железнодорожную станцию, актуализация инструкции для локомотивных бригад позволит увеличить нагрузочную способность ЭПС за счет рационального применения данного способа.

Системы охлаждения полоза, как активные, так и пассивные, в настоящее время находятся в стадии разработки. Однако их применение сопряжено со снижением надежности из-за дополнительных узлов.

Публикация осуществлена в рамках реализации гранта ОАО «РЖД» на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта (распоряжение № 1528р от 30.06.2014).

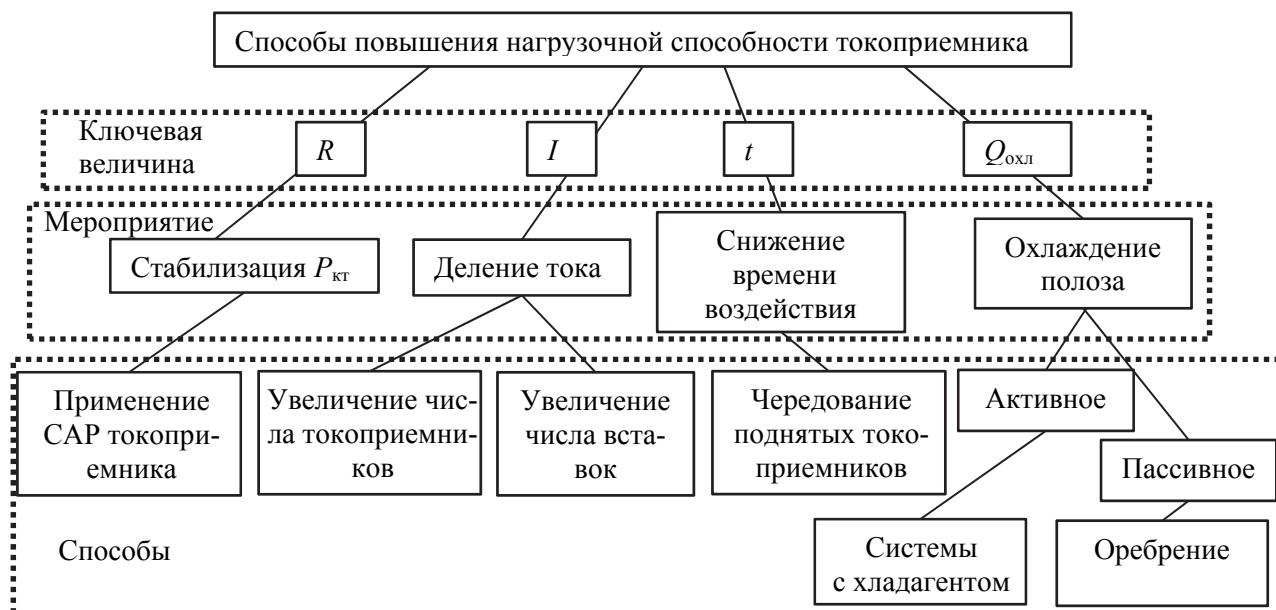


Рисунок 6 – Блок-схема способов повышения нагрузочной способности токоприемника

На основании изложенного можно сделать выводы.

1. Увеличение мощности и скорости ЭПС ведет к необходимости повышения нагрузочной способности токоприемников.
2. Стабилизация контактного нажатия в системе токосъема позволяет значительно повысить максимально допустимый длительный ток во время движения.
3. В соответствии с предложенными способами для увеличения нагрузочной способности токоприемника необходимо применять САР.

Список литературы

1. Сидоров, О. А. Совершенствование методов испытаний контактных подвесок и токоприемников [Текст] / О. А. Сидоров, А. Н. Смердин // Железнодорожный транспорт / ОАО «РЖД». – М., 2010. – № 11. – С. 72 – 74.
2. Сидоров, О. А. Применение рациональных методик оценки качества токосъема магистральных электрических железных дорог [Текст] / О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, В. А. Жданов // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург, 2011. – № 1 (28). – С. 70 – 76.
3. Паранин, А. В. Расчет распределения тока в контактном проводе и полозе токоприемника при токосъеме [Текст] / А. В. Паранин, Д. А. Ефимов // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург, 2009. – № 4 (23). – С. 81 – 84.
4. Паранин, А. В. Математическое моделирование тепловых процессов при взаимодействии токоприемника и контактного провода [Текст] / А. В. Паранин // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург, 2009. – № 4 (23). – С. 85 – 88.
5. ГОСТ 32204-2013. Токоприемники железнодорожного электроподвижного состава. Общие технические условия [Текст]. – М.: Стандартинформ, 2014. – 24 с.
6. Исследование токовой нагрузочной способности токоприемника магистрального электроподвижного состава [Текст] / В. М. Павлов, О. А. Сидоров и др. // Вестник ВНИИЖТа /

Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта. – М., 2015. – № 4. – С. 19 – 24.

7. Проверка токовой нагрузочной способности токоприемников ТАС 24 и ЛАС 25 [Текст] / В. М. Павлов, П. В. Попов и др. // Вестник ВЭЛНИИ / Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт электровозостроения. – Новочеркасск. – 2015. – № 2 (70). – С. 33 – 43.

8. Экспериментальные исследования нагрузочной способности токоприемника магистрального электроподвижного состава [Текст] / В. М. Павлов, А. Н. Смердин и др. // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте: Материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2013. – С. 62 – 69.

9. Повышение нагрузочной способности комплекса для исследования устройств токосъема [Текст] / В. В. Томилов, А. В. Рыжков и др. // Materiały XI Międzynarodowej naukowo-raktycznej konferencji «Naukowa myśl informacyjnej powieki – 2015» Volume 14. Matematyka. Fizyka. Budownictwo i architektura. Nowoczesne informacyjne technologie. Techniczne nauki / Nauka i studia. Przemyśl. – P. 64 – 66.

10. Томилов, В. В. Особенности теплового расчета токоприемников магистрального электроподвижного состава [Текст] / В. В. Томилов, А. В. Тарасенко, А. Н. Кутькин // Электрификация и развитие инфраструктуры энергообеспечения тяги поездов на железнодорожном транспорте: Материалы шестого междунар. симпозиума «Элтранс-2011» / Санкт-Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – СПб, 2013. – С. 526 – 536.

References

1. Sidorov O. A., Smerdin A. N. Improvement of methods of tests of catenaries and pantographs [Sovershenstvovanie metodov ispytaniy kontaknykh podvesok i tokopriemnikov]. *Railway Transport Journal*, 2010, no. 11, pp. 72 – 74.

2. Sidorov O. A., Smerdin A. N., Zhdanov V. A. Application of reasonable current collection quality methods for high speed railways [Primenenie ratsional'nykh metodik otsenki kachestva tokos"ema magistral'nykh elektricheskikh zheleznykh dorog]. *Scientific-technical journal «Transport Urala»*, 2011, no 1 (28), pp. 70 – 76.

3. Pararin A.V., Yefimov D.A. Calculation of current distribution in contact wire and current collector runner at current pickup [Raschet raspredeleniya toka v kontaktnom provode i poloze tokopriemnika pri tokos"eme]. *Scientific-technical journal «Transport Urala»*, 2009, no 4 (23), pp. 81 – 84.

4. Pararin A.V. Mathematical modeling of thermal processes at interaction of a current collector and a contact wire [Matematicheskoe modelirovanie teplovykh protsessov pri vzaimodeistvii tokopriemnika i kontaktnogo provoda]. *Scientific-technical journal «Transport Urala»*, 2009, no 4 (23), pp. 85 – 88.

5. *Current collectors of railway electric rolling stock. General specification, GOST 32204-2013* (Tokopriemniki zheleznodorozhnogo elektropodvizhnogo sostava. Obshchie tekhnicheskie usloviia, State Standart 32204-2013). Moscow, Standarty, 2013, 24 p.

6. Pavlov V. M., Sidorov O. A., Smerdin A. N., Golubkov A. S., Tartynskiy D. V., Tomilov V. V. Current-Loading Capacity Investigations of Current Collector Operated with Mainline Electric Motive Power [Issledovaniia tokovoi nagruzochnoi sposobnosti tokopriemnika magistral'nogo elektropodvizhnogo sostava], *Vestnik of the Railway Research Institute*, 2015, no 4, pp. 19 – 24.

7. Pavlov V. M., Popov P. V., Sidorov O. A., Smerdin A. N., Tomilov V.V. Continuous current-carrying capacity test of TAs 24 and LAs 25 current-collectors [Proverka tokovoi nagruzochnoi

spособnosti tokopriemnikov TAs 24 i LAs 25]. *Vestnik VELNII Science Journal*, 2015, no 2 (70), pp. 33 – 43.

8. Pavlov V. M., Smerdin A. N., Tomilov V. V., Golubkov A. S., Emelyanov M. V. Experimental investigations of loading capacity of the main electric previous pantographs [Eksperimental'nye issledovaniia nagruzochnoi sposobnosti tokopriemnika magistral'nogo elektropodvizhnogo sostava] *Materialy Vserossiiskoi nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar. uchastiem.: Pribory i metody izmerenii, kontrolia kachestva i diagnostiki v promyshlennosti i na transporte.* – Omsk, 2013, pp. 62 – 69.

9. Tomilov V. V., Rzhikhov A. V., Sorokvashin D. A., Pluzhnikov G. A. The increase in the load capacity of the complex for the study of current collectors [Povyshenie nagruzochnoi sposobnosti kompleksa dlia issledovaniia ustroistv tokosema]. *Materialy XI Międzynarodowej naukowiraktycznej konferencji: «Naukowa myśl informacyjnej powieki – 2015».* *Przemysł.* 2015, pp. 64 –66.

10. Tomilov V. V., Tarasenko A. V., Kutkin A.N. Features of thermal calculation of current collectors of the main electric rolling stock [Osobennosti teplovogo rascheta tokopriemnikov magistral'nogo elektropodvizhnogo sostava]. *Materialy shestogo mezhdunar. simpoziuma «Eltrans-2011»: Elektrifikatsiia i razvitie infrastruktury energoobespecheniia tiagi poezdov na zheleznodorozhnom transporte.* – St. Petersburg, 2013, pp. 526 – 536.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сидоров Олег Алексеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: 8 (3812) 31-34-46.

E-mail: SidorovOA@omgups.ru

Смердин Александр Николаевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Томилов Валерий Викторович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sidorov Oleg Alekseevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor of Technical Sciences, Head of the department «Railway transport electrosuppling», OSTU.

Phone: 8 (3812) 31-34-46.

E-mail: SidorovOA@omgups.ru

Smerdin Alexander Nikolaevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Railway transport electrosuppling», OSTU.

Tomilov Valery Victorovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department « Railway transport electrosuppling », OSTU.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Сидоров, О. А. Исследование температуры нагрева полоза токоприемника и способы ее снижения [Текст] / О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, В. В. Томилов // *Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения.* – Омск. – 2017. – № 4 (32). – С. 25 – 34.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Sidorov O. A. Research of temperature distribution unequality of a panhead and its reduction methods. *Journal of Transsib Railway Studies*, vol. 32, no 3, pp 25 – 34 (In Russian).

УДК 629.4.016.3

О. П. Супчинский

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

ПОТЕРИ МОЩНОСТИ В УЗЛАХ И АГРЕГАТАХ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОВОЗА

Аннотация. В статье рассматривается возможность использования показателя энергетической эффективности локомотива для оценки качества ремонта и использования мощности (энергоэффективности) электровоза. Данный показатель рассчитывается для электровозов, прошедших текущий ремонт ТР-3 или ремонт аналогичного объема, на основе прогнозируемых дополнительных потерь мощности в лимитирующих узлах и агрегатах электровоза, определяемых с учетом их технических параметров и характеристик, полученных в результате выполненного ремонта. Применение предложенного показателя в качестве показателя эффективности использования электровозов позволит влиять на улучшение их технического состояния за счет управления качеством ремонта и использованием мощности.

Ключевые слова: качество ремонта, эффективность использования локомотива, показатель энергетической эффективности электровоза, потери мощности.

Oleg P. Supchinsky

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

LOSSES POWER IN KNOTS AND UNITS AS THE INDICATOR OF EFFICIENCY OF USE THE LOCOMOTIVE

Abstract. In article examines the indicator of the energy efficiency of the locomotive as an indicator of the quality repair and use the power (energy efficiency) of the locomotive. This indicator is calculated for electric locomotives that have undergone current repair of MW-3 or repair of a similar volume, based on the predicted additional power losses in the limiting units and units of the locomotive, determined taking into account their technical parameters and characteristics obtained as a result of the repair. The application of the proposed indicator as an indicator the efficiency the use of electric locomotives will allow to influence the improvement of their technical condition through the management the quality of repairs and the use of power.

Keywords: quality of repair, efficiency of locomotive use, energy efficiency index of an electric locomotive, power loss.

Для оценки качества эксплуатационной деятельности подразделений локомотивного хозяйства принята система показателей, характеризующих качество труда работников локомотивных депо и эффективность использования локомотивов. Показатели эффективности использования локомотивов служат для планирования объема и оценки качества выполняемой ими работы [1] и делятся на количественные и качественные.

К количественным показателям эффективности работы локомотивного парка относят [1]

- пробег локомотива в локомотиво-километрах;
- время работы локомотива в локомотиво-часах;
- объем перевозок в тонно-километрах брутто.

Чаще всего работу локомотивов измеряют в тонно-километрах. Тонно-километр – измеритель, отражающий выполненную работу локомотивами депо по перевозке грузов и пассажиров. Показатель тонно-километры брутто является основной оценкой выполнения плана по объему работы локомотивного депо. По его значению производится расчет финансирования, норм расхода топлива и энергии, определяется средний вес поезда брутто и производи-

тельность локомотива, ведется расчет потребности локомотивов для грузового движения при планировании.

Однако приведенные выше показатели не позволяют в полной мере отразить эффективность использования локомотивного парка и провести анализ его работы за определенный период времени.

Ко второй группе показателей относятся качественные показатели, которые, в свою очередь, расширяют возможности получить более точную оценку работы локомотивов [1].

Условно можно выделить три группы показателей качества использования локомотивов:

- по времени использования;
- по использованию мощности (энергоэффективности);
- по производительности.

Помимо этого к качественным показателям следует отнести и общий процент неисправных локомотивов [1], который отражает техническое состояние локомотивного парка и качество ремонта и технического обслуживания локомотивов. Общий процент неисправных локомотивов определяется как отношение фронта ремонта локомотивов к парку локомотивов и выражается в процентах.

Для того чтобы снизить процент локомотивов, находящихся в неисправном состоянии, необходимо проводить ряд мероприятий, направленных

- на улучшение технического состояния локомотивов;
- повышение их эксплуатационной надежности;
- сокращение простоев в ремонте;
- внедрение диагностического варианта организации ремонтного производства и повышение профессиональной культуры локомотивных бригад и ремонтных работников.

Еще одним показателем качества ремонта может служить коэффициент эффективности технического обслуживания и ремонта локомотива, который определяется как отношение времени нахождения локомотива на всех видах технического обслуживания и ремонта, включая неплановые ремонты, за некоторый период эксплуатации к времени нахождения локомотива в эксплуатируемом парке за тот же период [2].

Качественный ремонт тягового подвижного состава является важнейшим фактором надежности и безопасности перевозочного процесса на железнодорожном транспорте [3] и во многом определяет эффективность использования локомотивов. В связи с реформированием ОАО «РЖД» ремонт подвижного состава, принадлежащего холдингу, осуществляется заводами-изготовителями и сервисными локомотивными депо. Основная задача этих предприятий – обеспечение требуемых показателей технической готовности локомотивов холдинга при экономически оправданном уровне финансовых затрат.

Качество ремонта характеризуется техническими, технологическими, экономическими показателями, одним из которых является энергоэффективность (использование мощности) отремонтированного локомотива.

Проводить оценку использования мощности локомотива можно по коэффициенту полезного действия (КПД), который является величиной, характеризующей совершенство процессов превращения, преобразования или передачи энергии, и определяется как отношение количества энергии, отданной локомотивом для выполнения перевозочной работы за некоторый период эксплуатации, к количеству энергии, полученной при сгорании топлива или из контактной сети (на электрифицированных участках пути), израсходованной локомотивом за тот же период [4].

Для уменьшения расхода электроэнергии и топлива необходимо, чтобы локомотив работал в зоне высоких значений КПД [5].

Коэффициент полезного действия электровоза при работе тяговых двигателей на полной мощности при скорости, соответствующей продолжительному режиму работы, и при номинальном напряжении на токоприемнике должен быть не менее [6] 0,860 на переменном токе и 0,875 на постоянном токе.

Снижение КПД происходит из-за роста потерь мощности в тяговых двигателях, в преобразователях, включая трансформаторы, сглаживающие реакторы, возбудители при независимом или смешанном возбуждении; потерь мощности при потреблении электроэнергии вспомогательными машинами и другими нагрузками цепей собственных нужд, обусловленных ухудшением их технического состояния.

Потери энергии при ее преобразовании на электроподвижном составе, которые во многом определяются техническим состоянием деталей, узлов и агрегатов, также оказывают влияние на расход энергии. Поэтому необходимо искать резервы снижения потерь мощности за счет проведения качественного ремонта узлов и агрегатов подвижного состава, улучшающего их технические характеристики. Потери – разность между потребляемой мощностью и полезной мощностью какой-либо системы или устройства [7, 8], в нашем случае – локомотива.

Был выбран и обоснован показатель энергоэффективности ($ПЭЛ_{эл}$), который определяется на основе технологических параметров узлов и агрегатов, получаемых во время ремонта и фиксируемых в отчетной документации и электронном паспорте электровоза. Для определения показателя энергоэффективности электровоза учитываются только те технические характеристики и технологические параметры узлов и агрегатов, которые определяются во время его ремонта или диагностирования после ремонта. Потери, связанные с режимами эксплуатации, в расчет не принимаются.

В ОмГУПСе разработана «Методика определения показателя энергоэффективности локомотива для оценки качества ремонта электровозов ($ПЭЛ_{эл}$)», которая была утверждена старшим вице-президентом ОАО «РЖД» В. А. Гапановичем 26 декабря 2014 г. под № 514.

Объектом применения указанной методики являлись магистральные грузовые и пассажирские электровозы постоянного и переменного тока, эксплуатируемые на сети железных дорог ОАО «РЖД». В методике установлен общий порядок определения показателя для оценки качества ремонта электровоза с точки зрения энергоэффективности.

Показатель энергетической эффективности – это абсолютная, удельная или относительная величина потребления или потерь энергетических ресурсов для продукции любого назначения или технологического процесса [4].

Расчет показателя энергоэффективности выполняется для электровоза, прошедшего текущий ремонт ТР-3 или аналогичного объема и готового для предъявления приемщику.

Для расчета $ПЭЛ_{эл}$ использовалось большое количество (100 – 150 для одной секции) параметров, измеряемых в процессе ремонта электровоза. Апробация указанной методики показала, что такой подход не позволяет говорить о возможности практического применения предложенной методики, а математический расчет, усложненный большим количеством вводимых параметров, существенно затрудняет автоматизацию процесса определения показателя энергоэффективности локомотива.

В современных электровозах на так называемые собственные нужды (питание вспомогательного оборудования, преобразователей и т. п.) расходуется на постоянном токе 15 – 20 %, а на переменном токе 25 – 30 % от общего количества используемой электрической энергии. Основная часть (70 – 85 %) электрической энергии, потребляемой электровозом, приходится на тяговые электродвигатели и преобразуется в колесно-моторных блоках в механическую энергию вращения колесных пар и тяговое усилие для передвижения состава поезда.

Таким образом, для обеспечения баланса между трудоемкостью ремонта и точностью расчета $\Pi\mathcal{E}L_{\text{эл}}$ достаточно учитывать дополнительные потери мощности, связанные с параметрами после ремонта следующих узлов и агрегатов электровозов: моторно-осевых подшипников, зубчатой передачи, колесных пар, тяговых электродвигателей (скоростные характеристики).

В качестве показателя энергоэффективности электровоза принимается отношение экспериментально-расчетного коэффициента полезного действия, полученного с учетом прогнозируемых дополнительных потерь мощности в узлах и агрегатах электровоза, определяемых на основе их технических параметров в результате выполненного ремонта, к контрольно-расчетному КПД, принятому по паспортным данным электровоза данной серии [9]

$$\Pi\mathcal{E}L_{\text{эл}} = \frac{\eta_{\text{эл}}}{\eta_{\text{кр}}}, \quad (1)$$

где $\eta_{\text{эл}}$ – экспериментально-расчетный КПД (определенный на основании послеремонтных параметров узлов и агрегатов, взятых из ремонтной документации);

$\eta_{\text{кр}}$ – контрольно-расчетный КПД (принятый по паспортным данным электровозов данной серии).

При выполнении ремонта в сборочных единицах, узлах и агрегатах электровоза могут появиться дополнительные потери мощности, обусловленные отклонением их технических параметров и характеристик от заводских значений, установленных в конструкторской документации, что снижает КПД электровоза. Дополнительные потери мощности зависят от установленных в ремонтной документации допусков на технические параметры и характеристики агрегатов и узлов: чем больше допуски, тем более значительными могут быть дополнительные потери мощности. Значение экспериментально-расчетного КПД электровоза после ремонта

$$\eta_{\text{эр}} = \eta_{\text{кр}} - \frac{\sum_i \Delta P_i}{P_{\text{эл}}}, \quad (2)$$

где ΔP_i – прогнозируемые дополнительные потери мощности в i -м узле электровоза, определяемые на основании технических параметров и характеристик этого узла после выполненного ремонта, внесенных в ремонтную документацию;

$P_{\text{эл}}$ – мощность продолжительного режима на валах тяговых электродвигателей электровоза рассматриваемой серии.

Для рассматриваемой серии электровоза необходимо определить суммарные прогнозируемые дополнительные потери мощности, когда все допуски на ремонт отдельных узлов и агрегатов, установленные в нормативной документации, соблюдены, но при этом потери в каждом узле или агрегате максимальны:

$$\Delta P_{\text{max}} = \sum_i \Delta P_i^{\text{max}}. \quad (3)$$

При таком уровне дополнительных потерь экспериментально-расчетный КПД $\eta_{\text{эр}}$ и показатель энергоэффективности $\Pi\mathcal{E}L_{\text{эл}}$ будут иметь минимальные значения:

$$\eta_{\text{эр}}^{\text{min}} = \eta_{\text{кр}} - \frac{\Delta P_{\text{max}}}{P_{\text{эл}}}; \quad (4)$$

$$ПЭЛ_{эл}^{\min} = \frac{\eta_{эр}^{\min}}{\eta_{кр}}. \quad (5)$$

Для каждой серии электровозов $ПЭЛ_{эл}^{\min}$ будет иметь свое значение, обусловленное особенностями конструкции.

Для оценки качества ремонта полученное в результате расчета значение показателя энергоэффективности $ПЭЛ_{эл}$ сравнивается с $ПЭЛ_{эл}^{\min}$ для данной серии электровозов.

Когда $ПЭЛ_{эл}$ меньше, чем $ПЭЛ_{эл}^{\min}$, качество ремонта с точки зрения энергоэффективности считается неудовлетворительным. В этом случае необходимо проведение дополнительных ремонтных работ по узлам, имеющим наибольшие прогнозируемые дополнительные потери мощности.

Используемые для определения $ПЭЛ_{эл}$ прогнозируемые дополнительные потери мощности, связанные с качеством ремонта, определяются дополнительными потерями в моторно-осевых подшипниках (МОПах), зубчатых передачах, а также потерями мощности из-за разности скоростных характеристик колесно-моторных блоков и диаметров бандажей колес.

Исходными данными для определения приращения потерь мощности в перечисленных выше узлах в зависимости от их технического состояния при выходе электровоза из ремонта являются радиальные зазоры в моторно-осевых подшипниках, общие боковые зазоры в зубчатых передачах, скоростные характеристики колесно-моторных блоков и диаметры бандажей колес, зафиксированные в паспорте электровоза после проведения ремонтных работ (таблица 1).

Таблица 1 – Исходные данные

Наименование узла	Моторно-осевой подшипник		Зубчатая передача		Колесно-моторный блок		
Контролируемый параметр	радиальный зазор, мм		боковой зазор, мм		диаметр колеса, мм		разность скоростных характеристик, %
Номер оси	сторона против коллектора (СПК)	сторона коллектора (СК)	левый	правый	левого	правого	

Потери мощности в моторно-осевом подшипнике определяются с использованием регрессионных уравнений [10]. Например, для электровозов серии 2ЭС4К такое уравнение имеет вид:

$$\Delta P_{\text{моп}}(\Delta_j^{\text{моп}}) = 8,5(\Delta_j^{\text{моп}})^2 - 28\Delta_j^{\text{моп}} + 16, \quad (6)$$

где $\Delta_j^{\text{моп}}$ – радиальный зазор в j -м моторно-осевом подшипнике.

Результаты расчетов заносятся в таблицу.

Таблица 2 – Потери мощности в МОПе

Номер оси колесной пары	Потери мощности в МОПе, сторона против коллектора, кВт	Потери мощности в МОПе, сторона коллектора, кВт	Сумма потерь мощности на оси, кВт
Всего			

Потери мощности в зубчатой передаче также рассчитываются по регрессионным уравнениям [10].

Для электровозов постоянного тока серии 2ЭС4К это уравнение имеет вид:

$$\Delta P_{\text{зп}}(\Delta_j^{\text{зп}}) = 0,3\Delta_j^{\text{зп}} - 2,3, \quad (7)$$

где $\Delta_j^{\text{зп}}$ – боковой зазор в j -м зубчатом зацеплении.

Результаты расчетов заносятся в таблицу.

Таблица 3 – Потери мощности в зубчатой передаче

Номер оси колесной пары	Потери мощности в зубчатой передаче, сторона против коллектора, кВт	Потери мощности в зубчатой передаче, сторона коллектора, кВт	Сумма потерь мощности на оси, кВт
Всего			

Для определения приращения потерь мощности в МОПе и зубчатых передачах в зависимости от их технических параметров, полученных в результате ремонта, находим разность между минимально возможными потерями мощности и прогнозируемыми фактическими потерями после ремонта:

$$\Delta P_{\text{ид}} = P_{\text{иф}} - P_{\text{imin}}, \quad (8)$$

где минимальные потери мощности в узле P_{imin} определяются по формулам (6) и (7) при соответствующих минимальных значениях Δ_j согласно нормативной документации.

Приращение потерь мощности из-за разницы диаметров бандажей колес

$$\Delta P_{\text{кпи}} = N_{\text{max}} - N_i, \quad (9)$$

где N_{max} – максимальная мощность, выдаваемая на одну колесную пару с максимально возможным диаметром колеса (новое), кВт;

N_i – мощность, выдаваемая на i -ю колесную пару с уменьшенным диаметром колес в связи с износом или механической обработкой бандажей после ремонта, кВт.

При этом

$$N_i = \frac{2\pi M_i n}{60}, \quad (10)$$

где n – частота вращения колесной пары, об/мин;

M_i – крутящий момент на колесе, кН·м, определяемый так:

$$M_i = FR_{ki}, \quad (11)$$

где F – тяговое усилие на оси колесной пары, кН;

R_{ki} – усредненный радиус бандажа i -й колесной пары, м.

Прогнозируемые дополнительные потери мощности из-за разницы скоростных характеристик колесно-моторных блоков (КМБ)

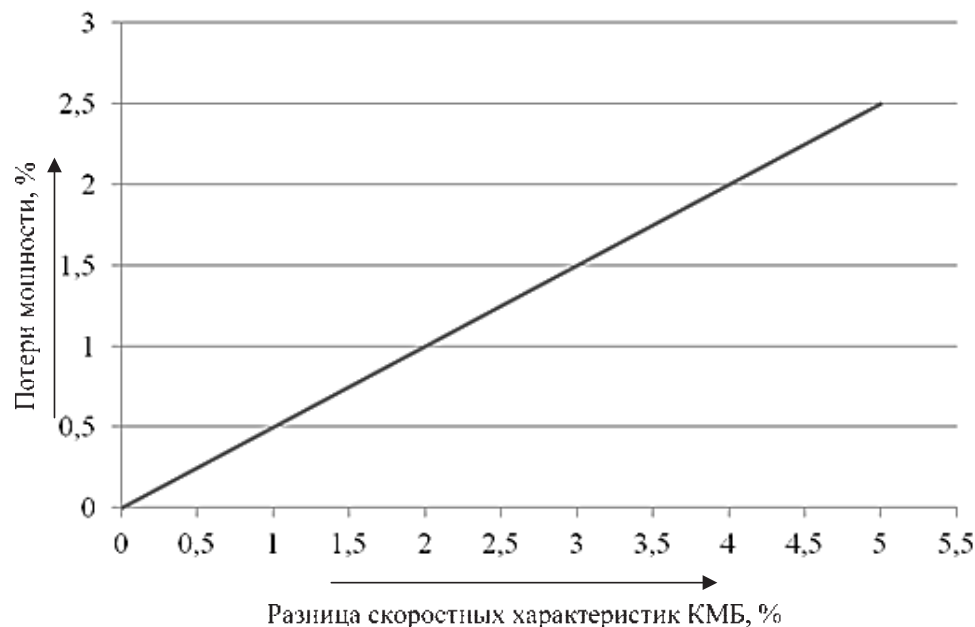
$$\Delta P_i = \frac{P_{\text{эл}}}{K_{\text{ос}} \cdot K_{\text{сек}}} \Delta P_{\text{сxi}}, \quad (12)$$

где $P_{эл}$ – мощность продолжительного режима на валах тяговых двигателей электровоза, кВт;

$K_{ос}$ – количество осей для секции электровоза;

$K_{сек}$ – количество секции электровоза;

$\Delta P_{с.хi}$ – потери мощности из-за разницы скоростных характеристик i -го КМБ, %, которые определяются по графику, приведенному на рисунке [11].



Потери мощности из-за разности скоростных характеристик колесно-моторных блоков электровозов

Результаты определения дополнительных потерь мощности из-за разницы скоростных характеристик КМБ по осям электровоза сводятся в таблицу.

Таблица 4 – Дополнительные потери мощности из-за разности скоростных характеристик КМБ

Номер оси	Разность скоростных характеристик, %	Потери мощности, кВт
Всего		

Значения прогнозируемых дополнительных потерь мощности в узлах и агрегатах электровоза, определенные на основании их технических параметров и характеристик после выполненного ремонта, сводятся в таблицу.

Таблица 5 – Прогнозируемые дополнительные потери мощности в узлах и агрегатах электровоза, определяемые качеством ремонта

Узлы и агрегаты электровоза	Дополнительные потери мощности, кВт	Дополнительные потери мощности, процент от общей мощности электровоза
моторно-осевые подшипники		
зубчатые передачи		
колесные пары		
колесно-моторные блоки		
суммарные потери		

Полученное значение суммарных прогнозируемых дополнительных потерь мощности в электровазоне, определенное на основании взятых из ремонтной документации технических параметров и характеристик узлов и агрегатов после выполненного ремонта, используются при определении показателя энергоэффективности электровазона $ПЭЛ_{эл}$ для оценки качества ремонта согласно выражению (1).

По результатам опытной эксплуатации энергетического паспорта локомотива в сервисных локомотивных депо (на основании полученных данных расчета $ПЭЛ_{эл}$ для электровазонов 2ЭС6, 2ЭС5К, ЭП2К) можно сделать вывод о том, что уточненная методика определения $ПЭЛ_{эл}$ работоспособна и позволяет оценивать качество ремонта с точки зрения энергоэффективности.

Для эффективного управления и обеспечения качества технического обслуживания и ремонта необходимо определять оптимальный график контроля энергоэффективности, минимизирующий общие затраты в единицу времени, связанные с проведением диагностирования, ремонта и работой оборудования, технические характеристики которого, находятся в зоне предельных значений допустимого диапазона.

Например, для выкатки и подкатки КМБ, имеющего неоптимальные значения технических характеристик, требуется дополнительное время, которое приведет к возникновению потерь. Поэтому необходимо определить оптимальное время t_i , в течение которого простой электровазона в ремонте не приведет к существенным издержкам. Значение оптимального времени находим путем решения относительно t_i уравнения [12]

$$\frac{C_j}{C_i} = \int_0^{t_i} R(t)dt, \quad (13)$$

где C_j – общие потери от использования КМБ с различными скоростными характеристиками;

C_i – общие затраты в единицу времени, связанные с простоем при перекатке КМБ;

$R(t)$ – функция надежности (долговечности), или вероятность того, что отказ случится не раньше, чем через время t .

При оптимальном решении заменять КМБ, имеющий неоптимальные значения технических характеристик, необходимо на следующем (очередном) плановом ремонте, внеплановые замены производить только в том случае, если до планового ремонта осталось не меньше времени, чем t_i .

Таким образом, применение $ПЭЛ_{эл}$ в качестве показателя эффективности использования электровазонов позволит влиять на улучшение их технического состояния за счет управления качеством ремонта и использованием мощности посредством снижения дополнительных потерь, связанных с неоптимальными значениями технических характеристик лимитирующих узлов и агрегатов после ремонта. Кроме того, при дальнейшем накоплении и систематизации данных о динамике изменения показателя энергоэффективности появляется возможность проводить сравнительную оценку $ПЭЛ_{эл}$ с фактическими данными энергоэффективности локомотивов в эксплуатации для определения причин перерасхода электроэнергии и принятия мер по их устранению. Предложенный подход может быть использован для оценки качества ремонта отдельных лимитирующих узлов механического оборудования и для прогнозирования их остаточного ресурса на основании данных об изменениях показателя энергоэффективности.

Список литературы

1. Феоктистов, В. П. Электрические железные дороги: Учебник [Текст] / Под ред. В. П. Феоктистова, Ю. Е. Просвинова / МИИТ. М., 2006. – 269 с.
2. ГОСТ Р 56046-2014. Показатели использования локомотивов. Термины и определения [Текст]. – М.: Стандартиформ, 2014. – 24 с.
3. Смирнов, В. А. Целевые показатели оценки качества технологических решений предприятий по ремонту подвижного состава. [Текст] / В. А. Смирнов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока / Сибирский гос. ун-т водного транспорта. – Новосибирск, 2013. – №1. – С. 32 – 38.
4. ГОСТ Р 51387-99. Энергосбережение. Нормативно-методическое обеспечение. Основные положения [Текст]. – М.: Госстандарт, 1999. – 16 с.
5. Осипов, С. И. Теория электрической тяги: Учебник [Текст] / С. И. Осипов, С. С. Осипов, В. П. Феоктистов / УМЦ ЖДТ. – М., 2006. – 436 с.
6. ГОСТ Р 55364- 2012. Электровозы. Общие технические требования [Текст]. – М.: Стандартиформ, 2013. – 34 с.
7. ГОСТ 28627-90 (МЭК 1020-1-89). Электромеханические переключатели, используемые в электронной аппаратуре. Общие технические условия [Текст]. – М.: Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1990. – 45 с.
8. Муравьев, Д. В. Анализ потерь мощности в электромагнитных контакторах типа МК электровозов постоянного и переменного тока [Текст] / Д. В. Муравьев // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2016. – № 1(48) – С. 46 – 52.
9. Шантаренко, С. Г. Качество ремонта и энергоэффективность электровозов [Текст] / С. Г. Шантаренко, М. Ф. Капустьян, О. П. Супчинский // Вестник РГУПС / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. – Ростов-на-Дону. – 2015. – №1 (57) – С. 46 – 52.
10. Шантаренко, С. Г. Оценка потерь мощности в узлах экипажной части электровозов. [Текст] / С. Г. Шантаренко, М. Ф. Капустьян, А. В. Обрывалин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2015. – № 3 (23) – С. 62 – 68.
11. Магистральные электровозы. Электрические машины и трансформаторное оборудование электровозов [Текст] / В. И. Бочаров, П. А. Золотарев и др. – М.: Машиностроение, 1968. – 444 с.
12. Браун, Р. Исследование операций. Модели и применение: Пер. с англ. [Текст] / Под ред. Дж. Моудера, С. Элмаграби. – М.: Мир, 1981. – 677.

References

1. Feoktistov V. P., Prosvirov Y. E. *Elektricheskie zheleznye dorogi* (Electric railways). Moscow: MIIT, 2006. 269 p.
2. *Pokazateli ispol'zovaniya lokomotivov. Terminy i opredeleniya, GOST R 56046-2014*. (Indicators of the use of locomotives. Terms and definitions). Moscow: FGUP Standartinform, 2014. 24 p.
3. Smirnov V. A. Target indicators for assessing the quality of technological solutions for enterprises repairing rolling stock [Celevye pokazateli ocenki kachestva tekhnologicheskikh reshenij predpriyatij po remontu podvizhnogo sostava] *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka – Scientific problems of transport in Siberia and the Far East* / SGUVT. Novosibirsk, 2013. № 1 pp. 32 – 38.

4. *Energosberezhenie. Normativno-metodicheskoe obespechenie. Osnovnye polozheniya. GOST R 51387-99* (Energy saving. Normative and methodological support. Basic Provisions) / Moscow: GosStandart, 1999. 16 p.

5. Osipov S. I., Osipov S. S., Feoktistov V. P. *Teoriya ehlektricheskoy tyagi* (Theory of electric traction) / Moscow: Educational met. center at the railroad transport, 2006. 436 p.

6. *Obshchie tekhnicheskie trebovaniya, GOST R 55364-2012 Elektrovozy*. (Electric locomotives. General technical requirements). Moscow: Standardinform, 2013. 34 p.

7. *Elektromekhanicheskie pereklyuchateli, ispol'zuemye v ehlektronnoy apparature. Obshchie tekhnicheskie usloviya, GOST 28627-90 (IEC 1020-1-89)* (Electromechanical switches used in electronic equipment. General technical conditions). Moscow: Committee of the USSR for the management of product quality and standards, 1990. 45 p.

8. Muravyov D. V. Analysis of power losses in electromagnetic contactors of the MK type of electric locomotives of direct and alternating current. [Analiz poter' moshchnosti v ehlektromagnitnyh kontaktorah tipa MK ehlektrovozov postoyannogo i peremennogo toka]. *Transport Urala – Transport of the Urals*. USTU, 2016. No. 1 (48). pp. 46 – 52.

9. Shantarenko S. G., Kapustyan M. F., Supchinsky O. P. Quality of repair and energy efficiency of electric locomotives [Kachestvo remonta i ehnergoehffektivnost' ehlektrovozov]. *Vestnik RGUPS – Bulletin of RSTU*. Rostov-on-Don, 2015. №1 (57). pp. 46 – 52.

10. Shantarenko S. G., Kapustyan M. F., Obryvalin A. V. Estimation of power losses in the nodes of the crew part of electric locomotives [Ocenka poter' moshchnosti v uzlah ehkipazhnoj chasti ehlektrovozov]. *Izvestiya Transsiba – News of the Transsib*. OSTU, 2015. No. 3 (23) pp. 62 – 68.

11. Bocharov V. I. *Elektricheskie mashiny i transformatornoe oborudovanie ehlektrovozov* (Trunk electric locomotives. Electric machines and transformer equipment of electric locomotives). Moscow: Mashinostroenie, 1968. 444 p.

12. Brown R. Braun R. *Issledovanie operacij. Modeli i primeneniye* (Investigation of operations. Models and applications). Moscow: Mir, 1981. 677.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Супчинский Олег Павлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Преподаватель кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава».

Тел.: 8-908-105-24-16.

E-mail: sunchinyan@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Supchinsky Oleg Pavlovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Lecturer of chair «Technology of transport mechanical engineering and repair of a rolling stock».

Phone: 8-908-105-24-16.

E-mail: sunchinyan@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Супчинский, О. П. Потери мощности в узлах и агрегатах как показатель эффективности использования электровоза [Текст] / О. П. Супчинский // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. 2017. – № 4(32). – С. 35 – 44.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Supchinsky O. P. Losses power in knots and units as the indicator of efficiency of use the locomotive. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2017, vol. 32, no 4, pp. 35 – 44 (In Russian).

УДК 621.313: 621.7.08

В. В. Харламов, Д. И. Попов, А. П. Афонин

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА КОММУТАЦИИ В КОЛЛЕКТОРНЫХ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Аннотация. В статье приведены результаты экспериментальных исследований процесса коммутации в коллекторных тяговых двигателях постоянного тока. С целью распространения результатов испытаний двигателей малой мощности на тяговые двигатели электровозов, относящиеся к двигателям большой мощности, с помощью теории подобия и размерностей определены диапазоны варьирования параметров режима работы в процессе экспериментальных исследований. В результате проведенных исследований доказана эффективность применения параметров законов распределения интенсивности искрения для повышения достоверности испытаний двигателей как малой так и большой мощности.

Ключевые слова: тяговый двигатель постоянного тока, диагностические параметры, неидентичность коммутационных циклов, теория подобия и размерностей, среднеквадратическое отклонение интенсивности искрения.

Victor V. Kharlamov, Denis I. Popov, Alexander P. Afonin

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

EXPERIMENTAL RESEARCH OF COMMUTATION PROCESS IN TRACTION DC MOTORS OF ROLLING STOCK

Abstract. The article presents the results of experimental researches of process of commutation in traction DC motors. In order to generalize the results of tests of low power engines for electric locomotive's traction motors, belonging to high power engines, by using the theory of similarity and dimensions we defined the ranges of varying parameters of the operation mode in the experiments. In result of the conducted researches proved the effectiveness of the parameters of laws of distribution of intensity sparking to improve the reliability of the test as low power engines and high power engines.

Keywords: traction DC motor, diagnostic parameters, nonidentity of commuting cycles, theory of similarity and dimensions, standard deviation of intensity sparking.

Двигатели постоянного тока остаются широко востребованными в различных отраслях промышленности, особенно на транспорте [1], в частности, в качестве тяговых электродвигателей (ТЭД) на подвижном составе железных дорог.

Учитывая, что срок службы коллекторных электродвигателей достаточно велик, диагностирование их технического состояния в процессе эксплуатации является задачей, без которой невозможно обеспечение высоких показателей экономической эффективности работы отраслей, зависящих от двигателей данного типа.

Известно множество методик диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла, определяющего качество коммутационного процесса в коллекторных машинах [2 – 4]. Однако сложность настройки коммутации обусловлена значительными отклонениями конструктивных и технологических параметров электрических машин от их расчетных значений, что обуславливает неидентичность коммутационных циклов различных секций обмотки якоря. Особо остро проблема настройки коммутации проявляется в двигателях большой мощности, например, ТЭД подвижного состава железных дорог. При этом стоимость коммутационных испытаний электродвигателей значительно растет с

увеличением их мощности. Однако физические процессы, определяющие процесс коммутации в коллекторных двигателях, являются подобными при их различной номинальной мощности.

В связи с этим целесообразным с точки зрения экономии материальных ресурсов является испытание менее мощных двигателей и обобщение результатов испытаний на тяговые двигатели большой мощности. Такой подход применим с использованием теории подобия и размерностей [5].

Процесс коммутации, как известно, обусловлен как электромагнитными, так и механическими воздействиями на коллекторно-щеточный узел (КЩУ) [6].

Процесс коммутации с точки зрения электромагнитных взаимодействий в общем случае описывается следующей системой дифференциальных уравнений [7]:

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_1(t)}{dt} + \sum_k \left(M_k \frac{di_k(t)}{dt} \right) = \Delta u(J_{1 \text{ наб}}(t)) - \Delta u(J_{1 \text{ сб}}(t)) - i_1(t) R_{S1} - e_{\kappa 1}(t); \\ L_2 \frac{di_2(t)}{dt} + \sum_k \left(M_k \frac{di_k(t)}{dt} \right) = \Delta u(J_{2 \text{ наб}}(t)) - \Delta u(J_{2 \text{ сб}}(t)) - i_2(t) R_{S2} - e_{\kappa 2}(t); \\ \dots \\ L_n \frac{di_n(t)}{dt} + \sum_k \left(M_k \frac{di_k(t)}{dt} \right) = \Delta u(J_{n \text{ наб}}(t)) - \Delta u(J_{n \text{ сб}}(t)) - i_n(t) R_{Sn} - e_{\kappa n}(t), \end{cases} \quad (1)$$

где $e_L = -L \frac{di(t)}{dt}$ – ЭДС самоиндукции;

$e_M = -\sum_k \left(M_k \frac{di_k(t)}{dt} \right)$ – ЭДС взаимной индукции;

$\Delta u(J_{\text{наб}}(t))$ и $\Delta u(J_{\text{сб}}(t))$ – переходные падения напряжения под набегающим и сбегающим краями щетки;

R_S – сопротивление коммутируемой секции;

$e_{\kappa}(t)$ – коммутационная ЭДС, которая наводится в секции при ее взаимодействии с магнитным полем в зоне коммутации.

Механические воздействия на щетку могут приводить к разрыву ее контакта с коллектором и тем самым сокращать длительность периода коммутации, обуславливая возникновение тока разрыва и коммутационного искрения [8]. Движение щетки в щеткодержателе без учета угловых перемещений определяется следующей системой уравнений движения [9]:

$$\begin{cases} \sum_i (F_{pi}(t)) = m_{\text{щ}} \frac{dV_{px}(t)}{dt}; \\ \sum_i (F_{\tau i}(t)) = m_{\text{щ}} \frac{dV_{\tau y}(t)}{dt}, \end{cases} \quad (2)$$

где $\sum_i (F_{pi}(t))$, $\sum_i (F_{\tau i}(t))$ – суммы радиальных и тангенциальных сил, приложенных к щетке;

$\frac{dV_{px}(t)}{dt}$, $\frac{dV_{\tau y}(t)}{dt}$ – радиальное и тангенциальное ускорение щетки;

$m_{\text{щ}}$ – масса щетки.

Следовательно, среди факторов, определяющих искрение под электрическими щетками в машинах постоянного тока, могут быть выделены следующие параметры, фигурирующие в

системах уравнений (1) и (2): ширина щетки $b_{щ}$, частота вращения якоря n , ток параллельной ветви якоря i_a , падение напряжения в щеточном контакте $\Delta U_{щ}$, масса щетки $m_{щ}$.

Численные значения основных параметров, определяющих процесс коммутации для рассматриваемых электрических машин, представлены в таблице 1, где плотность материала щетки обозначена $\rho_{щ}$.

Таблица 1 – Параметры электродвигателей, определяющие процесс коммутации

Наименование параметра	Тип электродвигателя		Размерность
	ЭДП800	2П	
Ширина щетки $b_{щ}$, м	20	8	$[L]^1$
Частота вращения якоря n , об/мин	770	1500	$[T]^{-1}$
Ток параллельной ветви обмотки якоря i_a , А	90	3,25	$[A]^1$
Падение напряжения в щеточном контакте $\Delta U_{щ}$, В	Определяется типом щетки		$[L]^1 \cdot [M]^2 \cdot [T]^{-3} \cdot [A]^{-1}$
Масса щетки $m_{щ}$, кг	$24,8\rho_{щ}$	$2\rho_{щ}$	$[M]$

Число участвующих в процессе параметров равно пяти. Получим критерий подобия, определяющий процесс коммутации, для чего запишем следующую функциональную зависимость:

$$F(b_{щ}, n, i_a, \Delta U_{щ}, m_{щ}) = 0. \quad (3)$$

Определим критерии подобия классическим способом, основанным на π -теореме [1]. Обозначим критерии подобия через π_m , и запишем:

$$\pi_m = [b_{щ}]^{z_1} \cdot [n]^{z_2} \cdot [i_a]^{z_3} \cdot [\Delta U_{щ}]^{z_4} \cdot [m_{щ}]^{z_5}. \quad (4)$$

В данном математическом выражении показатели степеней $z_1, z_2, \dots, z_5$ должны быть определены так, чтобы размерность π стала равной нулю.

Подставим размерности параметров, выраженные через первичные единицы измерений, и получим:

$$\begin{aligned} \pi_m = \{[L]^{\alpha_1} \cdot [M]^{\beta_1} \cdot [T]^{\gamma_1} \cdot [A]^{\delta_1}\}^{z_1} \cdot \{[L]^{\alpha_2} \cdot [M]^{\beta_2} \cdot [T]^{\gamma_2} \cdot [A]^{\delta_2}\}^{z_2} \times \dots \\ \dots \times \{[L]^{\alpha_3} \cdot [M]^{\beta_3} \cdot [T]^{\gamma_3} \cdot [A]^{\delta_3}\}^{z_3} \cdot \{[L]^{\alpha_4} \cdot [M]^{\beta_4} \cdot [T]^{\gamma_4} \cdot [A]^{\delta_4}\}^{z_4} \times \dots \\ \dots \times \{[L]^{\alpha_5} \cdot [M]^{\beta_5} \cdot [T]^{\gamma_5} \cdot [A]^{\delta_5}\}^{z_5}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – показатели степени при единицах измерения длины, массы, времени и силы тока соответственно.

Значения показателей степеней $z_1, z_2, \dots, z_5$ определим из решения следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} \alpha_1 \cdot z_1 + \alpha_2 \cdot z_2 + \alpha_3 \cdot z_3 + \alpha_4 \cdot z_4 + \alpha_5 \cdot z_5 = 0; \\ \beta_1 \cdot z_1 + \beta_2 \cdot z_2 + \beta_3 \cdot z_3 + \beta_4 \cdot z_4 + \beta_5 \cdot z_5 = 0; \\ \gamma_1 \cdot z_1 + \gamma_2 \cdot z_2 + \gamma_3 \cdot z_3 + \gamma_4 \cdot z_4 + \gamma_5 \cdot z_5 = 0; \\ \delta_1 \cdot z_1 + \delta_2 \cdot z_2 + \delta_3 \cdot z_3 + \delta_4 \cdot z_4 + \delta_5 \cdot z_5 = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Получим критерий подобия, предварительно сведя все необходимые данные для решения системы уравнений (6) в таблице 2.

Таблица 2 – Размерности параметров, определяющих процесс коммутации

Параметр	Показатель степени			
	[L]	[M]	[T]	[A]
$b_{\text{щ}}$	$\alpha_1 = 1$	$\beta_1 = 0$	$\gamma_1 = 0$	$\delta_1 = 0$
n	$\alpha_2 = 0$	$\beta_2 = 0$	$\gamma_2 = -1$	$\delta_2 = 0$
i_a	$\alpha_3 = 0$	$\beta_3 = 0$	$\gamma_3 = 0$	$\delta_3 = 1$
$\Delta U_{\text{щ}}$	$\alpha_4 = 1$	$\beta_4 = 2$	$\gamma_4 = -3$	$\delta_4 = -1$
$m_{\text{щ}}$	$\alpha_5 = 0$	$\beta_5 = 1$	$\gamma_5 = 0$	$\delta_5 = 0$

С учетом подставленных значений система уравнений примет вид:

$$\begin{cases} z_1 + z_4 = 0; \\ 2z_4 + z_5 = 0; \\ -z_2 - 3z_4 = 0; \\ z_3 - z_4 = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Система из четырех независимых уравнений и пяти неизвестных имеет бесконечно большое множество решений. В таком случае принимаем одну из неизвестных величин произвольно, а остальные определяем из системы уравнений (7). Для $z_1 = 1$ имеем: $z_2 = 3$, $z_3 = -1$, $z_4 = -1$, $z_5 = 2$.

Из полученного решения сформируем критерий подобия:

$$\pi_m = b_{\text{щ}}^1 \cdot n^3 \cdot i_a^{-1} \cdot \Delta U_{\text{щ}}^{-1} \cdot m_{\text{щ}}^2. \quad (8)$$

Величины, относящиеся к натурному объекту (тяговый электродвигатель ЭДП800 электровоза 2ЭС6) и замещающей его модели (испытываемый двигатель типа 2П), обозначим далее индексами «н» и «м» соответственно. Исходя из того, что критерий подобия одинаков для натурной и модельной машин, можно записать:

$$\frac{\pi_{1m}}{\pi_{1n}} = \frac{b_{\text{щм}} \cdot n_{\text{м}}^3 \cdot M_{\text{щм}}^2 \cdot i_{a\text{н}} \cdot \Delta U_{\text{щн}}}{i_{a\text{м}} \cdot \Delta U_{\text{щм}} \cdot b_{\text{щн}} \cdot n_{\text{н}}^3 \cdot m_{\text{щн}}^2}, \quad (9)$$

$$\frac{\pi_{1m}}{\pi_{1n}} = \frac{b_{\text{щс}} \cdot n_{\text{с}}^3 \cdot m_{\text{щс}}^2}{i_{a\text{с}} \cdot \Delta U_{\text{щс}}}, \quad (10)$$

где $b_{\text{щс}}, n_{\text{с}}, i_{a\text{с}}, \Delta U_{\text{щс}}, m_{\text{щс}}$ – отношения одноименных параметров рассматриваемой системы.

Запишем индикатор подобия для полученного критерия:

$$\frac{b_{\text{щс}} \cdot n_{\text{с}}^3 \cdot m_{\text{щс}}^2}{i_{a\text{с}} \cdot \Delta U_{\text{щс}}} = 1. \quad (11)$$

Для определения в экспериментальных исследованиях интервалов варьирования величин частоты вращения и тока якоря справедливо следующее:

$$\frac{\Delta U_{\text{щм}}}{\Delta U_{\text{щн}}} \cdot \frac{b_{\text{щн}}}{b_{\text{щм}}} \cdot \left(\frac{m_{\text{щн}}}{m_{\text{щм}}} \right)^2 \cdot \frac{n_{\text{н}}^3}{i_{\text{ан}}} \in \frac{(k_n \cdot n_{\text{м}})^3}{k_i \cdot i_{\text{ам}}}, \quad (12)$$

где k_n и k_i – интервалы варьирования частоты вращения и тока якоря соответственно, выраженные в относительных единицах.

$$\frac{\Delta U_{\text{щм}}}{\Delta U_{\text{щн}}} \cdot \frac{b_{\text{щн}}}{b_{\text{щм}}} \cdot \left(\frac{m_{\text{щн}}}{m_{\text{щм}}} \right)^2 \cdot \left(\frac{n_{\text{н}}}{n_{\text{м}}} \right)^3 \cdot \frac{i_{\text{ам}}}{i_{\text{ан}}} \in \frac{k_n^3}{k_i}. \quad (13)$$

Подставим в выражение (13) номинальные параметры модельной и натурной машин:

$$1 \cdot \frac{20}{8} \cdot \left(\frac{24,8}{2} \right)^2 \cdot \left(\frac{770}{1500} \right)^3 \cdot \frac{3,25}{90} = 1,878 \in \frac{k_n^3}{k_i}. \quad (14)$$

Таким образом, коммутационный процесс в рассматриваемых машинах можно считать подобным, если величина 1,878 принадлежит интервалу значений, полученному из отношения $\frac{k_n^3}{k_i}$. Для параметров, отличных от номинальных, данная величина будет отклоняться от полученного значения (т. е. 1,878).

Возможные интервалы варьирования частоты вращения и тока якоря модельной машины при испытаниях и соответствующий им диапазон k_n^3/k_i приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Соответствие интервалов варьирования частоты вращения и тока якоря модельной машины критерию подобия

Интервал варьирования (в процентах от $n_{\text{н}}$ и $I_{\text{ан}}$)		Диапазон значений отношения k_n^3/k_i	Выполнение соотношения $1,878 \in k_n^3/k_i$
n	I_a		
$\pm 10\%$	$\pm 10\%$	$0,656 \div 1,464$	Не выполняется
$\pm 20\%$	$\pm 20\%$	$0,410 \div 2,074$	Выполняется
$\pm 10\%$	$\pm 50\%$	$0,365 \div 1,997$	Выполняется

Анализ данных, представленных в таблице 3, показывает, что, например, выбор интервалов варьирования n более $\pm 10\%$ и I_a более $\pm 50\%$ позволяет охватить режим работы натурной машины, соответствующий номинальному.

Следует отметить, что чем больший диапазон варьирования принимается, тем больше информации о коммутационном процессе в различных режимах будет получено в планируемом эксперименте. Однако границы диапазона варьирования следует ограничивать допустимой степенью искрения в испытуемой машине.

Для проведения экспериментальных исследований собрана экспериментальная установка (рисунок 1), состоящая из двух однопольных машин постоянного тока с независимым возбуждением, одна из которых работает в режиме двигателя, другая – в режиме генератора, подключенного к активной нагрузке $R_{\text{н}}$.

В процессе эксперимента изменялись и записывались показания следующих входных параметров: установившийся ток якоря I_a , задаваемый с помощью нагрузочного реостата; величина нарастания (спада) тока якоря ΔI_a , обусловленная мгновенным подключением или отключением части нагрузки; ток подпитки (отпитки) добавочных полюсов I_Π (I_o); частота вращения n .

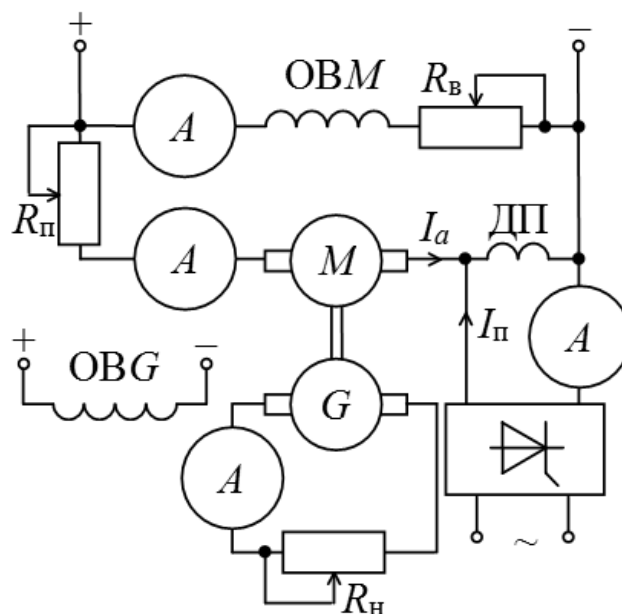


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

В качестве выходных приняты следующие параметры закона распределения случайной величины – интенсивности искрения от пере- и недокоммутированных секций, которые рассчитывались, после записи в ЭВМ:

- среднее значение интенсивности искрения $I_{ср}$;
- среднеквадратические отклонения интенсивности искрения по коллектору σ_k ;
- среднеквадратические отклонения интенсивности искрения во времени σ_v .

Для проведения более полного анализа было решено выполнить эксперименты для переходного и установившегося режимов работы двигателя с подпиткой и отпиткой добавочных полюсов.

На основании априорной информации (номинальных величин задействованных в испытаниях машин) и данных таблицы 3 были выбраны основные уровни и интервалы варьирования факторов:

для I_Π основной уровень – 2,25 А, интервал варьирования – 0,75 А, верхний уровень – 3 А, нижний уровень – 1,5 А;

для I_o основной уровень – 2,5 А, интервал варьирования – 0,5 А, верхний уровень – 3 А, нижний уровень – 2 А;

для ΔI_a основной уровень – 0 А, интервал варьирования – 5 А, верхний уровень – 10 А, нижний уровень – (-10 А);

для I_a основной уровень – 7 А, интервал варьирования – 5 А, верхний уровень – 12 А, нижний уровень – 2 А;

для n основной уровень – 1750 об/мин, интервал варьирования – 250 об/мин, верхний уровень – 2000 об/мин, нижний уровень – 1500 об/мин.

В результате обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессии [10], которые подтвердили, что повышение информативности диагностического процесса возможно за счет введения в процесс диагностирования параметров, характеризующих закон распределения интенсивности искрения, таких как СКО интенсивности искрения по коллектору (σ_k) и СКО интенсивности искрения во времени (σ_b).

Относительно высокая информативность параметров σ_k и σ_b иллюстрируется полученными на основании регрессионных уравнений графиками, приведенными на рисунке 2, для стационарного режима при фиксированном значении x_1 . На рисунке 2 приняты следующие обозначения x_1 – ток подпитки (отпитки) обмотки добавочных полюсов I_{Π} (I_0), x_2 – ток якоря I_a , x_3 – частота вращения n , y_1 – интенсивность искрения, y_2 – СКО интенсивности искрения во времени и y_3 – СКО интенсивности искрения по коллектору. Анализ результатов экспериментальных исследований показывает, что в определенных случаях СКО интенсивности искрения по коллектору σ_k и СКО интенсивности искрения во времени σ_b могут быть более чувствительны к изменению параметров режима работы (x_2 и x_3) (рисунок 2, б, в), чем средняя интенсивность искрения (рисунок 2, а).

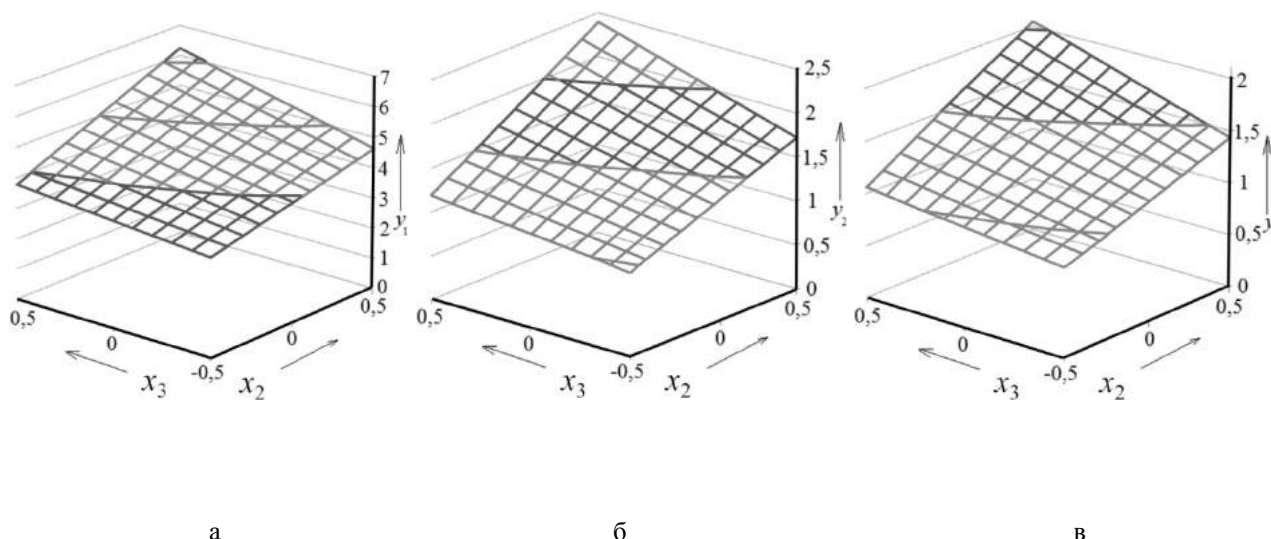


Рисунок 2 – Результаты моделирования для стационарного режима

Таким образом, применение положений теории подобия и размерностей позволило получить необходимый диапазон испытаний для двигателей малой мощности для дальнейшего распространения полученных выводов на двигатели большой мощности, такие как тяговые двигатели подвижного состава железных дорог.

Испытания показали, что как для двигателей малой мощности, так и для двигателей большой мощности возможно повышение информативности диагностического процесса за счет введения в процесс диагностирования таких параметров, как СКО интенсивности искрения по коллектору (σ_k) и СКО интенсивности искрения во времени (σ_b).

Список литературы

1. Игнатович, В. М. Электрические машины и трансформаторы [Текст] / В. М. Игнатович, Ш. С. Ройз. – М.: Юрайт, 2018. – 181 с.

2. Авилов, В. Д. Методы анализа и настройки коммутации машин постоянного тока: Монография [Текст] / В. Д. Авилов. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 237 с.
3. Харламов, В. В. Методы и средства диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей и других коллекторных машин постоянного тока: Монография [Текст] / В. В. Харламов / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2002. – 233 с.
4. Миронов, А. А. Автоматизированный анализ степени искрения отдельных коллекторных пластин коллекторных электрических машин / А. А. Миронов, Р. Х. Сайфутдинов // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2015. – № 1 – 2. – С. 98 – 100.
5. Веников, В. А. Теория подобия и моделирования [Текст] / В. А. Веников. – М.: Высшая школа, 1976. – 479 с.
6. Копылов, И. П. Электрические машины: учебник для академического бакалавриата [Текст] / И. П. Копылов. – М.: Юрайт, 2015. – 674 с.
7. Авилов, В. Д. Оптимизация коммутационного процесса в коллекторных электрических машинах постоянного тока: Монография [Текст] / В. Д. Авилов / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2013. – 356 с.
8. Харламов, В. В. Оценка влияния профиля коллектора машины постоянного тока на работу скользящего контакта [Текст] / В. В. Харламов, Д. И. Попов, М. Ф. Байсадыков // Омский научный вестник. – 2016. – № 4 (148). – С. 62 – 65.
9. Никитенко, Г. В. Электропривод производственных механизмов: Учебное пособие [Текст] / Г. В. Никитенко. – СПб: Лань, 2013. – 224 с.
10. Повышение достоверности диагностирования коллекторно-щеточного узла электрических машин с учетом неидентичности коммутационных циклов [Текст] / В. В. Харламов, Д. И. Попов и др. // Омский научный вестник. – 2016. – №4 (148). – С. 65 – 69.

References

1. Ignatovich V. M. *Elektricheskie mashiny i transformatory* (Electrical machines and transformers). Moscow: Urait, 2018, 181 p.
2. Avilov V. D. *Metody analiza i nastrojki kommutacii mashin postoyannogo toka* (Methods of analysis and adjustment of commutation in DC machines). Moscow: Energoatomizdat, 1995, 237 p.
3. Kharlamov V. V. *Metody i sredstva diagnostirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya kollektorno-shchetochного узла тяговых электродвигателей и других коллекторных машин постоянного тока* (Methods and means of diagnosing the technical condition of collector and brush unit of traction electric motors and other collector DC machines). Omsk, 2002, 233 p.
4. Mironov A. A. The Automated Sparking Analysis of the Individual Commutator Bars of Commutator Machines [Avtomatizirovannyj analiz stepeni iskreniya ot del'nykh kollektornykh plastin kollektornykh ehlektricheskikh mashin] / *Transport Aziatsko-Tihookeanskogo regiona – Pasific Rim countries transportation system*, 2015, no. 1 (2, 3). pp. 98 – 100.
5. Venikov V. A. *Teoriya podobija i modelirovanija* (Theory of similarity and modeling). Moscow: Vysshaja shkola, 1976, 479 p.
6. Kopylov I. P. *Elektricheskie mashiny* (Electrical machines). Moscow: Urait, 2015, 674 p.
7. Avilov V. D. *Optimizaciya kommutacionnogo processa v kollektornykh ehlektricheskikh mashinah postoyannogo toka* (Optimization of commutation process in the collector electric DC machines). Omsk, 2013, 356 p.
8. Kharlamov V. V., Popov D. I., Baysadykov M. F. The impact of the DC machine profile collector on work of sliding contact [Ocenka vliyaniya profilya kollektora mashiny postoyannogo toka]

na rabotu skol'zyashchego kontakta] / *Omskij nauchnyi vestnik – Omsk scientific bulletin*, 2016, no. (148). pp. 62 – 65.

9. Nikitenko G. V. Elektroprivod proizvodstvennyh mekhanizmov (Electric drive of industrial mechanisms). Saint-Petersburg: Lan, 2013, 224 p.

10. Kharlamov V. V., Popov D. I., Afonin A. P., Ognevsky A. S. Increase the reliability of diagnosing of collector-brush unit of the electric machines under the condition of identical switching cycles [Povyshenie dostovernosti diagnostirovaniya kollektorno-shchetchnogo uzla ehlektricheskikh mashin s uchetom neidentichnosti kommutatsionnykh tsiklov] / *Omskij nauchnyi vestnik – Omsk scientific bulletin*, 2016, no. (148). pp. 65 – 69.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Харламов Виктор Васильевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru

Попов Денис Игоревич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: Popovomsk@yandex.ru

Афонин Александр Петрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Соискатель по кафедре «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

E-mail: mainsat@ya.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Харламов, В. В. Экспериментальные исследования процесса коммутации в коллекторных тяговых двигателях подвижного состава [Текст] / В. В. Харламов, Д. И. Попов, А. П. Афонин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 4(32). – С. 45 – 53.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kharlamov Victor Vasilyevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor of technical science, professor, the head of the department «Electrical machines and general electrical engineering», OSTU.

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

E-mail: emoe@omgups.ru

Popov Denis Igorevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

PhD, associate professor, associate professor of the department «Electrical machines and general electrical engineering», OSTU.

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

E-mail: Popovomsk@yandex.ru

Afonin Alexander Petrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Applicant of the department «Electrical machines and general electrical engineering».

E-mail: mainsat@ya.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Supchinsky O. P. Losses power in knots and units as the indicator of efficiency of use the locomotive. Journal of Transsib Railway Studies, 2017, vol. 32, no 4, pp. 45 – 53 (In Russian).

УДК 621.316.12:621.332.3

А. Б. Батрашов

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

СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В КОНТАКТНЫХ ПОДВЕСКАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Аннотация. Контактная подвеска является линией электропередач особого рода с множественными электрическими соединениями проводов, которые образуют сложную топологию линейной электрической цепи. Аналитические модели расчета упрощают реальную топологию контактной подвески, что ограничивает их функциональное применение. Учет топологических особенностей возможен при использовании средств компьютерного моделирования, что влечет за собой усложнение расчетных алгоритмов моделей. Целью проведенного исследования являлось определение условий применения моделей токораспределения и перспективы развития в этой области. В статье рассмотрены существующие модели расчета токораспределения в контактных подвесках постоянного тока: модель естественного токораспределения, линейные аналитические модели, модель с бесконечным числом струн, модели с непосредственным применением законов Кирхгофа в матричном виде, конечно-элементная модель. Изложены основные положения и описаны расчетные возможности каждой модели. Сравнение расчетных моделей производилось для контактной подвески постоянного тока КС-250-3, предназначенной для высокоскоростного движения. Результаты работы могут использоваться для выбора оптимальной расчетной модели токораспределения при проектировании контактной подвески, тепловом анализе, расчете токонесущей способности, выявлении и устранении «узких мест» в контактной сети.

Ключевые слова: токораспределение, контактная подвеска, постоянный ток, метод конечных элементов, средняя анкеровка, распределение температуры, транзит тягового тока, проход токоприемника

Andrey B. Batrashov

Ural State University of Railway Transport (USURT), Yekaterinburg, the Russian Federation

COMPARISON OF MODELS OF CURRENT DISTRIBUTION IN DC CONTACT LINES

Abstract. The contact line is a special kind of power overhead line with multiple electrical connections of wires, which form a complex topology of the linear electrical circuit. Analytical models simplify the real topology of the contact line and it limits their functional application. It is possible to take into account the topology of contact line when using tools of computer simulation, but it entails complicating the computational algorithms of the model. The aim of this article is to determine the conditions for the application of current distribution models and the development prospects in this area. The article describes the existing models for calculating the current distribution in DC contact line: a model of natural current distribution, linear analytical models, model with an infinite number of droppers, a model with a direct application of Kirchhoff's circuit laws in matrix form, and a finite element model. The article contains the main provisions and calculation capabilities of each model. Contact line KS-250-3 acts as a calculation catenary for the comparison of current distribution models. You can use the results of the article to select the optimal design distribution model for the design of the contact line, thermal analysis, current-carrying capacity calculation, identification and elimination of «weak point».

Keywords: current distribution, contact line, direct current, finite element method, midpoint anchoring, temperature distribution, transit traction current, passage of pantograph.

Планируемое повышение нагрузки на систему тягового электроснабжения связано прежде всего с целями по увеличению объема перевозок в соответствии со стратегией развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года [1]. Значительная доля (порядка 43 %) электрифицированных железных дорог, а в том числе и по основным направлениям перевозок, работает на системе постоянного тока. Часть участков, электрифицированных на

постоянном токе, являются лимитирующими, и ликвидация «узких мест» в контактной подвеске на этих участках является неотъемлемой задачей для достижения поставленных целей. Кроме того, система тягового электроснабжения постоянного тока имеет перспективу развития и модернизации как наиболее экономически эффективная [2 – 4].

Проектирование большинства существующих контактных подвесок производилось без учета топологических особенностей контактной сети из-за ограниченности расчетных моделей. Современные модели токораспределения позволяют оценить допущения, принятые при проектировании существующих контактных подвесок, и учитывать полученные результаты в эксплуатации и при модернизации участков контактной сети.

Цепная контактная подвеска, как линия электропередач особого типа, имеет множественные электрические узлы и соединения, топология которых определяет характер токораспределения в проводах контактной сети при транзите тягового тока и токосъеме. Так, решения, направленные на повышение механических характеристик контактной подвески, например, снижение неравномерности эластичности путем добавления рессорного троса (РТ), приводит к увеличению неравномерности распределения токовой нагрузки в проводах контактной подвески. Из этого следует, что токонесущая способность контактной подвески определяется тем проводом, температура которого достигает своего предельного значения при заданном токе транзита или токосъема, в то время как остальные провода могут быть загружены не полностью. Одной из главных задач расчета токораспределения является проверка соответствия токонесущей способности проводов их токовой нагрузке при эксплуатации.

Производство проводов контактной подвески прокаткой или волочением сопровождается уменьшением размеров зерен металла при пластической деформации катанки, проходящей через клетки стана или фильеры, что способствует увеличению временного сопротивления на разрыв проводов [5]. Таким образом, эксплуатационная прочность проводов определяется степенью их упрочнения при холодной деформации в процессе производства и достижение температуры интенсивной рекристаллизации проводом или его частью приводит к значительному снижению временного сопротивления на разрыв и обрыву провода в месте его перегрева над предельно допустимой температурой. Поэтому актуальной является задача теплового анализа контактных подвесок на основании расчета токораспределения, который позволяет выделить «узкие места» с точки зрения нагрева в существующих контактных подвесках и учитывать их при проектировании новых.

В данной статье произведен сравнительный анализ методик расчета токораспределения в контактной подвеске постоянного тока.

Математические модели токораспределения в контактных подвесках постоянного тока.

1. Достаточно простым способом определения токораспределения в продольных проводах контактной сети является расчет, основанный на допущении о естественном распределении тока между контактным (КП), несущим (НТ) и усиливающими (УП) проводами обратно пропорционально их сопротивлению. Ток в проводе в таком случае рассчитывается по формуле

$$I_i = \frac{I_{\Sigma\text{КП}} \cdot R_{\Sigma\text{КП}}}{R_i} = n_i \cdot I_{\Sigma\text{КП}} \quad (1)$$

где i – индекс, соответствующий КП, НТ или УП; I_i – ток в i -м проводе; R_i – удельное погонное сопротивление i -го провода, Ом/м; $I_{\Sigma\text{КП}}$ – длительно допустимый ток контактной

подвески, А; $R_{\Sigma\text{КП}}$ – удельное погонное сопротивление контактной подвески, Ом/м; n_i – доля тока в i -м проводе контактной подвески от общего тока подвески.

Удельное сопротивление контактной подвески рассчитывается как для параллельно соединенных проводников. Длительно допустимый ток контактной подвески определяется ограничивающим проводом, т. е. проводом, который первым достигает своего длительно допустимого тока, ограниченного температурой нагрева.

При данном подходе поперечные электросоединители (ПС), струны, рессорный трос (РТ), средняя анкеровка (СА) учтены быть не могут. В реальности картина токораспределения в зависимости от топологии и геометрии контактной сети может существенно отличаться от естественного токораспределения.

Следует отметить, что при нагреве проводов с различным температурным коэффициентом электрического сопротивления, либо до различной температуры, либо и то и другое одновременно, изменится токораспределение в контактной сети в зависимости от температуры ее проводов. Так как в контактных подвесках применяются провода, отличающиеся по форме (фасонные, многопроволочные), диаметру, материалу (медь, бронза, алюминий, биметалл), то коэффициенты конвективного охлаждения и лучеиспускания также будут различны. Вследствие движения нагрузки нагрев проводов неравномерен по длине и времени. Из этого можно сделать вывод о том, что доля тока в проводе не детерминирована только лишь топологией соединения проводов, а зависит от таких факторов, как место приложения нагрузки, величина тока, скорость движения электроподвижного состава (ЭПС), форма проводов, степень загрязнения поверхности провода и т. п.

2. Оценка эффективной нагрузки на КП для выбора расположения поперечных электросоединителей рассматривается К. Г. Марквардтом в работе [6] на основании методики, предложенной А. В. Ворониным [7]. Данный подход не учитывает струны, а также предполагает, что сопротивление электросоединителей равно нулю. При расчете предполагается, что контактная сеть представляется двумя проводами: контактным проводом с удельным погонным сопротивлением $r_{\text{КП}}$, Ом/м, и эквивалентным проводом с удельным погонным сопротивлением $r_{\text{Т}}$, Ом/м, включающим в себя НТ и параллельные ему УП (рисунок 1). При двустороннем питании ток между подстанциями распределяется обратно пропорционально расстоянию от нагрузки до соответствующей подстанции. Токораспределение в продольных проводах до поперечных электросоединителей C_n и C_{n+1} определяется аналогично первому случаю, и доля тока в проводе обратно пропорциональна удельному погонному сопротивлению провода. Так как считается, что l_n значительно меньше, чем l_0 , то изменением l_1 при проходе токоприемника по участку, ограниченному двумя поперечными электросоединителями (УОС), пренебрегают. Таким образом, при расчете прохода токоприемника по УОС считают, что распределение токов между подстанциями не нарушается.

Ток I_1 на участке между узловыми точками C_n и C_{n+1} можно разложить обратно пропорционально расстояниям от этих точек до нагрузки. В результате математических преобразований формула для расчета тока $I_{\text{кС}n}$ имеет вид:

$$I_{\text{кС}n} = \frac{1}{r_{\text{КП}} + r_{\text{Т}}} \cdot \left[I_{\Phi} \cdot r_{\text{Т}} + I_1 \cdot \frac{r_{\text{КП}} \cdot (l_n - x)}{l_n} \right]. \quad (2)$$

Данная линейная аналитическая модель специально предназначена для выбора расположения ПС в подвеске, поэтому описывает ток в КП при проходе токоприемника по УОС. Модель нуждается в доработке для анализа токораспределения в других проводах контактной сети.

3. Аспирантом МИИТа К. Л. Костюченко была доработана методика расчета токораспределения на УОС при проходе ЭПС с учетом УП [8] при аналогичных допущениях, что сопротивления ПС равны нулю, а ток электровоза на этом участке постоянен и не зависит от координаты и времени (рисунок 2). Этим исследователем получены уравнения (3) – (8).

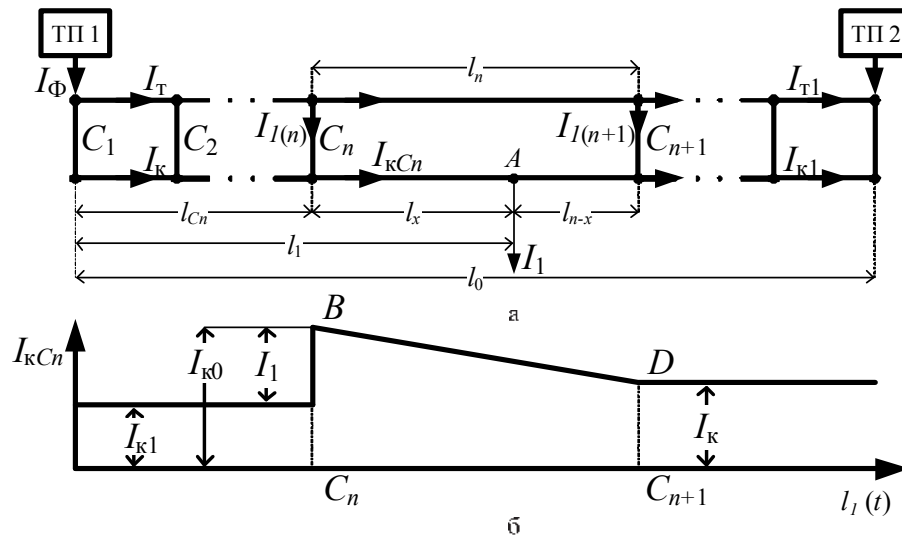


Рисунок 1 – Расчетная схема распределения тока в проводах по А. В. Воронину: а – схема токораспределения; б – график тока в контактном проводе от времени;

ТП 1, ТП 2 – тяговые подстанции; C_1, C_2, C_n, C_{n+1} – ПС; А – местоположение токоприемника ЭПС; I_Φ – ток фидера подстанции ТП 1, А; I_T – ток в эквивалентном проводе, А; I_K – ток в КП до C_n , А; I_{KCn} – ток в КП от C_n до ЭПС, А; I_1 – ток ЭПС, А; l_{Cn} – расстояние от подстанции ТП 1 до C_n , м; l_1 – расстояние от подстанции до ЭПС, м; l_0 – длина межподстанционной зоны, м; x – расстояние от C_n до ЭПС, м; l_{n-x} – расстояние от ЭПС до C_{n+1} , м; l_n – расстояние между C_n и C_{n+1} , м

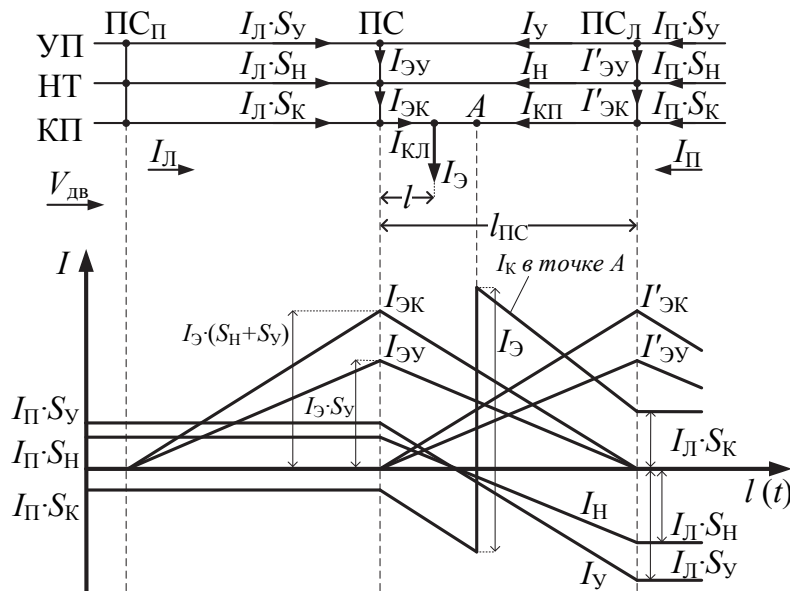


Рисунок 2 – Расчетная схема токораспределения в проводах на УОС по К. Л. Костюченко: S_K, S_H, S_Y – доли сечений КП, НТ и УП в общем сечении подвески (в медном эквиваленте); I_L, I_P – ток от левой и правой тяговых подстанций, А; $I_{Эу}, I'_{Эу}$ – ток в электросоединителях от УП, А; $I_{ЭК}, I'_{ЭК}$ – ток в электросоединителях к КП, А; I_K, I_H, I_Y – ток в КП, НТ и УП, А; $I_{КЛ}$ – ток в КП слева от ЭПС, А; $I_{КП}$ – ток в КП справа от ЭПС, А

$$I_{\text{ЭВ}} = I_{\text{Э}} \cdot s_{\text{В}} \cdot (1 - L / L_{\text{ПС}}); \quad (3)$$

$$I_{\text{ЭК}} = I_{\text{Э}} \cdot (s_{\text{В}} + s_{\text{Н}}) \cdot (1 - L / L_{\text{ПС}}); \quad (4)$$

$$I_{\text{КЛ}} = I_{\text{Э}} \cdot (s_{\text{В}} + s_{\text{Н}}) \cdot (1 - L / L_{\text{ПС}}) + I_{\text{Э}} \cdot s_{\text{В}} \cdot (1 - L_{\text{Э}} / L_{\text{ТП}}); \quad (5)$$

$$I_{\text{КП}} = I_{\text{Э}} \cdot (s_{\text{В}} + s_{\text{Н}}) \cdot L / L_{\text{ПС}} + I_{\text{Э}} \cdot s_{\text{К}} \cdot L_{\text{Э}} / L_{\text{ТП}}; \quad (6)$$

$$I_{\text{В}} = I_{\text{Э}} \cdot s_{\text{В}} \cdot (L_{\text{Э}} / L_{\text{ТП}} - L / L_{\text{ПС}}); \quad (7)$$

$$I_{\text{Н}} = I_{\text{Э}} \cdot s_{\text{Н}} \cdot (L_{\text{Э}} / L_{\text{ТП}} - L / L_{\text{ПС}}), \quad (8)$$

где L – расстояние от ЭПС до расчетного ПС, м; $L_{\text{ПС}}$ – расстояние между соседними ПС, м; $L_{\text{Э}}$ – удаленность рассматриваемого УОС от тяговой подстанции, находящейся слева, м; $L_{\text{ТП}}$ – расстояние между тяговыми подстанциями, м.

Методика К. Л. Костюченко достаточно точно описывает токораспределение в усиливающем проводе, но реальная картина токораспределения на УОС в НТ и КП будет существенно отличаться из-за струн, СА и РТ.

4. Модель с бесконечным числом струн приведена в источнике [9] (рисунок 3). Согласно модели все соединения НТ и КП контактной подвески выражаются через приведенное поперечное сопротивление $r_{\text{с}}$, Ом·м, которое рассчитывается по формуле

$$r_{\text{с}} = \frac{L}{\sum G_i \cdot n_i}, \quad (9)$$

где G_i – проводимость поперечных электропроводящих элементов (струны, ПС, СА, и т. п.); n_i – количество рассматриваемых однотипных элементов на расчетном участке; L – длина расчетного участка, м.

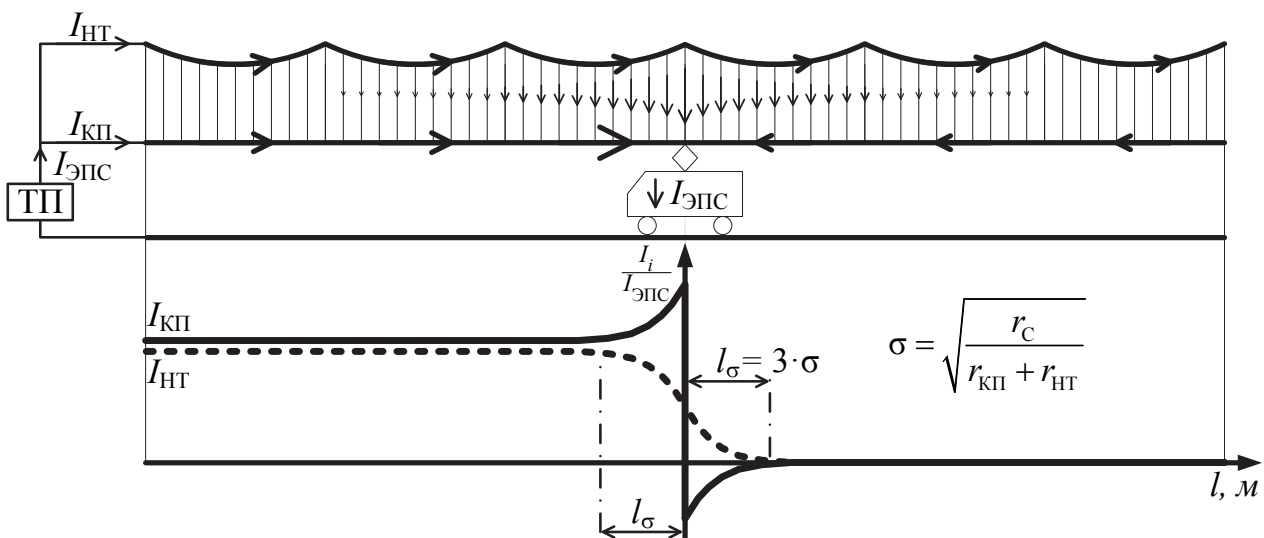


Рисунок 3 – Аналитическая модель токораспределения

Токораспределение до точки токосъема (ТТС) описывается следующими уравнениями:

$$I_{\text{HT}}^{\text{ТТС}} = \frac{r_{\text{КП}} \cdot I_{\text{ЭПС}}}{r_{\text{КП}} + r_{\text{HT}}} \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \cdot e^{-l \cdot \sqrt{\frac{r_{\text{КП}} + r_{\text{HT}}}{r_c}}} \right); \quad (10)$$

$$I_{\text{КП}}^{\text{ТТС}} = I_{\text{ЭПС}} - I_{\text{HT}}^{\text{ТТС}}, \quad (11)$$

где r_{HT} – удельное погонное сопротивление HT, Ом/м; l – расстояние от ЭПС, м; $I_{\text{HT}}^{\text{ТТС}}$, $I_{\text{КП}}^{\text{ТТС}}$ – ток в HT и КП до ТТС (слева) в зависимости от l .

Токораспределение после ТТС описывается следующими уравнениями:

$$I_{\text{HT}}^{\text{ТТС}''} = \frac{1}{2} \cdot \frac{r_{\text{КП}} \cdot I_{\text{ЭПС}}}{r_{\text{КП}} + r_{\text{HT}}} \cdot e^{-l \cdot \sqrt{\frac{r_{\text{КП}} + r_{\text{HT}}}{r_c}}}; \quad (12)$$

$$I_{\text{КП}}^{\text{ТТС}''} = -I_{\text{HT}}^{\text{ТТС}''}, \quad (13)$$

где $I_{\text{HT}}^{\text{ТТС}''}$, $I_{\text{КП}}^{\text{ТТС}''}$ – ток в HT и КП после ТТС (справа) в зависимости от l .

Согласно правилу трех сигм зона стягивания l_{σ} , за которую происходит основное стекание тягового тока из HT в КП, равняется 3σ .

К недостаткам такой модели относится невозможность ее применения для расчета подвесок с УП, а также для анализа локальных, а не распределенных поперечных соединений, например, СА.

5. На базе ВНИИЖТа В. Е. Марским был разработан программный комплекс КОНТ-3, выполняющий расчет нагрузочной способности подвесок постоянного тока [10]. В программе возможно задание топологии контактной подвески с учетом струн, ПС, РТ и СА (рисунков 4). Формирование системы уравнений происходит с учетом жестко заданных продольных проводов. Количество независимых контуров определяется ветвями, соединяющими продольные провода, и узлами, которые они образуют. Программа имеет собственный графический интерфейс с возможностью добавления таких узлов контактной подвески, как струна, электрический соединитель, вставка, шунт. База данных проводов имеет возможность редактирования и содержит следующие характеристики проводов: погонное сопротивление $R_{\text{ПР}}$, Ом/км; радиус Рад, см, допустимый длительный ток $I_{\text{доп}}$, А, длительно допустимая температура $T_{\text{дл}}$, °С.

Результаты расчета токораспределения отображаются в графическом окне в виде значений токов либо в виде коэффициентов нагрузки. Коэффициент нагрузки – это отношение протекающего тока по результатам расчета к длительно допустимому току провода.

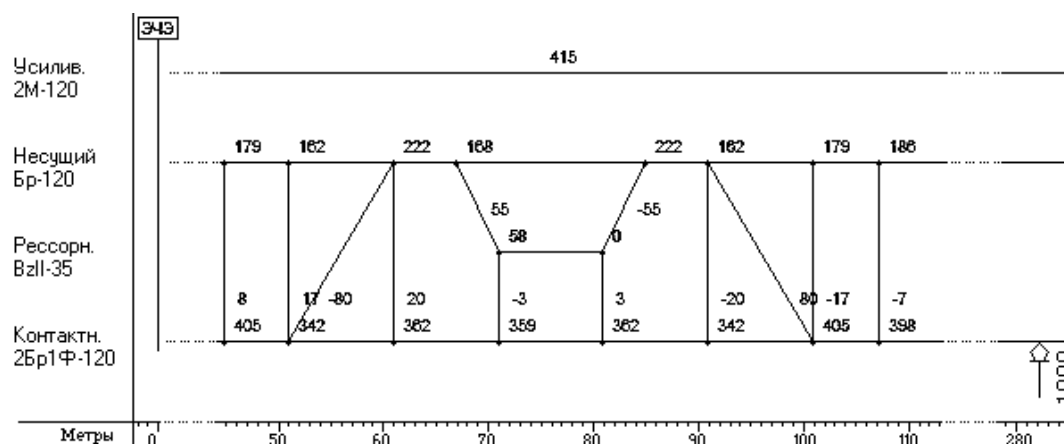


Рисунок 4 – Токораспределение участка контактной подвески в зоне СА в программе КОНТ-3

Данная модель позволяет рассчитывать токораспределение с учетом топологии соединения проводов контактной подвески, а также мгновенное токораспределение при нахождении токоприемника на заданной координате. Расчет токораспределения в подвеске при прохождении электропоезда по анкерному участку с помощью данной программы выполнить затруднительно и достаточно трудоемко. Алгоритм определения нагрева проводов в программе не реализован, и, как следствие, в расчете не учитывается изменение сопротивления проводов при нагреве. Встроенные возможности построения геометрии имеют ряд ограничений, не позволяющих воспроизвести траекторию продольных проводов отличной от прямолинейной. Отсутствует импорт геометрии из сторонних CAD-программ.

6. Еще одна программная реализация расчета токораспределения осуществлена в программе UKS-Current, разработанной в АО «Универсал – контактные сети» [11]. Топология контактной подвески представляется в виде произвольного пространственного графа электрической схемы (рисунок 5), решение которого производится методом непосредственного применения законов Кирхгофа в матричном виде. Формирование системы уравнений независимых контуров основано на свойстве дерева графа и определяется числом связей в каждом связном графе схемы. Таким образом, данный метод имеет гибкий алгоритм формирования матричной записи систем уравнений согласно законам Кирхгофа, без жестко заданных продольных и поперечных проводов. Пространственная геометрия контактной подвески импортируется из сторонних CAD-программ и представляет собой набор отрезков в системе AutoCAD. Каждому отрезку соответствует удельное сопротивление в зависимости от типа провода, и в таком случае сопротивление элемента соответствует его протяженности. Вывод результатов происходит в AutoCAD с указанием процента тока, протекающего через каждый элемент от общего тока ЭПС, и коэффициента нагрузки каждого провода.

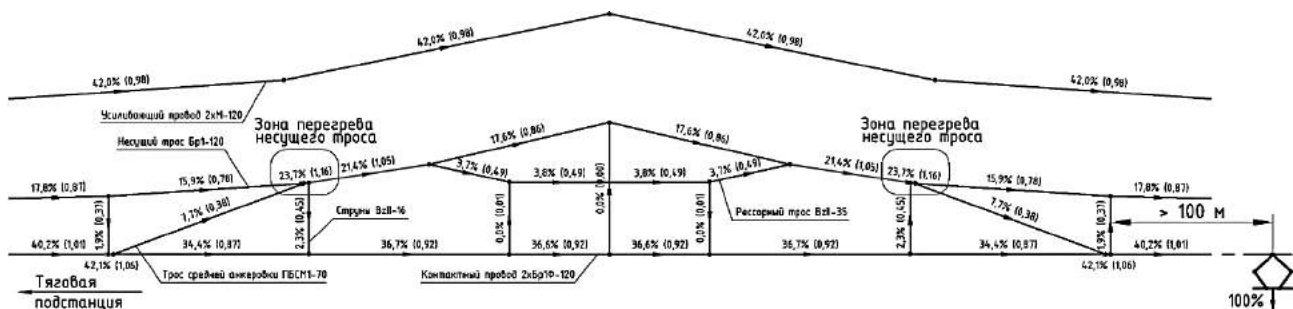


Рисунок 5 – Токораспределение в зоне средней анкеровки в программе UKS-Current

Преимуществом данного метода по сравнению с КОНТ-3 является более гибкая возможность задания геометрии и вывода результатов. Однако допущения и ограничения остаются прежними: отсутствие алгоритмов для расчета нагрева проводов, удельное сопротивление проводов не зависит от температуры, отсутствие алгоритмов расчета прохода ЭПС по анкерному участку.

7. Расчет токораспределения на основе метода конечных элементов (МКЭ) подробно рассматривается в работе [12]. В модели каждый провод контактной подвески является одномерным объектом с расчетными функциями $V = V(t, x)$ и $T = T(t, x)$ для определения значений электрического потенциала и температуры соответственно, которые решаются численно МКЭ (рисунок 6).

Программный комплекс Comsol Multiphysics, на базе которого реализована конечно-элементная модель, позволяет импортировать геометрию контактной подвески из ряда CAD-систем, а также включает в себя встроенное решение по заданию параметризованной геометрии. Для решения применяется пользовательский режим задания дифференциальных уравнений в коэффициентной форме для линейных объектов. Встроенный функционал по постобра-

ботке результатов решения позволяет представлять данные в виде 3D-модели, графиков, таблиц для всех проводов и их участков в контактной подвеске. На рисунке 6 представлен результат расчета токораспределения в среде Comsol Multiphysics в зоне средней анкеровки.

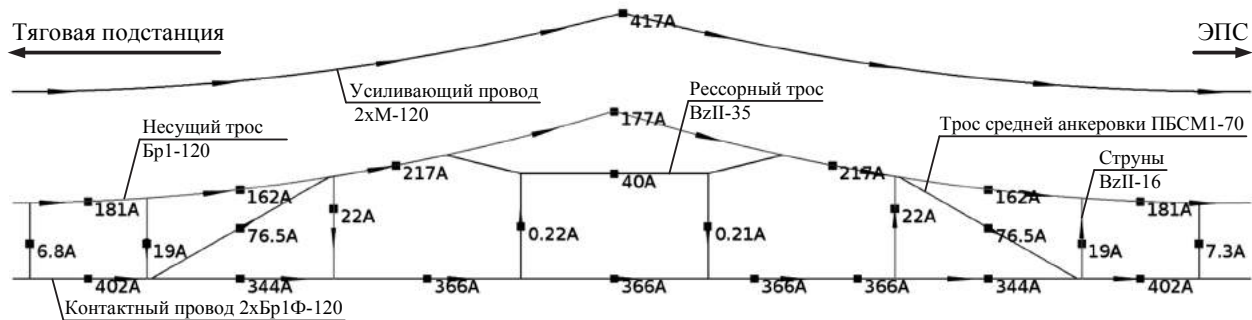


Рисунок 6 – Токораспределение в зоне средней анкеровки при транзите тягового тока 1000 А в программе Comsol Multiphysics

Рассматриваемая модель позволяет учитывать движение ЭПС по анкерному участку, нагрев проводов, изменение электрического сопротивления при нагреве. На основе данного метода можно рассчитать ток и температуру для каждого провода контактной подвески в любой момент времени транзита или токосъема тягового тока, величина которого может быть задана произвольно в зависимости от времени или от координаты движения на основании тяговых расчетов.

Сравнение расчетных моделей.

Рассмотрим сравнение расчетов токораспределения по аналитической модели К. Л. Костюченко, модели с бесконечным числом струн и модели, основанной на МКЭ, а также сравним температуру проводов контактной подвески по данным расчетов токораспределения. Все расчеты нагрева проводов производятся при температуре окружающего воздуха 40 °С, скорости ветра 1 м/с, потоке солнечной радиации 900 Вт/м². Так как модель с бесконечным числом струн не учитывает усиливающие провода, то рассматриваемый участок контактной подвески состоит из несущего троса Бр1-120, двойного контактного провода 2хБр1Ф-120, рессорного троса ВЗII-35 и токопроводящих струн ВЗII-16. В качестве поперечных электро-соединителей используется провод М-95. Расчет температуры для всех методов производился путем численного решения уравнения нестационарного теплообмена

$$c \cdot m_{\text{пр}} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - k \cdot S \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = q_{\text{рз}} + q_{\text{сл}} - q_{\text{кн}} - q_{\text{лч}} \quad (14)$$

где c – теплоемкость материала провода, Дж/(кг·К); $m_{\text{пр}}$ – погонная масса провода, кг/м; k – теплопроводность материала провода, Вт/(м·К); S – площадь поперечного сечения провода, м²; $q_{\text{пр}}$ – погонный резистивный поток тепла, Вт/м; $q_{\text{сл}}$ – погонный поток тепла от солнечной радиации, Вт/м; $q_{\text{кн}}$ – погонный поток тепла от теплоотдачи конвекцией, Вт/м; $q_{\text{лч}}$ – погонный поток тепла от теплоотдачи лучеиспусканием, Вт/м.

Длительно допустимый ток для данной подвески равен 1540 А. Ограничивающим проводом является несущий трос на участке между креплением троса СА и креплением РТ. Расчетная скорость движения ЭПС равна 24 км/ч. Питание является двухсторонним, но рассматриваемый участок находится в непосредственной близости к подстанции, расположенной справа. Положительное направление тока совпадает с направлением движения ЭПС. Результаты расчетов изображены на рисунке 7.

Из рисунка 7 видно, что за пределами УОС значения тока для модели К. Л. Костючено и модели с бесконечным числом струн совпадают с естественным токораспределением, а для конечно-элементной модели характерны отклонения в местах крепления РТ (до 19 % для НТ и до 8 % для КП), СА (до 22 % для НТ и 17 % для КП), ПС (до 10 % для НТ и до 7 % для КП) и струн (до 5 % для НТ и до 3 % для КП). На УОС расхождения результатов токораспределения становятся еще более значительными.

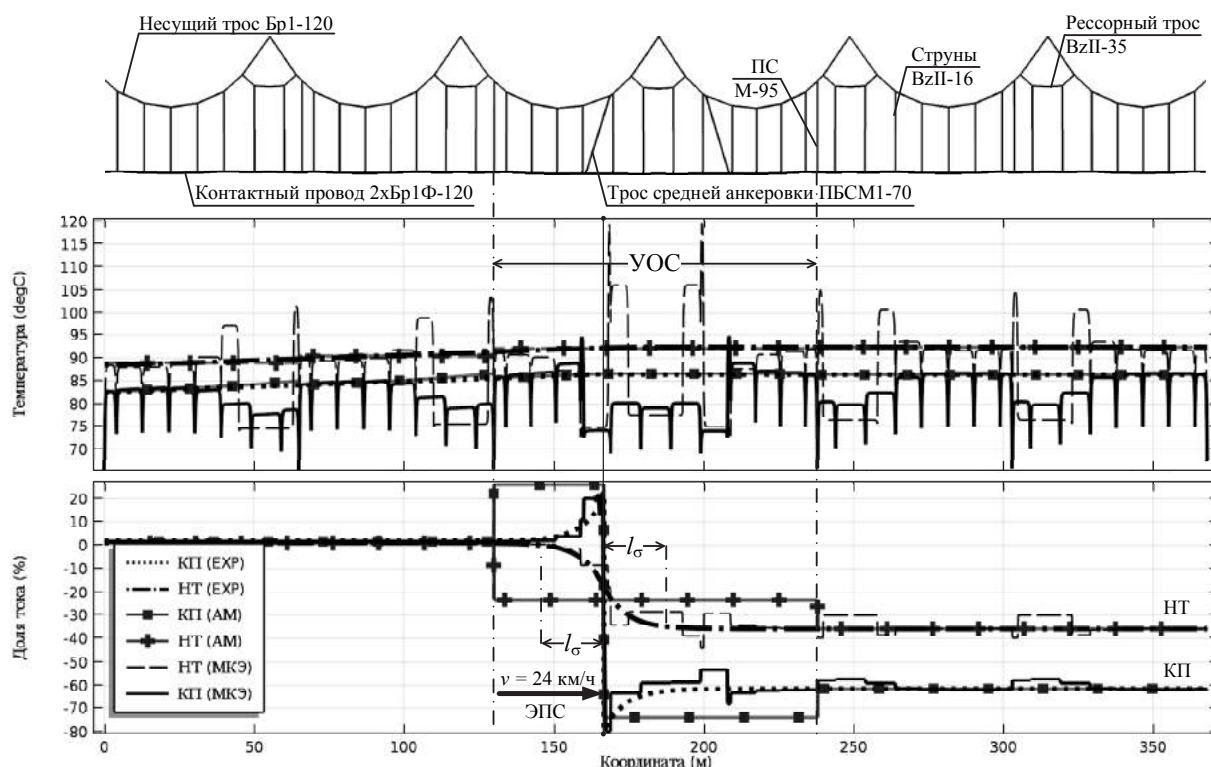


Рисунок 7 – Сравнение температуры и тока в проводах контактной подвески при проходе ЭПС с током 1540 А со скоростью 24 км/ч через 25 с после начала движения по расчетному участку:

EXP – модель с бесконечным числом струн; AM – модель К. Л. Костюченко;

МКЭ – конечно-элементная модель

При расчете по модели с бесконечным числом струн основная часть тока стекает из НТ в КП в зоне стягивания $l_\sigma = 21,5$ м. Расхождение результатов с конечно-элементной моделью на участке $2 \cdot l_\sigma$ составляет в среднем 59 % для НТ и 26 % для КП. Модель К. Л. Костючено не учитывает стекание тока по струнам, поэтому на участке от ПС до ЭПС протекает ток одной величины, а расхождение с результатами конечно-элементной модели на участке $2 \cdot l_\sigma$ составляет в среднем 412 % для НТ и 269 % для КП.

Ток и температура, рассчитанные в конечно-элементной модели, имеют перепады в местах соединения проводов вследствие перераспределения тока, а также по причине того, что зажимы выступают в роли радиаторов. Результат расчета токораспределения и температуры по модели К. Л. Костючено имеет разрывы только в местах соединения поперечных электро-соединителей и в ТТС. Для модели с бесконечным числом струн функция тока в НТ является непрерывной, а для КП разрыв происходит только в ТТС.

При увеличении поперечной проводимости контактной подвески и более равномерном распределении ее по расчетному участку (например, при применении токопроводящих струн) ток в продольных проводах будет стремиться к экспоненциальному распределению от ТТС, т. е. к описанию по модели с бесконечным числом струн, как к крайнему случаю. С

другой стороны, с увеличением сопротивления струн и снижением их числа до нуля крайним случаем станет модель К. Л. Костюченко и ток в продольных проводах будет стремиться к распределению по этой модели. Конечно-элементная модель наиболее точно отражает картину реального токораспределения с учетом действительной топологии контактной подвески. Так как рассматриваемая подвеска имеет токопроводящие струны В2П-16, то реальная картина токораспределения ближе к модели с бесконечным числом струн, чем модели К. Л. Костюченко, что видно из графиков и процентного расхождения результатов.

При учете УП сравнение конечно-элементной модели возможно только с аналитической моделью К. Л. Костюченко. На рисунке 8 представлен расчет тока и температуры контактной подвески Бр1-120 + 2Бр1Ф-120 + 2хМ-120, что соответствует КС-250-3. Длительно допустимый ток для данной подвески равен 2798 А, а ограничивающим является УП. Отклонение результатов расчета токораспределения для УП составляет менее 5 %. Значения тока в электросоединителе $I_{\Sigma y}$ от УП к ПС по результатам расчета двух моделей имеет 10 %-ное расхождение, а для $I_{\Sigma k}$ расхождение значительнее и составляет 215 %. Разница в результатах расчета тока на УОС для НТ и КП относительно расчета без УП снизилась и составляет в среднем 51 % для каждого провода.

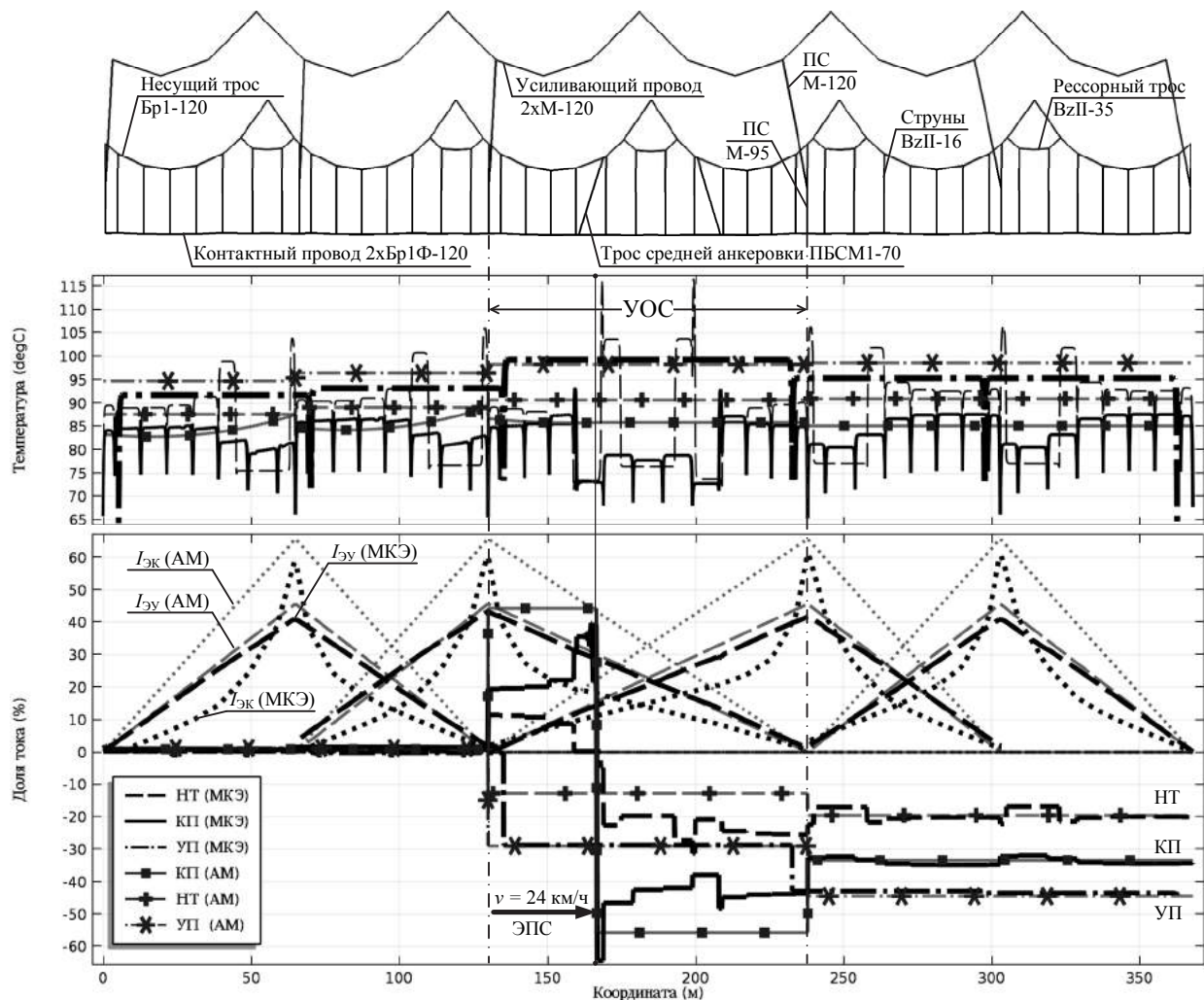


Рисунок 8 – Сравнение температуры и тока в проводах контактной подвески при проходе ЭПС с током 2798 А со скоростью 24 км/ч через 25 с после начала движения по расчетному участку значения токов $I_{\Sigma k}$ и $I_{\Sigma y}$ указаны за все время движения ЭПС по расчетному участку:

АМ – модель К. Л. Костюченко; МКЭ – конечно-элементная модель

В таблице 1 приведено сравнение результатов расчета токораспределения для участка контактной подвески в зоне СА по методикам КОНТ-3, UKS-Current и Comsol Multiphysics, представленных соответственно на рисунках 4 – 6. В таблице приведены доли тока в процентном соотношении от общего тягового тока для различных участков проводов контактной подвески, а также процент отклонения от расчета в других программных комплексах. Расчет по каждой методике имеет ряд допущений, которые в конечном итоге приводят к расхождению в результатах. Так, в UKS-Current применяется геометрия, импортированная из специализированной программы UKS-FEM 3D, а свойства проводов задаются соответствующими стандартами и техническими условиями на провода. В КОНТ-3 характеристики проводов задаются аналогично, но присутствует ряд допущений и ограничений при построении геометрии. При расчете токораспределения в Comsol Multiphysics геометрия контактной подвески может быть найдена решением соответствующей самостоятельной задачи по определению пространственного положения проводов контактной подвески, может быть импортирована из ряда CAD-программ, а также может быть создана встроенными методами построения и параметризации геометрии, как в рассматриваемом примере. Кроме того, для расчета методом конечных элементов характеристик проводов, указанных в нормативно-технической документации, недостаточно, поэтому используются свойства соответствующих материалов, значения которых зависят от температуры.

Таблица 1 – Доля тока в различных участках контактной подвески по результатам расчета токораспределения

Объект контактной сети	Программный комплекс								
	Comsol Multiphysics			UKS-Current			КОНТ-3		
	доля $I_{\text{ЭПС}}$, %	отклон. от UKS-Current, %	отклон. от КОНТ-3, %	доля $I_{\text{ЭПС}}$, %	отклон. от Comsol, %	отклон. от КОНТ-3, %	доля $I_{\text{ЭПС}}$, %	отклон. от Comsol, %	отклон. от UKS-Current, %
КП	40,2	0,00	0,74	40,2	0,00	0,74	40,5	-0,75	-0,75
	34,4	0,00	-0,58	34,4	0,00	-0,58	34,2	0,58	0,58
	36,6	0,27	-1,10	36,7	-0,27	-1,38	36,2	1,09	1,36
НТ	18,1	-1,69	-1,12	17,8	1,66	0,56	17,9	1,10	-0,56
	16,2	-1,89	0,00	15,9	1,85	1,85	16,2	0,00	-1,89
	21,7	-1,40	2,25	21,4	1,38	3,60	22,2	-2,30	-3,74
	17,7	-0,57	-5,36	17,6	0,56	-4,76	16,8	5,08	4,55
УП	41,7	-0,71	0,48	42,0	-0,72	1,20	41,5	-0,48	-1,19
РТ	4,0	-8,11	27,3	3,7	7,50	32,7	5,5	-37,5	-48,7
	4,0	-5,26	31,0	3,8	5,00	34,5	5,8	-45,0	-52,6
СА	7,65	0,65	4,38	7,7	-0,65	3,75	8,0	-4,58	-3,90
Струны	1,9	0,00	-11,8	1,9	0,00	-11,8	1,7	10,5	10,5
	2,2	4,35	-10,0	2,3	-4,55	-15,0	2,0	9,09	13,1

В таблице 2 приведена сводная информация по расчетным возможностям всех рассмотренных моделей.

На основании изложенного можно сделать выводы. Модель К. Л. Костюченко может быть применена для расчета токораспределения без значительного снижения в точности расчетов на подвесках с изолированными струнами. Модели КОНТ-3 и UKS-Current применимы для расчета токораспределения с учетом топологии контактной подвески, причем UKS-Current позволяет рассчитывать токораспределение в схемах с произвольной геометрией и топологией, в то время как в КОНТ-3 имеет ограничения. Модель с бесконечным числом струн может быть использована для оценки зоны стягивания тягового тока, а модель естественного токораспределения для приблизительной оценки доли тока в продольных проводах.

Таблица 2 – Сравнение расчетных возможностей моделей расчета токораспределения в контактной подвеске постоянного тока

Номер модели расчета		Метод расчета						
		1	2	3	4	5	6	7
Расчетные возможности		естественная модель	модель А. В. Воронина	модель К. Л. Костюченко	модель с бескон. числом струн	модель в КОМПАС-3	модель в UKS-Current	модель МКЭ
Расчет токораспределения с учетом поперечных проводов	СТР				✓	✓	✓	✓
	ПС		✓	✓	✓	✓	✓	✓
Расчет токораспределения в продольных проводах	НТ	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	КП	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	УП	✓		✓		✓	✓	✓
	РТ					✓	✓	✓
Расчет токораспределения с учетом мгновенного положения ЭПС						✓	✓	✓
Учет местного износа контактного провода						✓	✓	✓
Учет сопротивления зажимов						✓	✓	✓
Учет топологии контактной подвески						✓	✓	✓
Импорт произвольной геометрии подвески из CAD							✓	✓
Учет неравномерного по длине износа контактного провода								✓
Расчет движения ЭПС								✓
Расчет температуры проводов								✓
Учет температурного коэффициента электрического сопротивления								✓
Итого		3	3	4	4	10	11	15

Конечно-элементная модель не имеет аналогов при тепловом расчете контактной подвески, при анализе подвесок с неравномерным износом контактного провода и при расчете прохода ЭПС по анкерному участку. Из данных таблицы 2 видно, что расчет МКЭ предоставляет широкие расчетные возможности, но в то же время этот метод наиболее требователен к вычислительным ресурсам. Дальнейшим развитием конечно-элементной модели будет являться переход от одномерного представления проводов контактной подвески к трехмерному.

Специализированное программное обеспечение для расчета токораспределения не всегда имеет поддержку от разработчиков, что ограничивает его функционал и применение. Так как метод конечных элементов широко распространен, то модель может быть воспроизведена широким кругом специалистов в продуктах, аналогичных Comsol Multiphysics, а такие программы, как правило, имеют постоянную поддержку и развитие.

Анализ результатов расчета семи моделей токораспределения позволяет сделать следующие выводы:

1) исследование аналитических, графовых и конечно-элементных моделей токораспределения показывает необходимость учета топологии контактной подвески для выявления характера влияния того или иного конструкционного элемента контактной сети на токораспределение;

2) учет точной геометрии контактной подвески, температуры проводов, зажимов контактной сети и износа контактного провода позволяет уточнить значение локальных токовых и температурных перегрузок;

3) высокая сходимость результатов расчета по основным расчетным показателям каждой из моделей позволяет определить оптимальную для использования модель токораспределения в зависимости от предъявляемых к расчету требований.

Список литературы

1. Распоряжение Правительства РФ от 17.06.2008 № 877-р «О стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года» [Текст]. – М., 2008. – 127 с.
2. Паранин, А. В. Последовательность модернизации системы электроснабжения постоянного тока повышенного уровня напряжения в контактной сети [Текст] / А. В. Паранин, Е. Л. Проскуряков // Вестник УрГУПС / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2016. – № 2 (30). – С. 67 – 72.
3. Калугин, И. Г. Целесообразные схемы тяговых подстанций для системы тяги постоянного тока повышенного напряжения 12 – 24 кВ [Текст] / И. Г. Калугин // Вестник ВНИИЖТа / ВНИИЖТ. – М. – 2013. – № 1. – С. 53 – 59.
4. Аржанников, Б. А. Концепция усиления системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ: Монография [Текст] / Б. А. Аржанников, И. О. Набойченко / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. 2015. – 258 с.
5. Берент, В. Я. Материалы и свойства электрических контактов в устройствах железнодорожного транспорта [Текст] / В. Я. Берент. – М.: Интекст, 2005. – 408 с.
6. Марквардт, К. Г. Контактная сеть: Учебник [Текст] / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1994. – 335 с.
7. Воронин, А. В. Токораспределение между продольными проводами контактной сети и тепловой расчет ее элементов [Текст]: Дис... канд. техн. наук: 05.22.09. – М., 1946. – 143 с.
8. Костюченко, К. Л. Новые узлы электрических и механических соединений проводов контактной сети [Текст]: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.22.09. – М., 1994. – 23 с.
9. Батрашов, А. Б. Анализ физических свойств материала контактного провода по характеристикам железнодорожной линии [Текст] / А. Б. Батрашов // «Эврика!»: Материалы семинара аспирантов УрГУПС / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург, 2016. – № 2 (217). – С. 6 – 18.
10. Определение нагрузочной способности контактных подвесок постоянного тока и их элементов [Текст] // Новое в хозяйстве электроснабжения / Под ред. А. Б. Косарева. – М.: Интекст, 2003. – С. 123 – 127.
11. Схемные и конструктивные решения по контактной сети участка Москва – Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Казань – Екатеринбург [Текст] // Расчет электротехнических параметров контактной сети / АО «Универсал – контактные сети». – СПб, 2016. – 105 с.
12. Паранин, А. В. Расчет распределения тока и температуры в контактной подвеске постоянного тока на основе метода конечных элементов / А. В. Паранин // Вестник ВНИИЖТа / ВНИИЖТ. – М. – 2015. – № 6. – С. 33 – 38.

References

1. *Rasporjazhenie Pravitel'stva RF ot 17.06.2008 N 877-r «O Strategii razvitija zheleznodorozhnogo transporta v Rossijskoj Federacii do 2030 goda»* (Order of the Government of the Russian Federation of June 17, 2008 N 877-r «On the Strategy for the Development of Railway Transport in the Russian Federation until 2030»). Moscow, 2008. 127 p.
2. Paraniin A.V., Succession for improvement of dc power supply with higher voltage in overhead system [Proskuriakov E.L. Posledovatel'nost' modernizatsii sistemy elektrosnabzheniia postoiannogo toka povyshennogo urovnia napriazheniia v kontaktnoi seti]. *Vestnik UrGUPS – Herald of USURT*. 2016. no. 2 (30). pp. 67 – 72.
3. Kalugin I. G. Appropriate Traction Substation Configurations for Higher-Voltage DC Traction Power Supply System rated at 12 – 24 kV [Tselesoobraznye skhemy tiagovykh podstantsii dlia sistemy tiagi postoiannogo toka povyshennogo napriazheniia 12 – 24kV] *Vestnik VNIIZhT – Herald of VNIIZhT*. 2013. no. 1. pp. 53 – 59.
4. Arzhannikov B. A., Naboichenko I. O. *Kontseptsiiia usileniia sistemy tiagovogo elektrosnab-*

zheniia postoiannogo toka 3,0 kV : monografiia (The concept of strengthening the system of DC traction power supply of 3.0 kV: monograph). Yekaterinburg: UrGUPS, 2015. – 258 p

5. Berent V. Ia. *Materialy i svoistva elektricheskikh kontaktov v ustroistvakh zheleznodorozhnogo transporta* (The materials and property of electric contacts in devices of railway). Moscow: Intekst, 2005, 408 p.

6. Markvardt K. G. *Kontaktnaia set'. 4-e izd. pererab. i dop. Ucheb. dlia vuzov zh.-d. transp.* (Contact line. 4-th edition, revised and enlarged. The textbook for high schools of railway transport). Moscow: Transport, 1994. 335 p.

7. Voronin A. V. *Tokoraspredelenie mezhdru prodol'nymi provodami kontaktnoi seti i teplovoi raschet ee elementov* (Distribution of current between the longitudinal wires of the contact line and the thermal calculation of its element). PhD thesis, Moscow, TsNII MPS, 1946.

8. Kostiuchenko K. L. *Novye uzly elektricheskikh i mekhanicheskikh soedinenii provodov kontaktnoi seti* (The new nodes of electrical and mechanical connections of wires of the contact line) Doctor's thesis, Moscow, MIIT 1994. 23 p.

9. Batrashov A. B. Analysis of the physical properties of the material of the contact wire according to the characteristics of the railway line [Analiz fizicheskikh svoistv materiala kontaktnogo provoda po kharakteristikam zheleznodorozhnoi linii] «Eureka!» : *materials of the postgraduate seminar of USURT*. Yekaterinburg, 2016. № 2 (217), pp. 6 – 18.

10. Marskii V. E. *Opreделение nagruzochnoi sposobnosti kontaktnykh podvesok postoiannogo toka i ikh elementov. Novoe v khoziaistve elektrosnabzheniia*. Pod red. A. B. Kosareva (Determination of the load capacity of DC contact line and their elements. The new in economy of power supply of railway. Ed. A. B. Kosarev). Moscow: Intekst, 2003, pp. 123 – 127.

11. *Skhemnye i konstruktivnye resheniia po kontaktnoi seti uchastka Moskva – Kazan' vysokoskorostnoi zheleznodorozhnoi magistrali Moskva – Kazan' – Ekaterinburg. Raschet elektrotekhnicheskikh parametrov kontaktnoi seti*. (Schematic and constructive solutions for the contact network of the Moscow-Kazan section of the Moscow-Kazan-Yekaterinburg high-speed railway. Calculation of the electrical parameters of the contact line). S. Petersburg, J.S.C. «Universal catenary systems», 2016, 105 p.

12. Paranin A. V. Finite-Element Model Based Distribution Calculations of Current and Temperature within a DC Overhead [Raschet raspredeleniia toka i temperatury v kontaktnoi podveske postoiannogo toka na osnove metoda konechnykh elementov]. *Vestnik VNIIZhT – Herald of VNIIZhT*. 2015. no. 6. pp. 33 – 38.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Батрашов Андрей Борисович

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).

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

Аспирант кафедры «Электроснабжение транспорта», УрГУПС.

Тел.: 8 (982) 677-61-99.

E-mail: andreybatrashov@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Batrashov Andrey Borisovich

Ural State University of Railway Transport (USURT).

66, Kolmogorov st., Yekaterinburg, 620034, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department «Power supply of transport», USURT.

Phone: 8 (982) 677-61-99.

E-mail: andreybatrashov@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Батрашов, А. Б. Сравнение моделей токораспределения в контактных подвесках постоянного тока [Текст] / А. Б. Батрашов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – 4(32). – С. 54 – 67.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Batrashov A. B. Comparison of models of current distribution in DC contact lines. Journal of Transsib Railway Studies, 2017, vol. 32, no 4, pp. 54 – 67 (In Russian).

А. В. Горькин, О. В. Гателюк

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМОГО ЧИСЛА ОТКЛЮЧЕНИЙ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЕЛИЧИНЫ И КОЛИЧЕСТВА ОТКЛЮЧЕННЫХ ТОКОВ

Аннотация. В статье проанализированы причины отключений быстродействующих выключателей постоянного тока и получено распределение отключаемых токов. Рассматриваются такие числовые характеристики, как математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение функции распределения отключаемых быстродействующим выключателем токов. Проверена гипотеза о распределении вероятности отказа в срабатывании выключателя. Сделаны выводы о применимости приведенных методов расчета для определения допустимого числа отключений быстродействующих выключателей на участках тяговой сети постоянного тока.

Ключевые слова: быстродействующий выключатель, количество электричества, сумма тока, вероятность отказа, математическое ожидание, среднеквадратическое отклонение, отключаемый ток, допустимое число отключений.

Artem V. Gor'kin, Oleg V. Gatelyuk

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

DEFINITION OF ADMISSIBLE NUMBER OF SHUTDOWNS OF HIGH-SPEED SWITCHES DEPENDING ON THE SIZE AND QUANTITY OF THE DISCONNECTED CURRENTS

Abstract. In article the reasons of shutdowns of high-speed switches of a direct current are analysed and distribution of the disconnected currents is received. Such numerical characteristics as population mean and a mean square deviation of function of distribution of the currents which are disconnected by the high-speed switch are considered. The hypothesis of distribution of probability of refusal in operation of the switch is checked. Conclusions are drawn on applicability of the given calculation methods for definition of admissible number of shutdowns of high-speed switches on sites of traction network of a direct current.

Keywords: high-speed switch; amount of electricity; current sum; probability of refusal; population mean; mean square deviation; the disconnected current; admissible number of shutdowns.

На участках тяговой сети постоянного тока российских железных дорог наблюдается ежегодный рост максимальных рабочих токов, потребляемых электроподвижным составом (ЭПС), и скачков тока нагрузки. Это происходит вследствие развивающегося в России скоростного и тяжеловесного движения железнодорожного транспорта. В результате происходит увеличение количества отключений быстродействующих выключателей (БВ) [1, 2] и ухудшение условий их работы, что в свою очередь сказывается на увеличении эксплуатационных затрат на капитальный ремонт и обслуживание БВ. Поэтому проблемы чрезмерно малого межремонтного интервала при эксплуатации выключателей и своевременного контроля за их фактическим техническим состоянием имеют высокую актуальность.

В настоящее время периодичность выполнения ремонта БВ по техническому состоянию регламентируется отраслевым стандартом ОАО РЖД – «Правилами содержания тяговых подстанций, трансформаторных подстанций и линейных устройств системы тягового электроснабжения» (далее – Правила) [3]. Кроме того, существуют технические указания «О по-

рядке эксплуатации тяговых подстанций, оборудованных системой технического диагностирования» № ЦЭТ-2 (П-02/04) от 30.03.2004 (далее – ТУ № П-02/04) [4] и «О внесении изменений в порядок эксплуатации тяговых подстанций, оборудованных системой технического диагностирования» № ЦЭТ-2/7 от 26.02.2008 [5], которые распространяются на тяговые подстанции (ТПС), оборудованные действующей системой технического диагностирования. Указанные нормативные документы дополняются стандартом предприятия – СТО РЖД 11.010-2013 «Электроустановки систем железнодорожного электроснабжения. Номенклатура физических величин, подлежащих контролю при постоянном техническом диагностировании» [6]. Указанные нормативные документы, к сожалению, во многом противоречат друг другу и характеризуются незавершенностью выдвигаемых требований к оборудованию системы электроснабжения.

Поэтому в настоящее время точность оценки состояния выключателей по техническому состоянию невысока, так как фактически контролируются только три параметра: коммутационный ресурс по току – 3000 кА суммарного отключенного тока, механический ресурс – 80 отключений и недовключенное положение БВ. Причем критерии этих параметров установлены для всех типов выключателей одинаковые. Поэтому, контролируя только эти три параметра, невозможно провести своевременную и объективную оценку состояния выключателей для определения оптимальных сроков их технического обслуживания, выявления предотказных состояний, что подтверждает актуальность данной темы для исследования [4, 5, 7, 8].

Для определения недостающих критериев была проведена экспериментальная оценка состояния сдвоенных БВ типа ВАБ-43-4000 на одном фидере и ВАБ-49-3200 на двух фидерах тяговой подстанции методом наработки на отказ [7, 8]. Выбор выключателей типа ВАБ-43 и ВАБ-49 обусловлен тем, что это самые массовые БВ, которые применяются на тяговых подстанциях сети железных дорог ОАО «РЖД». Вместе их доля от общего числа выключателей на тяговых подстанциях (5423 шт.) составляет более 70 %. Кроме того, БВ постоянного тока (по данным Западно-Сибирской железной дороги) в большинстве своем выработали свой нормативный срок – более 65 % выключателей находятся в эксплуатации от 30 до 50 лет и более. Поэтому они нуждаются в более детальной и объективной оценке, чем, например, современные и новые БВ типа ВАБ-206.

В работе [9] для фидера №2 ТПС Таскаево, который оснащен БВ типа ВАБ-43-4000, было определено суммарное значение количества электричества ($It_{кр} = 35,4 \text{ кА} \cdot \text{с}$), прошедшего через дугу на контактах выключателя, которое вынесет расчетный объем металла при нормативно-допустимом износе подвижного дугогасительного контакта, равном 3 мм [3]. Указанное значение получено на основе экспериментальных данных [7, 8]:

- пиковое значение отключенного тока In_i ;
- число отключений $n_0 = 1335$;
- среднее значение отключенного тока $I_o = 4121,5 \text{ А}$;
- сумма отключенного тока $\sum I_o = 5502,2 \text{ кА}$;
- среднее количество электричества $It_{кр} = 50,66 \text{ кА} \cdot \text{с}$;
- среднее количество электричества на одно отключение $It_{ср} = 37,94 \text{ А} \cdot \text{с}$.

Из 1335 отключений БВ, параметры которых были зафиксированы и обработаны во время эксперимента [7, 8], в дальнейшем были проанализированы 233 осциллограммы, что позволило построить диаграмму распределения отключений БВ в зависимости от характера изменения тока в тяговой сети (рисунок 1).

В дальнейшем было построено распределение числа отключений по току (рисунок 2). При этом учитывались отключения от токов короткого замыкания и от бросков тяговой нагрузки (всего 86 отключений) как наиболее значимые в плане влияния на остаточный ресурс выключателей.

По полученным экспериментальным данным [7 – 9] рассчитано среднее число отключений БВ при нормативно-допустимом износе подвижного дугогасительного контакта, равном 3 мм:

$$n_d = \frac{I_{t_{кр}}}{I_{t_{ср}}} \cdot 10^3; \quad (1)$$

$$n_d = \frac{35,4}{37,94} \cdot 10^3 \approx 930,$$

где $I_{t_{кр}}$ – суммарное значение количества электричества, кА·с;

$I_{t_{ср}}$ – среднее количество электричества на одно отключение, А·с.



Рисунок 1 – Распределение числа отключений в зависимости от характера изменения тока в тяговой сети

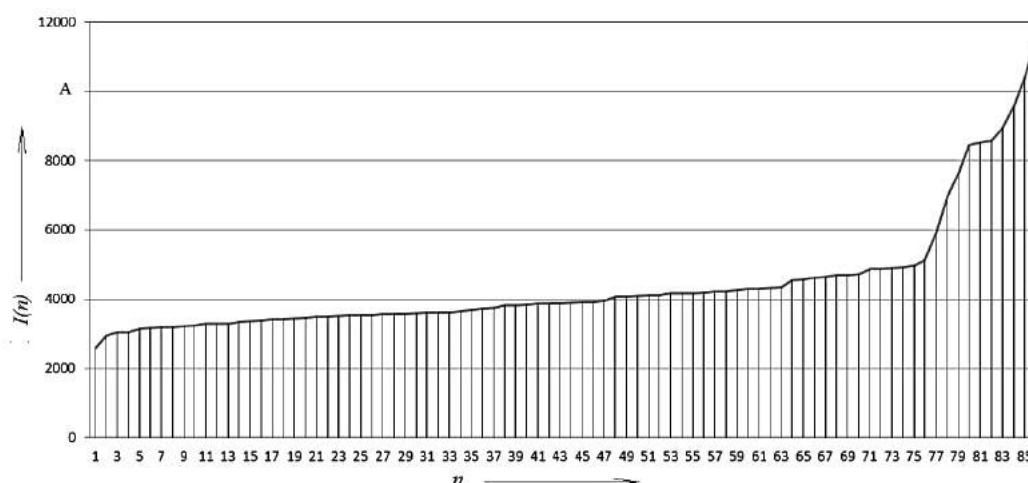


Рисунок 2 – Распределение числа отключений по току

Далее определим сумму отключенного тока для этого числа отключений:

$$I_{\Sigma} = I_0 \cdot n_d; \quad (2)$$

$$I_{\Sigma} = 4121,5 \cdot 930 \approx 3833000 \text{ А},$$

где n_d – среднее число отключений;

I_0 – среднее значение отключенного тока, А.

Допустимое число отключений для каждого значения отключенного тока (согласно данным рисунка 2) определяется по выражению:

$$n_i = \frac{I_{\Sigma}}{I_{n_i}} = \frac{3833000}{I_{n_i}}, \quad (3)$$

где I_{n_i} – значение тока при каждом отключении (86 значений), А.

Для нахождения таких числовых характеристик, как математическое ожидание и средне-квадратическое отклонение функции распределения отключаемых быстродействующим выключателем токов, воспользуемся в качестве основы методикой, приведенной в источнике [10].

Подставляя измеренные значения отключенного тока в выражение (3), построим его зависимость от допустимого числа отключений (рисунок 3).

Плотность распределения вероятности отключаемых токов при равной вероятности их расположения на всем измеряемом диапазоне (при $I_k = 2580 \text{ A} \leq I \leq I_H = 11390 \text{ A}$ согласно зависимости на рисунке 2) определяется по выражению:

$$f(I) = \frac{I_H \cdot I_k}{I^2 \cdot (I_H - I_k)}, \quad (4)$$

где $I_k = 2580 \text{ A}$ – значение тока, измеренного в конце диапазона (минимальный ток), A;

$I_H = 11390 \text{ A}$ – значение тока, измеренного в начале диапазона (максимальный ток), A;

I – диапазон измеряемых токов (от 2580 до 11390 A).

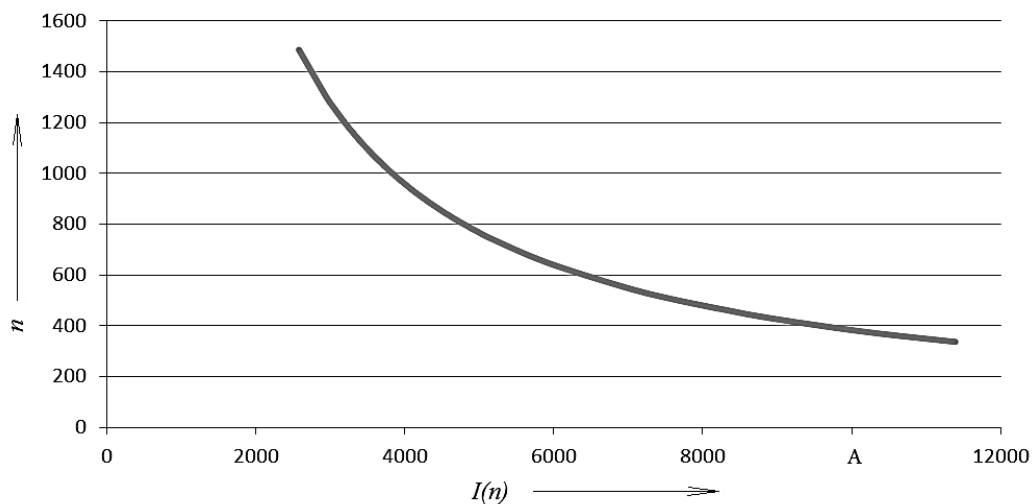


Рисунок 3 – Зависимость допустимого числа отключений от величины отключаемых токов

Подставляя известные значения в выражение (4), отобразим плотность распределения вероятности отключаемых токов графически (рисунок 4).

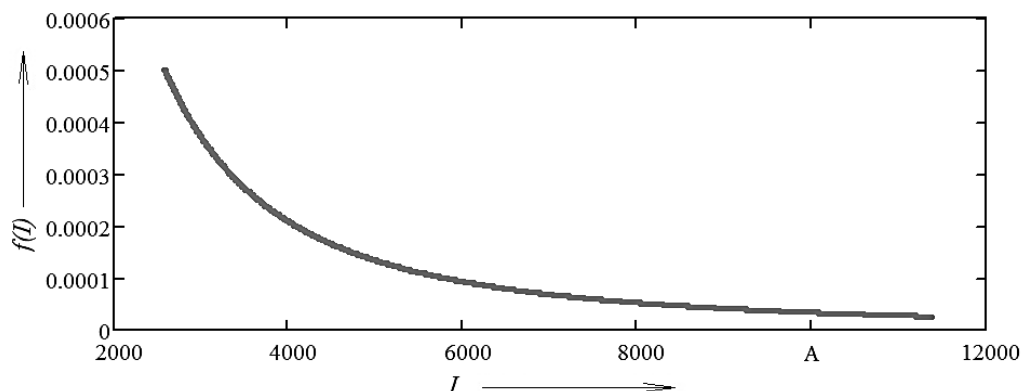


Рисунок 4 – Плотность распределения вероятности величины отключаемых токов

Таким образом, по плотности распределения вероятности, приведенной на рисунке 4, видно, что наиболее вероятны значения отключаемых выключателем токов менее 3000 – 4000 А.

Математическое ожидание отключаемого выключателем тока для зависимости, приведенной на рисунке 2, определим по выражению:

$$m_I = \int_{I_K}^{I_H} I^2 \cdot f(I) \cdot dI = \frac{I_H \cdot I_K}{I_H - I_K} \cdot (\ln(I_H) - \ln(I_K)); \quad (5)$$

$$m_I = \frac{11390 \cdot 2580}{11390 - 2580} \cdot (\ln(11390) - \ln(2580)) = 4953,1 \text{ А.}$$

Среднеквадратическое отклонение при этом будет вычисляться по выражению:

$$\sigma_I = \sqrt{\int_{I_K}^{I_H} I^2 \cdot f(I) \cdot dI - m_I^2} = \sqrt{I_H \cdot I_K - m_I^2}; \quad (6)$$

$$\sigma_I = \sqrt{11390 \cdot 2580 - 4953,1^2} = 2203 \text{ А,}$$

где m_I – математическое ожидание отключаемого выключателем тока, А.

Для определения математического ожидания числа отключений N необходимо определить параметр функциональной зависимости допустимого числа отключений от значения отключаемых токов [10]:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{N(I_i)}{I_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{I_i^2}}; \quad (7)$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^{86} \frac{1486}{2580} + \frac{1300}{2948} + \dots + \frac{337}{11390}}{\sum_{i=1}^{86} \frac{1}{2580^2} + \frac{1}{2948^2} + \dots + \frac{1}{11390^2}} = \frac{21,320185}{5,56219 \cdot 10^{-6}} = 3833056,$$

где $N(I_i)$ – допустимое число отключений (зависимость на рисунке 3) при значениях тока, принимаемых согласно распределению на рисунке 2;

I_i – значения отключаемых токов, принимаемых согласно распределению на рисунке 2.

Математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение допустимого числа отключений вычисляются по теоремам о числовых характеристиках функций случайных величин [11]. При этом определение законов распределения функции случайной величины не обязательно, а достаточно знание закона распределения самой случайной величины – аргумента.

Математическое ожидание допустимого числа отключений

$$m_N = \int_{I_K}^{I_H} N(I) \cdot f(I) \cdot dI = \frac{a}{2} \cdot \frac{I_H + I_K}{I_H \cdot I_K}; \quad (8)$$

$$m_N = \frac{3833056}{2} \cdot \frac{11390 + 2580}{11390 \cdot 2580} = 911,$$

где a – параметр функциональной зависимости допустимого числа отключений от значения отключаемых токов.

Среднеквадратическое отклонение допустимого числа отключений

$$\sigma_N = \sqrt{\int_{I_k}^{I_H} N^2(I) \cdot f(I) \cdot dI - m_N^2} = \sqrt{\frac{a^2 \cdot I_H \cdot I_k}{3 \cdot (I_H - I_k)} \cdot \left(\frac{1}{I_k^3} - \frac{1}{I_H^3}\right) - m_N^2}; \quad (9)$$

$$\sigma_N = \sqrt{\frac{3833056^2 \cdot 11390 \cdot 2580}{3 \cdot (11390 - 2580)} \cdot \left(\frac{1}{2580^3} - \frac{1}{11390^3}\right) - 911^2} = 332 \text{ А.}$$

Таким образом, по выражениям (5), (6), (8), (9) определяются числовые характеристики коммутационного ресурса выключателей в зависимости от величины и количества отключенных токов. Найденные числовые характеристики будут использованы для определения параметров распределения с целью нахождения вероятности отказа выключателя.

Отключение быстродействующим выключателем токов нагрузки или короткого замыкания представляет собой случайный процесс с дискретными состояниями и непрерывным аргументом. Таким образом, вероятность отказа в срабатывании будет являться функцией аргумента. Поэтому делаем допущение о том, что когда выключатель новый, вероятность отказа равна нулю. Соответственно при возрастании числа отключенных токов вероятность отказа БВ стремится к единице. Причем рост вероятности отказа срабатывания БВ происходит при возрастании числа отключенных токов (аргумента).

В этом случае функция отказа выключателя в зависимости от числа отключений $q(N)$ обладает всеми свойствами интегральной функции распределения.

Для описания подобных процессов лучше всего подходит распределение Вейбулла [10].

Интегральная функция распределения Вейбулла при $N \geq 0$ имеет вид:

$$q(N) = 1 - e^{-k \cdot N^\beta}, \quad (10)$$

где k – параметр;

N – количество отключений;

β – параметр формы.

Для нахождения интегральной функции распределения Вейбулла при $N \geq 0$ воспользуемся методами, приведенными в работе [12]. Определим коэффициент вариации:

$$v = \frac{\sigma_N}{m_N}; \quad (11)$$

$$v = \frac{332}{911} = 0,364.$$

Значения отключенных токов известны и отображены на распределении, приведенном на рисунке 2.

Зададимся начальным приближением для параметра β :

$$\beta_0 = v^{-1,075} = 0,364^{-1,075} = 2,96.$$

Определим значение параметра α по выражению:

$$\alpha = \left(\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N I_i^\beta \right)^{\frac{1}{\beta}}; \quad (12)$$

$$\alpha = \left(\frac{1}{86} \cdot (2580^{2,96} + 2948^{2,96} + \dots + 11390^{2,96}) \right)^{\frac{1}{2,96}} = 5124,8.$$

Определим значение параметра k по выражению:

$$k = \left(\frac{1}{\alpha} \right)^\beta; \quad (13)$$

$$k = \left(\frac{1}{5124,8} \right)^{2,96} = 1,046 \cdot 10^{-11}.$$

Исходя из полученных значений определим вероятностные характеристики отказа. Интенсивность потока отказов

$$\lambda = k \cdot \beta \cdot m_N^{(\beta-1)} \cdot 8760; \quad (14)$$

$$\lambda = 1,046 \cdot 10^{-11} \cdot 2,96 \cdot 911^{(2,96-1)} \cdot 8760 = 0,171 \text{ года}^{-1},$$

где 8760 – число часов в году.

Запишем интегральную функцию распределения Вейбулла:

$$q(N) = 1 - e^{-k \cdot N^\beta}; \quad (15)$$

$$q(N) = 1 - e^{-1,046 \cdot 10^{-11} \cdot 911^{2,96}} = 0,006.$$

В качестве основного вывода можно сказать, что приведенная выше математическая модель применима на всех участках тяговой сети для расчета числовых характеристик коммутационного ресурса быстродействующих выключателей и определения допустимого числа их отключений в зависимости от количества и величины отключаемых токов. Используя методы, приведенные в настоящей статье, а также в работе [7 – 9], можно с достаточной степенью точности спрогнозировать допустимое число отключений для любого типа быстродействующих выключателей.

Список литературы

1. Горькин, А. В. Анализ работы коммутационных аппаратов тяговой подстанции постоянного тока в условиях прохождения электроподвижным составом изолирующих сопряжений под током [Текст] / А. В. Горькин // Материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием «Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте» / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2013. – С. 251 – 256.
2. Горькин, А. В. Анализ процессов изменения токов смежных фидеров при прохождении электроподвижным составом изолирующих сопряжений под током [Текст] / А. В. Горькин // Материалы науч.-практ. конф. «Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте» / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2014. – С. 290 – 296.
3. Правила содержания тяговых подстанций, трансформаторных подстанций и линейных устройств системы тягового электроснабжения [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2016. – 96 с.
4. Техническое указание о порядке эксплуатации тяговых подстанций, оборудованных системой технического диагностирования [Текст]. Введено техническим указанием ОАО «РЖД» № ЦЭТ-2 (П-02/04) от 30.03.2004 / ОАО «РЖД». – М., 2004. – 14 с.

5. Техническое указание о внесении изменений в порядок эксплуатации тяговых подстанций, оборудованных системой технического диагностирования [Текст]. Введено техническим указанием ОАО «РЖД» № ЦЭТ-2/7 от 26.02.2008 / ОАО «РЖД». – М., 2008. – 18 с.

6. СТО РЖД 11.010-2013 «Электроустановки систем железнодорожного электроснабжения. Номенклатура физических величин, подлежащих контролю при постоянном техническом диагностировании» [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2013. – 7 с.

7. Горькин, А. В. Диагностика быстродействующих выключателей тяговых подстанций, оборудованных системой технического диагностирования [Текст] / А. В. Горькин // Материалы всерос. науч.-техн. конф. «Метрологическое и нормативное обеспечение качества и безопасности продукции» [Текст] / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. 2014. – С. 165 – 171.

8. Горькин, А. В. Обоснование увеличения межремонтных интервалов при эксплуатации быстродействующих выключателей постоянного тока тяговых подстанций, оборудованных системой технической диагностики / А. В. Горькин, А. М. Сапельченко, К. В. Писарев // Электроснабжение железных дорог: Межвуз. тематич. сб. науч. тр. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. 2016. – С. 6 – 10.

9. Горькин, А. В. Оценка технического состояния быстродействующих выключателей тяговых подстанций, оборудованных системой технического диагностирования [Текст] / А. В. Горькин // Вестник РГУПС / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. – Ростов-на-Дону. 2017. – № 2 (66). – С. 98 – 103.

10. Туманин, А. Е. Исследование и разработка метода оценки надежности работы выключателей в сложных электроэнергетических системах [Текст]: Дис... канд. техн. наук: 05.14.02 / Туманин Алексей Евгеньевич. – М., 2004. – 219 с.

11. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей [Текст] / Е. С. Вентцель – М.: Наука, 1969. – 576 с.

12. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников [Текст] / А. И. Кобзарь. – М.: Физматлит, 2006. – 816 с.

References

1. Gorkin A. V. The analysis of operation of switching offices of traction substation of a direct current in the conditions of passing by the electrorolling stock of the isolating interfaces alive [Analiz raboty kommutacionnyh apparatov tyagovoj podstancii postoyannogo toka v usloviyah prohozhdeniya ehlektropodvizhnym sostavom izoliruyushchih sopryazhenij pod tokom]. *Materialy vseros. nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar. uchastiem «Pribory i metody izmerenij, kontrolya kachestva i diagnostiki v promyshlennosti i na transporte»*. (Materials of the All-Russian scientific and technical conference with the international participation «Devices and methods of measurements, quality control and diagnostics in the industry and on transport»). Omsk. 2013. pp. 251 – 256.

2. Gorkin A. V. The analysis of processes of change of currents of adjacent feeders when passing by the electrorolling stock of the isolating interfaces alive [Analiz processov izmeneniya tokov smezhnyh fiderov pri prohozhdenii ehlektropodvizhnym sostavom izoliruyushchih sopryazhenij pod tokom]. *Materialy nauch.-prakt. konf. «Innovacionnye proekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte»* (Materials of the scientific and practical conference «Innovative Projects and Technologies in Education, the Industry and on Transport»). Omsk. 2014. pp 290 – 296.

3. *Pravila soderzhaniya tyagovyh podstancij, transformatornyh podstancij i linejnyh ustrojstv sistemy tyagovogo ehlektrosnabzheniya* (Rules of maintenance of traction substations, transformer substations and linear devices of system of traction power supply), Moscow, JSC «Russian Railways», 2016, 96 p.

4. *Tekhnicheskoe ukazanie o poryadke ehkspluatacii tyagovyh podstancij, oborudovannyh sistemoj tekhnicheskogo diagnostirovaniya* (The technical instruction about a method of operation of the traction substations equipped with the test system), Moscow, JSC «Russian Railways», 2004, 14 p.

5. *Tekhnicheskoe ukazanie o vnesenii izmenenij v poryadok ehkspluatacii tyagovyh podstancij, oborudovannyh sistemoj tekhnicheskogo diagnostirovaniya* (The technical instruction on modification of a method of operation of the traction substations equipped with the test system), Moscow, JSC «Russian Railways», 2008, 18 p.

6. *STO RZHD 11.010-2013 «EHlektroustanovki sistem zheleznodorozhnogo ehlektrosnabzheniya. Nomenklatura fizicheskikh velichin, podlezhashchih kontrolyu pri postoyannom tekhnicheskoy diagnostirovanii»* (Electrical installations of railway power supply systems. Nomenclature of physical quantities subject to control under constant technical diagnosis), Moscow, JSC «Russian Railways», 2013, 7 p.

7. Gorkin, A. V. Diagnostics of high-speed switches of the traction substations equipped with the test system [Diagnostika bystrodejstvuyushchih vyklyuchatelej tyagovyh podstancij, oborudovannyh sistemoj tekhnicheskogo diagnostirovaniya]. *Materialy vsenos. nauch.-tekhn. konf. «Metrologicheskoe i normativnoe obespechenie kachestva i bezopasnosti produkcii»* (Materials of the All-Russian scientific and technical conference «Metrological and Standard Support of Quality and Safety of Production»). Omsk., 2014. pp. 165 – 171.

8. Gorkin, A. V. Justification of increase in between-repairs intervals at operation of high-speed switches of a direct current of the traction substations equipped with system of technical diagnostics [Obosnovanie uvelicheniya mezhremontnyh intervalov pri ehkspluatacii bystrodejstvuyushchih vyklyuchatelej postoyannogo toka tyagovyh podstancij, oborudovannyh sistemoj tekhnicheskoy diagnostiki]. *Mezhvuz. tematich. sb. nauch. trudov. «EHlektrosnabzhenie zheleznih dorog»* (The Interuniversity thematic collection of scientific works «Power supply of the railroads»). Omsk, 2016, pp. 6 – 10.

9. Gorkin, A. V. Assessment of the technical condition of high-speed switches of traction substations equipped with a technical diagnosis system [Ocenka tekhnicheskogo sostoyaniya bystrodejstvuyushchih vyklyuchatelej tyagovyh podstancij, oborudovannyh sistemoj tekhnicheskogo diagnostirovaniya]. *Journal of RSTU Bulletin*. 2017. № 2 (66). – pp. 98 – 103.

10. Tumanin, A. E. *Issledovaniye i razrabotka metoda otsenki nadezhnosti raboty vyklyuchatelej v slozhnykh elektroenergeticheskikh sistemakh* (Research and development of a method for assessing the reliability of circuit breakers in complex electric power systems). Thesis for a degree of the Doctor of Engineering, Moscow, 2004. 219 p.

11. Wentzel, E. S. *Teoriya veroyatnostey* (Probability Theory). Moscow: The science, 1969, 576 p.

12. Kobzar, A. I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov* (Applied mathematical statistics. For engineers and scientists). Moscow: FIZMATLIT, 2006, 816 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Горькин Артём Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (960) 991-23-56.

E-mail: wert_81_06_28@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gor'kin Artem Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Post-graduate student of the department «Rolling stock electric railway», OSTU.

Phone: +7 (960) 991-23-56.

E-mail: wert_81_06_28@mail.ru

Гателюк Олег Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Высшая математика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (902) 821-79-55.

E-mail: GatelukOV@omgups.ru

Gatelyuk Oleg Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in physical and mathematical sciences, Associate professor of the department "Higher Mathematics", OSTU.

Phone: +7 (902) 821-79-55.

E-mail: GatelukOV@omgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Горькин, А. В. Определение допустимого числа отключений быстродействующих выключателей в зависимости от величины и количества отключенных токов [Текст] / А. В. Горькин, О. В. Гателюк // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 4(32). – С 68 – 77.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Gor'kin A. V., Gatelyuk, O. V. Definition of admissible number of shutdowns of high-speed switches depending on the size and quantity of the disconnected currents. Journal of Transsib Railway Studies, 2017, vol. 32, no 4, pp. 68 – 77 (In Russian).

УДК 621.372.21: 681.3.068

Т. В. Ковалева, О. О. Комякова, Н. В. Пашкова

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

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ
ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА
С УЧЕТОМ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ**

Аннотация. Анализ волновых процессов в системе, включающей в себя линии электропередач, тяговые подстанции, тяговую сеть переменного тока и электроподвижной состав, необходим для точной оценки энергетических показателей ее работы. Сложность такого анализа заключается в том, что рассматриваемая система является разветвленной с сосредоточенными и распределенными параметрами. Входящий в нее электроподвижной состав представляет собой динамическую нагрузку. Предлагаемая математическая модель системы тягового электроснабжения переменного тока позволяет рассмотреть электромагнитные процессы в различных ее точках с учетом волновых процессов.

Ключевые слова: волновые процессы, система тягового электроснабжения переменного тока, математическая модель.

Tatiana V. Kovaleva, Olga O. Komyakova, Natalia V. Pashkova

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

**MATHEMATICAL MODEL OF THE RAILWAY TRANSPORT
ALTERNATING CURRENT TRACTION POWER SUPPLY
SYSTEM WITH WAVE PROCESSES CONSIDERATION**

Abstract. The analysis of wave processes in the system including electric transmission lines, traction substations, AC traction network and electric locomotives is necessary to accurately assess to energy performance of its work. This system contains concentrated and distributed parameters, consequently the analysis of such a system is difficult and the rolling stock which is also a part of this system represents a dynamic load. The proposed mathematical model of the alternating current traction power supply system allows us to consider electromagnetic processes at its various points taking into account wave processes.

Keywords: wave processes, railway transport alternating current traction power supply system, mathematical model.

Полигон электрифицированных железных дорог в РФ является одним из крупнейших в мире, его протяженность составляет более 43 тыс. км эксплуатационной длины. В то же время в условиях роста объемов перевозок наблюдается тенденция значительного физического старения устройств электрификации и электроснабжения, снижения надежности их работы. Наиболее сложная ситуация сложилась с полигоном контактной сети, где со сверхнормативным сроком эксплуатации работает около половины общей развернутой длины контактной подвески, а также с тяговыми подстанциями, где полной реконструкции требуют порядка 86 % тяговых подстанций.

В связи с этим ОАО «РЖД» ежегодно выделяет значительные средства на модернизацию контактной сети, реконструкцию, модернизацию и строительство тяговых подстанций, усиление устройств электроснабжения по программе «Обновление оборудования и устройств электроснабжения», а также на электрификацию новых участков. При этом следует отметить, что проектирование новых электрифицируемых участков, а также реконструкция и модернизация существующих неразрывно связаны с проведением электрических расчетов, в ходе которых определяются различные энергетические показатели работы системы тягового электроснабжения [1]. Решение указанной задачи в большинстве случаев основано на методах, которые представляют тяговую сеть как линию с сосредоточенными параметрами и не учитывают волновые процессы, которые имеют место в тяговых сетях переменного тока.

Целью настоящего исследования является разработка математической модели системы тягового электроснабжения переменного тока с учетом волнового характера электромагнитных процессов в ней.

Электрические железные дороги переменного тока представляют собой сложную систему, которая как электрическая цепь может быть представлена совокупностью распределенных (линии электропередач, тяговая сеть) и сосредоточенных (тяговые подстанции, электровагоны) параметров. Система электроснабжения может рассматриваться как соединение сосредоточенных и распределенных звеньев (рисунок 1), каждое из которых может быть представлено соответствующим активным или пассивным четырехполюсником [2]. В расчетном отношении преимущество схемы состоит в том, что результирующая математическая модель формируется по математическим моделям ее звеньев-четырёхполюсников.

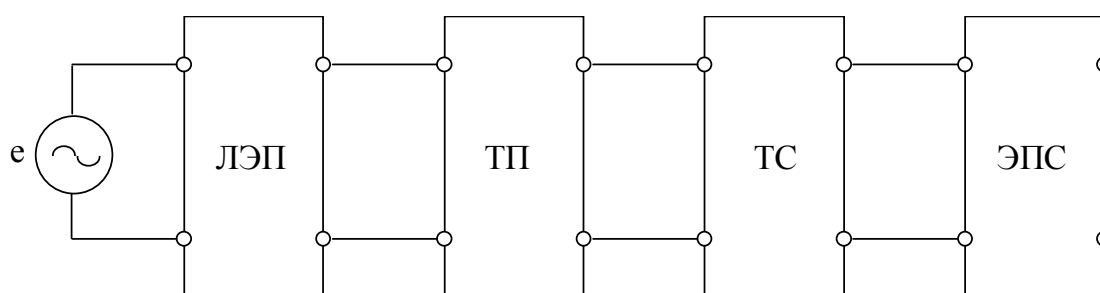


Рисунок 1 – Структурная схема участка электроснабжения при консольном питании:
ЛЭП – линии электропередачи; ТП – тяговая подстанция; ТС – тяговая сеть;
ЭПС – электроподвижной состав

Высшие гармонические составляющие тока ЭПС, волновые процессы в ЛЭП и тяговой сети обуславливают электромагнитное влияние системы на линии связи и устройства СЦБ.

Распространение волн приводит к потерям электроэнергии и ухудшению работы ЭПС. Оценка значений напряжения и тока в любой точке системы электроснабжения железных

дорог переменного тока позволит решить вопрос улучшения качества электроэнергии и электромагнитной совместимости, но в то же время является трудной многокритериальной задачей. Принципиальная схема участка системы тягового электроснабжения переменного тока приведена на рисунке 2 [3].

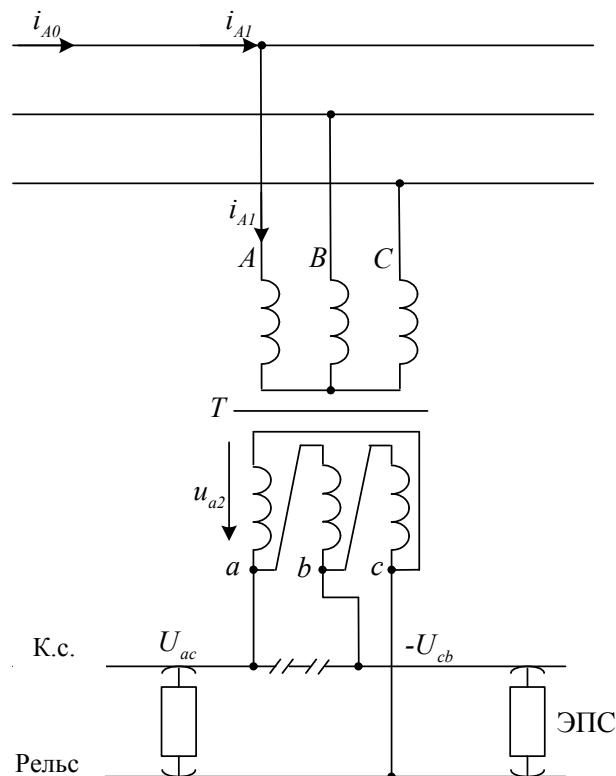


Рисунок 2 – Принципиальная схема участка системы тягового электроснабжения переменного тока

Тепловые потери энергии в линии обусловлены протеканием токов и явлением поверхностного эффекта. Эти потери учитываются при расчетах как активные сопротивления.

Электромагнитное поле, которое возникает под воздействием переменного тока, создает вдоль линии ЭДС самоиндукции и взаимной индукции между проводами линии. Токи смещения обусловлены емкостной проводимостью между проводами линии и между проводами и землей. На поверхности изоляторов возникают активные токи утечки. При плохих погодных условиях на некоторых участках ЛЭП высокого напряжения может возникнуть коронный разряд между проводами из-за снижения изоляции воздуха.

Перечисленные явления распределены равномерно по длине линии. ЛЭП и тяговая сеть как цепь с распределенными параметрами характеризуется первичными параметрами r_0 , g_0 , L_0 , C_0 , определяемыми на единицу длины. По первичным параметрам рассчитываются значения вторичных параметров: волнового сопротивления $Z_{\text{в}}$ и коэффициента распространения γ .

Участки тяговой сети представляются в виде однородной двухпроводной линии, а ЛЭП являются трехпроводной системой. Для приведения уравнений ЛЭП к виду уравнений двухпроводной линии был использован известный алгоритм [4]. Напряжение и ток в любой точке линии (тяговой сети, ЛЭП) определяются по выражениям:

$$\begin{cases} \underline{U}(x) = \frac{1}{2}(\underline{U}_1 + \underline{I}_1 \underline{Z}_B) e^{-\gamma x} + \frac{1}{2}(\underline{U}_1 - \underline{I}_1 \underline{Z}_B) e^{\gamma x}; \\ \underline{I}(x) = \frac{1}{2\underline{Z}_B}(\underline{U}_1 + \underline{I}_1 \underline{Z}_B) e^{-\gamma x} - \frac{1}{2\underline{Z}_B}(\underline{U}_1 - \underline{I}_1 \underline{Z}_B) e^{\gamma x}; \end{cases} \quad (1)$$

и

$$\begin{cases} \underline{U}(x) = \underline{U}_1 \operatorname{ch} \gamma x - \underline{I}_1 \underline{Z}_B \operatorname{sh} \gamma x; \\ \underline{I}(x) = \underline{I}_1 \operatorname{ch} \gamma x - \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_B} \operatorname{sh} \gamma x, \end{cases} \quad (2)$$

где $\underline{U}_1$ и $\underline{I}_1$ – значения напряжения и тока в начале линии.

В пределах межподстанционного участка тяговая сеть не является однородной. Имеет место чередование участков ее для перегонов и остановочных пунктов с различными погонными параметрами. Формирование волн напряжения и тока, как показали многочисленные экспериментальные исследования, в основном определяется интегральным влиянием параметров всего межподстанционного участка тяговой сети. Поэтому можно считать достаточным определение первичных параметров тяговой сети по результатам измерений для межподстанционной зоны в целом.

Тяговая сеть является сложной распределенной системой, поэтому единственный путь определения первичных параметров – использование результатов измерений в режимах холостого хода и короткого замыкания представляющего интерес участка тяговой сети. Параметры однотипных участков тяговых сетей различных зон сети железных дорог различаются несущественно. Проведение измерений первичных параметров на действующих участках затруднено и технически, и организационно. Поэтому простейший путь состоит в использовании уже имеющихся данных.

Представление линии как цепи с распределенными параметрами значительно усложняет анализ электромагнитных процессов. Для упрощения расчетов линии протяженностью до 300 км иногда представляют в виде схем с сосредоточенными параметрами [5].

Параметры линии электропередачи определяются с помощью метода зеркальных изображений [6]. Для определения параметров линий используется система «провод – земля» (рисунок 3). В этой системе земля выступает в качестве обратного провода. Можно найти такую эквивалентную двухпроводную линию, индуктивность которой будет равна индуктивности реальной системы «провод – земля» с землей в качестве обратного провода и с переменной плотностью тока в сечении земли. Расстояние между проводами этой эквивалентной двухпроводной линии D_3 , называемое эквивалентной глубиной возврата тока через землю, может быть определено по формуле, предложенной Карсоном:

$$D_3 = \frac{2,085}{\sqrt{f \cdot \gamma_3}} \cdot 10^{-3}, \quad (3)$$

где f – частота тока, Гц; γ_3 – удельная проводимость земли, См · м.

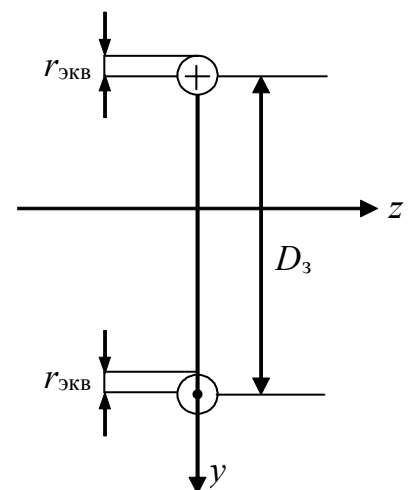


Рисунок 3 – Система «провод – земля» для определения параметров линии электропередачи

Эквивалентная глубина возврата тока с увеличением частоты и проводимости земли снижается. При $f = 50$ Гц и $\gamma_3 = 10^{-6}$ См·м расстояние $D_3 = 935$ м. Обычно при отсутствии данных о проводимости земли принимают $D_3 = 1000$ м.

Индуктивное сопротивление 1 км эквивалентной двухпроводной линии можно определить по формуле

$$x_L = j \cdot 0,145 \cdot \lg \frac{D_3}{r_{\text{экв}}}, \quad (4)$$

где $r_{\text{экв}}$ – эквивалентный радиус провода, который для алюминиевых и сталеалюминиевых проводов равен $0,95r$, при этом r – фактический радиус провода.

Активное сопротивление системы «провод – земля» складывается из сопротивлений провода $r_{\text{п}}$ и земли r_3 :

$$r = r_{\text{п}} + r_3, \quad (5)$$

где $r_3 = \pi^2 f \cdot 10^{-4}$, при частоте $f = 50$ Гц сопротивление $r_3 = 0,05$ Ом/км.

Активное сопротивление земли зависит от частоты. Проводимость земли влияет на распределение плотности тока, а общие потери активной мощности в земле остаются неизменными.

Таким образом, полное сопротивление 1 км системы «провод – земля»

$$\underline{Z}_{\text{л}} = r_{\text{п}} + r_3 + j \cdot 0,145 \cdot \lg \frac{D_3}{r_{\text{экв}}}. \quad (6)$$

Сопротивление провода воздушной линии определяется по формуле

$$r_{\text{п}} = r_0 \cdot \ell, \quad (7)$$

где r_0 – первичное сопротивление линии, Ом/км; ℓ – длина линии, км.

Сопротивление r_0 находится в зависимости от температуры провода t° :

$$r_0 = r_{020} [1 + 0,004(t^\circ - 20^\circ)], \quad (8)$$

где r_{020} – сопротивление провода при температуре 20°C .

Емкостная проводимость воздушной линии определяется по формуле

$$b_{\text{п}} = b_0 \cdot \ell, \quad (9)$$

где b_0 – первичная емкостная проводимость линии, См/км.

Зная емкостную проводимость, можно рассчитать значение емкости.

Следует обратить внимание на то, что сопротивления ЛЭП приводятся к напряжению тяговой сети:

$$Z_{\text{тс}} = Z_{\text{л}} \frac{1}{(U_{\text{л}}/U_{\text{н}})^2}, \quad (10)$$

где $U_{\text{л}}$ – номинальное линейное напряжение ЛЭП, кВ; $U_{\text{н}}$ – номинальное напряжение шин на тяговой подстанции.

Параметрами Т-образной схемы замещения двухобмоточного трансформатора (рисунок 4, а) являются активные (r_1 , r_2) и индуктивные (x_{s1} , x_{s2}) сопротивления обмоток, активная проводимость ($g_{\text{т}}$), вызванная потерями активной мощности в стали трансформато-

ра, и индуктивная проводимость (b_T) за счет намагничивающего тока [7]. Из-за незначительной величины тока в параллельной части схемы замещения для упрощения расчетов можно применять Г-образную схему замещения трансформатора (рисунок 4, б).

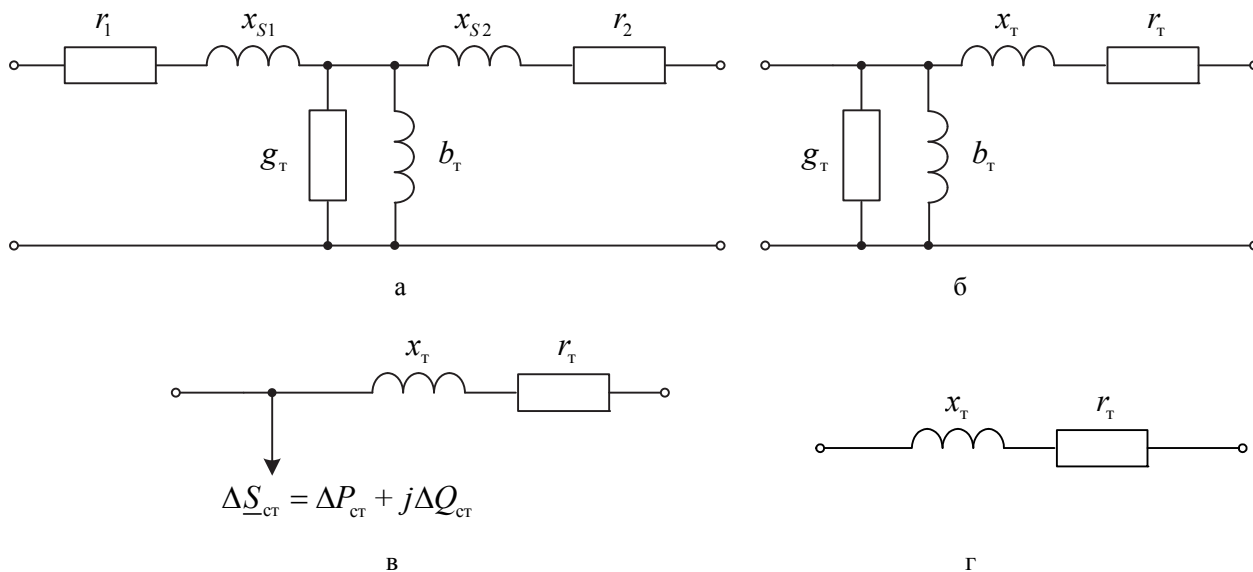


Рисунок 4 – Схемы замещения двухобмоточного трансформатора: Т-образная (а), Г-образная (б), Г-образная преобразованная (в) и схема для упрощенного расчета (г)

Для получения Г-образной преобразованной схемы замещения (рисунок 4, в) проводимости трансформатора заменяют нагрузкой, равной по величине мощности его холостого хода (х.х):

$$\Delta \underline{S}_{\text{ст}} = \Delta P_{\text{ст}} + j \Delta Q_{\text{ст}}, \quad (11)$$

где $\Delta P_{\text{ст}}$ – потери мощности в стали, равные потерям в режиме х.х трансформатора;

$\Delta Q_{\text{ст}}$ – намагничивающая мощность трансформатора:

$$\Delta Q_{\text{ст}} = \frac{I_{\text{х.х}}}{100} S_{\text{ном.т}}, \quad (12)$$

где $I_{\text{х.х}}$ – ток в режиме х.х в процентах от номинального тока трансформатора;

$S_{\text{ном.т}}$ – номинальная мощность трансформатора.

Схема для упрощенного расчета (рисунок 4, г) содержит только активное и индуктивное сопротивления трансформаторов.

Активное сопротивление обмоток двухобмоточного трансформатора рассчитывают через потери мощности в его обмотках $\Delta P_{\text{м}}$ в режиме номинальной нагрузки:

$$r_{\text{т}} = \frac{\Delta P_{\text{м}} U_{\text{ном.т}}^2 10^3}{S_{\text{ном.т}}^2}, \quad (13)$$

где $U_{\text{ном.т}}$ – номинальное напряжение трансформатора.

При расчетах потери мощности в обмотках трансформатора в режиме номинальной нагрузки принимаются равными потерям при коротком замыкании (к.з) при номинальном токе трансформатора, т. е. $\Delta P_{\text{м}} \approx \Delta P_{\text{к}}$.

Полное сопротивление обмоток трансформатора определяется по выражению

$$z_T = \frac{10u_k U_{\text{ном.Т}}^2}{S_{\text{ном.Т}}}, \quad (14)$$

где u_k – напряжение трансформатора в режиме к.з, %.

Зная активное r_T и полное z_T сопротивления обмоток трансформатора, найдем индуктивное сопротивление:

$$x_T = \sqrt{z_T^2 - r_T^2}. \quad (15)$$

Индуктивное сопротивление для мощных трансформаторов с небольшим активным сопротивлением определяется из приближенного условия:

$$x_T \approx z_T = \frac{10u_k U_{\text{ном.Т}}^2}{S_{\text{ном.Т}}}. \quad (16)$$

Сопротивления обмоток трансформатора определяются при номинальном напряжении для первичной и вторичной обмоток. Для трехобмоточного трансформатора активное и индуктивное сопротивления определяют, как и для двухобмоточного, для чего используют значения потерь мощности и напряжения к.з соответствующей обмотки.

Расчетная схема замещения электровоза переменного тока представлена на рисунке 5 [8].

На этой схеме r_1, L_{S1} – активное сопротивление и индуктивность рассеяния первичной обмотки трансформатора; r'_2, L'_{S2} – активное сопротивление и индуктивность рассеяния вторичной обмотки трансформатора, приведенные к числу витков первичной обмотки (приведенные параметры); r'_{10}, L'_{10} – активное сопротивление и индуктивность контура намагничивания. Параметры $r'_{\text{эк}}, L'_{\text{эк}}$ представляют собой сопротивление и индуктивность для режима коммутации выпрямителя, приведенные к напряжению тяговой сети. Эти параметры характеризуют режимы короткого замыкания трансформатора электровоза на соответствующих ходовых ступенях регулирования. На схеме замещения режимы коммутации моделируются замыканием коммутирующего элемента.

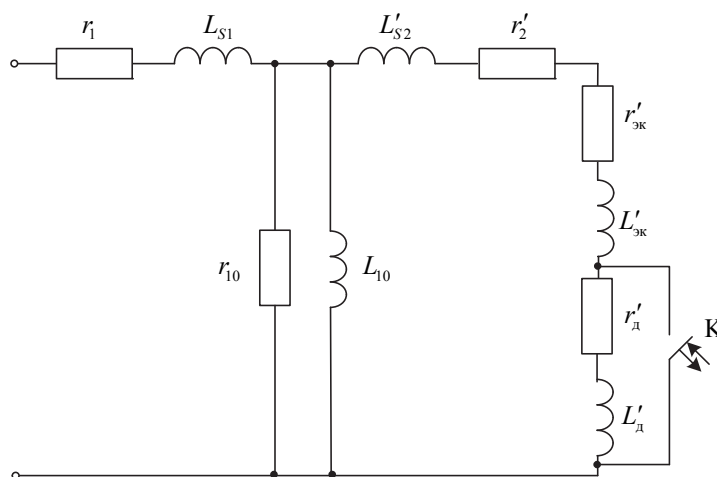


Рисунок 5 – Схема замещения силовых цепей электровоза для расчета волновых процессов в тяговых сетях

Переход из режима коммутации в режим нормальной работы имитируется размыканием коммутирующего элемента. При этом эквивалентные параметры на интервалах коммутации $r'_{\text{ЭК}}$ и $L'_{\text{ЭК}}$ замещаются параметрами $r_3 = r'_{\text{ЭК}} + r'_d$ и $L_3 = L'_{\text{ЭК}} + L'_d$, где r'_d и L'_d – приведенные параметры цепей выпрямленного тока.

Параметры режима коммутации рассчитываются по паспортным данным трансформатора, т. е. по номинальным напряжению и току, мощности потерь в режиме короткого замыкания и напряжения короткого замыкания.

Упрощенная расчетная схема участка тяговой сети, содержащая тяговый трансформатор и тяговую сеть в пределах межподстанционного участка при консольном питании, представлена на рисунке 6. Нагрузка от ЭПС имитируется двухполюсником, подключенным через трансформатор к контактной сети [9].

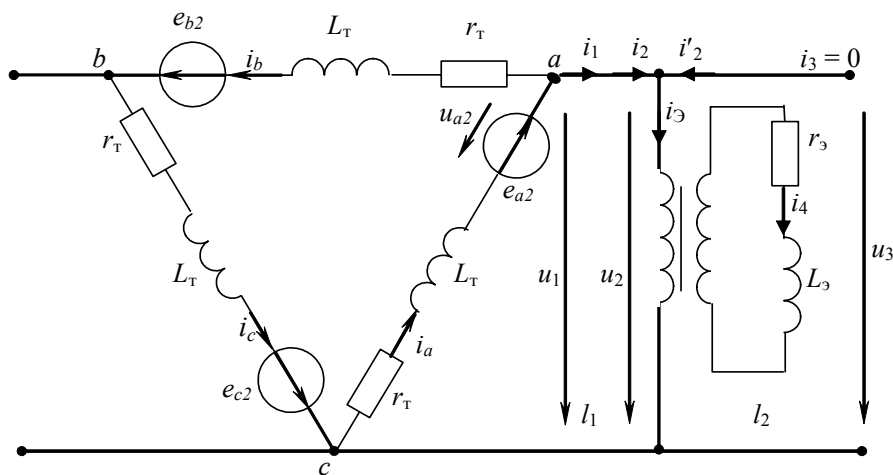


Рисунок 6 – Схема замещения участка электроснабжения при консольном питании ($i_3 = 0$)

Схема включает в себя схемы замещения вторичных обмоток понижающего трансформатора, участков сети между подстанциями и двухполюсника, имитирующего нагрузку от ЭПС на основной частоте.

Анализ электромагнитных процессов может быть проведен с помощью системы уравнений в комплексной форме, представляющей собой математическую модель системы электроснабжения участка тяговой сети переменного тока (консольное питание):

$$\begin{cases} \underline{U}_{A1} = \underline{U}_{A0} A_1 - \underline{I}_{A0} B_1; \quad \underline{I}_{A1} = \underline{I}_{A0} A_1 - \underline{U}_{A0} C_1; \\ \underline{U}_{a2} = k_{\text{тр}} \underline{U}_{A1}; \quad \underline{U}_1 = \underline{U}_{a2} - \frac{2}{3} \underline{I}_1 z_{\text{т}}; \\ \underline{U}_2 = A_2 \underline{U}_1 - B_2 \underline{I}_1; \quad \underline{I}_2 = -C_2 \underline{U}_1 + A_2 \underline{I}_1; \\ r_1 \underline{I}_3 + j\omega(L_{S1} + L_{10}) \underline{I}_3 + j\omega M_3 \underline{I}_4 = \underline{U}_2; \\ r'_2 \underline{I}_4 + j\omega(L'_{S2} + L_{10}) \underline{I}_4 + \underline{I}_4 (r_3 + j\omega L_3) = -j\omega M_3 \underline{I}_3; \\ \underline{I}_2 + \underline{I}'_2 - \underline{I}_3 = 0; \quad \underline{U}_3 = A_3 \underline{U}_2 - B_3 \underline{I}'_2; \quad \underline{I}_3 = -C_3 \underline{U}_2 + A_3 \underline{I}'_2, \end{cases} \quad (17)$$

где $\underline{U}_{A1}$, $\underline{I}_{A1}$ – напряжение и ток первичной обмотки фазы А понижающего трансформатора;

$\underline{U}_{A0}$, $\underline{I}_{A0}$ – напряжение и ток в начале участка расчетной фазы ЛЭП;

$A_1 = ch \gamma_l l$; $B_1 = Z_{bl} sh \gamma_l l$; $C_1 = \frac{1}{Z_{bl}} sh \gamma_l l$ – параметры четырехполюсника, представля-

ющего расчетную модель фазы ЛЭП;

$Z_{bl} = \sqrt{(R_{0l} + j\omega L_{0l}) / (G_{0l} + j\omega C_{0l})}$ – волновое сопротивление ЛЭП;

$\gamma_l = \sqrt{(R_{0l} + j\omega L_{0l})(G_{0l} + j\omega C_{0l})}$ – коэффициент распространения ЛЭП;

$R_{0l}, G_{0l}, L_{0l}, C_{0l}$ – первичные параметры ЛЭП, отнесенные к единице длины линии;

U_{a2} – напряжение вторичной обмотки фазы *ca* понижающего трансформатора;

$k_{тр} = \frac{w_1}{w_2}$ – коэффициент трансформации понижающего трансформатора с числом витков

w_1 и w_2 соответственно первичной и вторичной обмоток;

U_1, I_1 – напряжение и ток в начале расчетного участка тяговой сети;

U_2, I_2 – напряжение и ток в конце расчетного участка тяговой сети (точка, в которой находится ЭПС);

$A_2 = ch \gamma_{тс} l_1$; $B_2 = Z_{втс} sh \gamma_{тс} l_1$; $C_2 = \frac{1}{Z_{втс}} sh \gamma_{тс} l_1$ – параметры четырехполюсника, пред-

ставляющего расчетный участок тяговой сети;

$Z_{втс} = \sqrt{(R_{0тс} + j\omega L_{0тс}) / (G_{0тс} + j\omega C_{0тс})}$ – волновое сопротивление тяговой сети;

$\gamma_{тс} = \sqrt{(R_{0тс} + j\omega L_{0тс})(G_{0тс} + j\omega C_{0тс})}$ – коэффициент распространения тяговой сети;

$R_{0тс}, G_{0тс}, L_{0тс}, C_{0тс}$ – первичные параметры тяговой сети, отнесенные к единице длины линии;

I_3 – ток первичной обмотки трансформатора ЭПС;

I_4 – ток вторичной обмотки трансформатора ЭПС, приведенный к числу витков первичной обмотки;

$M_3 = k_{тр3} L_{10}$ – взаимная индуктивность обмоток трансформатора ЭПС;

$k_{тр3}$ – коэффициент трансформации трансформатора ЭПС;

I_2' – ток в начале участка тяговой сети, следующего за расчетным участком (за точкой подключения ЭПС);

U_3, I_3 – напряжение и ток в конце участка тяговой сети, следующего за расчетным участком (за точкой подключения ЭПС);

$A_3 = ch \gamma_{тс} l_2$; $B_3 = Z_{втс} sh \gamma_{тс} l_2$; $C_3 = \frac{1}{Z_{втс}} sh \gamma_{тс} l_2$ – параметры четырехполюсника, пред-

ставляющего участок тяговой сети, следующий за расчетным (за точкой подключения ЭПС).

Расчеты проводятся при следующих допущениях.

1. Фазы вторичных обмоток трансформаторов ТП моделируются двухполюсниками, включающими в себя источник ЭДС и собственное комплексное сопротивление обмотки $Z_r = r_r + j\omega L_r$.

2. Межподстанционные участки тяговой сети считаются однородными линиями; не учитывается различие первичных параметров сети на промежуточных станциях и разъездах.

3. ЭПС на основной частоте представляет собой нагрузку, имитируемую двухполюсником, с эквивалентным комплексным сопротивлением $\underline{Z}_\omega = r_\omega + j\omega L_\omega$. Эквивалентность понимается в том смысле, что схема замещения ЭПС может быть разветвленной и $\underline{Z}_\omega$ рассматривается как входное сопротивление такой системы.

Волновые процессы, протекающие в ЛЭП и ТС, учтены в уравнениях, составленных в строгой постановке задачи, как для цепей с распределенными параметрами. При помощи полученной системы уравнений можно выполнить расчет тока и напряжения в любой точке рассматриваемой цепи.

Таким образом, предложенная математическая модель для расчета электромагнитных процессов в тяговых сетях переменного тока дает возможность определения энергетических параметров системы тягового электроснабжения с учетом волновых процессов в ней. Предлагаемый подход может быть использован проектными организациями при проектировании новых и реконструкции имеющихся элементов системы электроснабжения в части проведения электрических расчетов, оценки требований по сопряжению системы тягового и внешнего электроснабжения, электромагнитной совместимости, качеству электрической энергии и определения параметров применяемого оборудования тяговых подстанций и контактной сети.

Список литературы

1. Вильгельм, А. С. Совершенствование метода расчета системы тягового электроснабжения переменного тока [Текст] / А. С. Вильгельм, А. А. Комяков, В. Л. Незевак // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2014. – № 3(19). – С. 54 – 65.
2. Исследование цепей с распределенными параметрами с использованием физических и математических моделей [Текст] / А. И. Гравер, Т. В. Ковалева и др. // Энергосберегающие технологии, контроль и управление для предприятий железнодорожного транспорта: Межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2015. – С. 30 – 36.
3. Тер-Оганов, Э. В. Электроснабжение железных дорог: Учебник [Текст] / Э. В. Тер-Оганов, А. А. Пышкин / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург, 2014. – 432 с.
4. Ковалева, Т. В. Исследование волновых процессов в контактной сети и линиях электропередачи [Текст] / Т. В. Ковалева, Н. В. Пашкова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2015. – № 2(22). – С. 71 – 79.
5. Ключкова, Н. Н. Расчет электропитающих сетей: Учебное пособие [Текст] / Н. Н. Ключкова, А. В. Обухова / Самарский гос. техн. ун-т. – Самара, 2013. – 146 с.
6. Теоретические основы электротехники. Нелинейные электрические цепи. Электромагнитное поле: Учебное пособие [Текст] / Под ред. Г. И. Атабекова. – СПб: Лань, 2010. – 432 с.
7. Вольдек, А. И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: Учебник [Текст] / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб: Питер, 2008. – 320 с.
8. Ковалева, Т. В. Исследование электромагнитных процессов в системе «тяговая сеть – электровоз» [Текст] / Т. В. Ковалева, Н. В. Пашкова // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте: Материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2016. – С. 208 – 213.
9. Пашкова, Н. В. Математическая модель для расчета нестационарных волновых процессов в контактных сетях системы тягового электроснабжения [Текст] / Н. В. Пашкова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2013. – № 4(16). – С. 63 – 69.

References

1. Vilgelm A. S., Komyakov A. A., Nezevak V.L. Improvement of the calculation method of traction power supply system of alternating current [Sovershenstvovanie metoda rascheta sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2014, no. 3(19), pp. 54 – 65.
2. Graver A. I., Kovaleva T. V., Pashkova N. V., Petukhova T. M. Distributed parameters circuits research using physical and mathematical models [Issledovanie cepej s raspredeennymi parametrami s ispol'zovaniem fizicheskikh i matematicheskikh modelej]. *Mezhvuzovskij sbornik nauchnyx trudov «Energoberegayushhie tekhnologii, kontrol i upravlenie dlya predpriyatij zheleznodorozhnogo transporta»* (Interuniversity collection of works «Energy saving technologies, control and management of railway industry enterprises»). Omsk, 2015, pp. 30 – 36.
3. Ter-Oganov E.V. *Elektrosnabzhenie zheleznyx dorog* (Electric power supply of railway transport). Ekaterinburg, 2014, 432 p.
4. Kovaleva T. V., Pashkova N. V. The wave processes study in the overhead system and power lines [Issledovanie volnovyx processov v kontaktnoj seti i liniyax elektroperedachi]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2015, no. 2(22), pp. 71 – 79.
5. Klochkova N. N., Obuhova A. V. *Raschet elektropitayushhix setej* (Calculation of supply networks). Samara, 2013, 146 p.
6. Atabekov G. I. *Teoreticheskie osnovy elektrotexniki. Nelinejnye elektricheskie cepi. Elektromagnitnoe pole* (Theoretical bases of electrical engineering. Nonlinear electrical circuits. Electromagnetic field). St. Petersburg, 2010, 432 p.
7. Voldek A. I. *Elektricheskie mashiny. Vvedenie v elektromexaniku. Mashiny postoyannogo toka i transformatory* (Electric machines. Introduction to electromechanics. DC machines and transformers). St. Petersburg, 2008, 320 p.
8. Kovaleva T. V., Pashkova N. V. Investigation of electromagnetic processes in the system «traction network - electric locomotive» [Issledovanie elektromagnitnyx processov v sisteme «tyagovaya set – elektrovoz»]. *Materialy vtoroj vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem «Pribory i metody izmerenij, kontrolya kachestva i diagnostiki v promyshlennosti i na transporte»* (Materials of the second All-Russian scientific and technical conference with international participation «Instruments and methods of measurement, quality control and diagnostics in industry and transport»). Omsk, 2016, pp. 208 – 213.
9. Pashkova N. V. Mathematical model for calculating nonsteady wave processes in the overhead lines of traction power supply [Matematicheskaja model' dlja rascheta nestacionarnyx volnovyx processov v kontaktnyx setjah sistemy tjagovogo jelektrosnabzhenija]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2013, no. 4(16), pp. 63 – 69.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ковалева Татьяна Владимировна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: (3812) 31-06-88.

E-mail: tatevgeniy@list.ru

Комякова Ольга Олеговна

Омский государственный университет путей

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kovaleva Tatiana Vladimirovna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Cand. Tech. Sci., the senior lecturer of the department «Theoretical the electrical engineer», OSTU.

Phone: (3812) 31-06-88.

E-mail: tatevgeniy@list.ru

Komyakova Olga Olegovna

Omsk State Transport University (OSTU).

сообщения (ОмГУПС)

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

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

Тел.: (3812) 31-06-88.

E-mail: Komyakovaoo@mail.ru

Пашкова Наталья Викторовна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: (3812) 31-06-88.

E-mail: nvp78@mail.ru

35, Marx av., Omsk 644046, Russia.

Cand. Tech. Sci., the senior lecturer of the department «Theoretical the electrical engineer», OSTU.

Phone: (3812) 31-06-88.

E-mail: Komyakovaoo@mail.ru

Pashkova Natalia Viktorovna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk 644046, Russia.

Cand. Tech. Sci., the senior lecturer of the department «Theoretical the electrical engineer», OSTU.

Phone: (3812) 31-06-88.

E-mail: nvp78@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Ковалева, Т. В. Математическая модель системы тягового электроснабжения переменного тока с учетом волновых процессов [Текст] / Т. В. Ковалева, О. О. Комякова, Н. В. Пашкова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 4(32). – С. 77 – 88.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kovaleva T. V., Komyakova O. O., Pashkova N. V. Mathematical model of the railway transport alternating current traction power supply system with wave processes consideration. Journal of Transsib Railway Studies, 2017, vol. 32, no 4, pp. 77 – 88 (In Russian).

УДК 621.332.33(043)

О. А. Лукьянова¹, С. В. Заренков², И. Л. Саля³

^{1,3} Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация,

²ООО «Техносканер», г. Омск, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СИЛЫ СУХОГО ТРЕНИЯ В УЗЛАХ КРЕПЛЕНИЯ ПОВОРОТНЫХ КОНСОЛЕЙ НА ИЗМЕНЕНИЕ НАТЯЖЕНИЯ ПО ДЛИНЕ АНКЕРНОГО УЧАСТКА ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННОЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ МАГИСТРАЛИ

Аннотация. Повышение скоростей движения на железнодорожных магистралях предъявляет жесткие требования к опорным и поддерживающим конструкциям контактной сети, а также к параметрам и показателям контактной подвески. Наличие сухого трения в узлах крепления консолей оказывает отрицательное влияние на точность регулировки проводов контактной подвески и на ее параметры. В статье приведены результаты исследований величины сухого трения в узлах крепления консоли в зависимости от типа контактной подвески и предложен способ уменьшения трения в узлах крепления консоли. Представлены результаты расчетов влияния трения в узлах крепления консоли на изменение натяжения по длине анкерного участка.

Ключевые слова: высокоскоростная магистраль, контактная сеть, контактная подвеска, натяжение, поддерживающие конструкции, консоль, узел крепления, сухое трение, коэффициент трения, подшипник.

Olesya A. Lukyanova¹, Semen V. Zarenkov², Ilya L. Salya³

^{1,3} Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation,

²LLC «Technoscaner», Omsk, the Russian Federation,

INVESTIGATION OF THE DRY FRICTION POWER INFLUENCE IN THE UNITS OF THE MOUNTING CONVOYS ON THE CHANGE OF ANCHOR SITE LENGTH TENSION OF THE OF THE ELECTRIFICATED RAILWAY

Abstract. *The traffic speed increasing on the railways makes strict requirements to the supporting and supporting structures of the contact network, as well as to the parameters and indicators of the contact suspension. The presence of dry friction in the cantilever attachment points indicates a negative effect on the accuracy of adjusting the wires of the contact suspension and on its parameters. The article presents the results of studies of the dry friction value in the console fastening points depending on the type of the contact suspension and suggests a method for reducing friction in the console attachment points. The results of calculations of the effect of friction in the console attachment points on the tension variation along the length of the anchor section are presented.*

Keywords: *high-speed main, contact network, contact suspension, tension, supporting structures, bracket, attachment point, dry friction, coefficient of friction, bearing.*

Высокоскоростная железнодорожная магистраль – это специализированная выделенная железнодорожная линия, обеспечивающая движение поездов со скоростью свыше 250 км/ч. В Российской Федерации в рамках реализации Программы организации скоростного и высокоскоростного железнодорожного сообщения до 2030 года предусмотрено создание сети скоростных и высокоскоростных маршрутов (высокоскоростных линий – порядка 4,3 тыс. км и скоростных линий – более 7,5 тыс. км) [1]. Ключевыми проектами высокоскоростных магистралей станут линии:

Москва – Казань – Екатеринбург, протяженность – 1 532 км;

Москва – Санкт-Петербург, протяженность – 659 км;

Москва – Ростов-на-Дону – Адлер, протяженность – 1 540 км.

Для достижения высоких скоростей движения требуется обеспечить надежный токосъем, т. е. качественную передачу электроэнергии токоприемнику. Контактная сеть представляет собой комплекс устройств для передачи электроэнергии от тяговых подстанций к электроподвижному составу через токоприемники. Контактная подвеска – система проводов контактной сети, взаимное расположение которых, способ механического соединения, материал и сечение обеспечивают необходимое качество токосъема. Конструкция контактной подвески определяется целесообразностью, эксплуатационными условиями (максимальной скоростью движения, наибольшей силой тока, снимаемого одним токоприемником), климатическими условиями. Необходимость обеспечения надежного токосъема при возрастающих скоростях движения и мощности электроподвижного состава определила изменение конструкций контактной подвески, а также поддерживающих и опорных устройств [2].

Консоли относятся к классу поддерживающих устройств контактной сети, предназначенных для закрепления проводов контактной подвески в определенном положении относительно оси пути, уровня головки рельса, земли и других сооружений. Консоли, установленные в любых климатических условиях, типах местности, контактной подвески должны обеспечивать перемещение проводов и тросов контактной подвески в вертикальной и горизонтальной плоскости, т. е. конструкция поворотного типа является обязательной при соблюдении требований, направленных на увеличение скоростей движения подвижного состава.

Беспрепятственное перемещение проводов вдоль анкерного участка является обязательным условием при температурной компенсации проводов, при этом необходимо учитывать, что изменение натяжения проводов и тросов по длине анкерного участка не должно превышать 5 % для скоростей движения электроподвижного состава свыше 250 км/ч.

В 2005 – 2009 гг. на участке Октябрьской железной дороги Лихославль – Калашниково были проведены эксперименты для определения натяжения контактных проводов и несущих

тросов контактной подвески КС-200-06, адаптированной для скоростей движения до 250 км/ч [3, 4].

Результаты экспериментов подтвердили изменение натяжения проводов и тросов по длине анкерных участков (минимальное значение натяжения контактных проводов и несущих тросов было зафиксировано в середине анкерного участка (рисунок 1)).

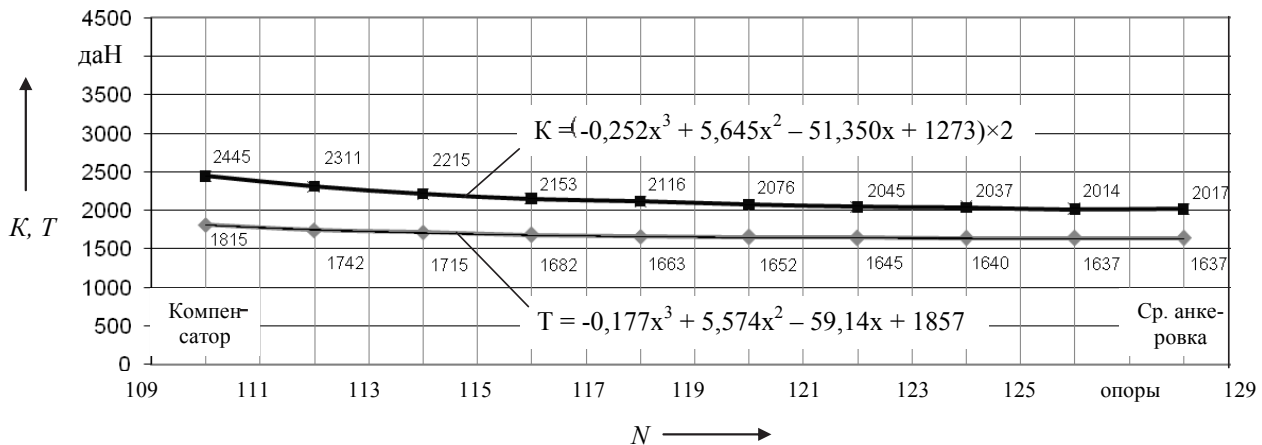


Рисунок 1 – Результаты измерения натяжения проводов и троса по длине анкерного участка:

T – натяжение несущего троса; K – натяжение контактных проводов;

N – номер опоры от компенсатора до средней анкеровки

Влияние климатических факторов на изменение натяжения проводов и тросов контактной подвески обусловлено нестабильностью температуры окружающей среды, осадками, наличием гололеда, ветровыми воздействиями [5, 6]. Влияние конструктивных факторов в данной области исследования (наличие трения в узлах крепления поворотных консолей, в элементах крепления контактного провода и несущего троса, в блочно-полиспасных компенсаторах, угол анкеруемой ветви) мало изучено в силу отсутствия методов их количественной оценки и большого разнообразия конструкции контактных подвесок. Узлы крепления консоли, как элементы конструкции контактной сети, установлены на каждой консольной и переходной опорах, причем на последних в количестве до трех пар (для скоростей движения до 400 км/ч). Поэтому суммарное влияние трения в узлах крепления консолей на изменение натяжения по длине анкерного участка может достигать значительного накопительного эффекта. Таким образом, решение данного вопроса является актуальной задачей при реализации высокоскоростного движения.

Возможность поворота консоли для перемещения проводов обеспечивает механизм узлов крепления, с помощью которых происходит присоединение консоли к опоре. На рисунке 2 представлена классификация узлов крепления консоли [7].

Установка узлов крепления в подавляющем большинстве случаев производится параллельно оси опоры, в зарубежных странах практикуют способ присоединения узла под углом к опоре таким образом, чтобы он являлся продолжением кронштейна.

При разнообразии типов узлы крепления имеют одинаковый принцип работы, основанный на вращении поворотной петли на вертикально установленной в скобе оси. Качество работы узлов крепления, т. е. обеспечение беспрепятственного поворота консоли в случае перемещения проводов контактной подвески, зависит от вертикальности положения шарниров относительно оси пути. Поэтому очень важным является соблюдение соосности и вертикальности узлов крепления при монтаже и в течение всего срока эксплуатации, а также своевременное устранение каких-либо отклонений от штатного положения. По длине анкерного участка устанавливается в среднем 20 опорных и поддерживающих конструкций. Для удо-

влетворительной компенсации температурного удлинения проводов и поддержания натяжения в пределах нормативных значений требуется обеспечить бесперебойную работу всех элементов. Момент сопротивления повороту определяется потерями на трение в шарнирах узлов крепления. Величина потерь на трение в паре «поворотная петля – ось» определяет сопротивление повороту консоли под действием несущего троса и оказывает существенное влияние на стабильность величины его натяжения. При заклинивании хотя бы одного узла крепления неизбежен сбой в функционировании устройств с последующим отклонением от норм параметров и показателей контактной сети.

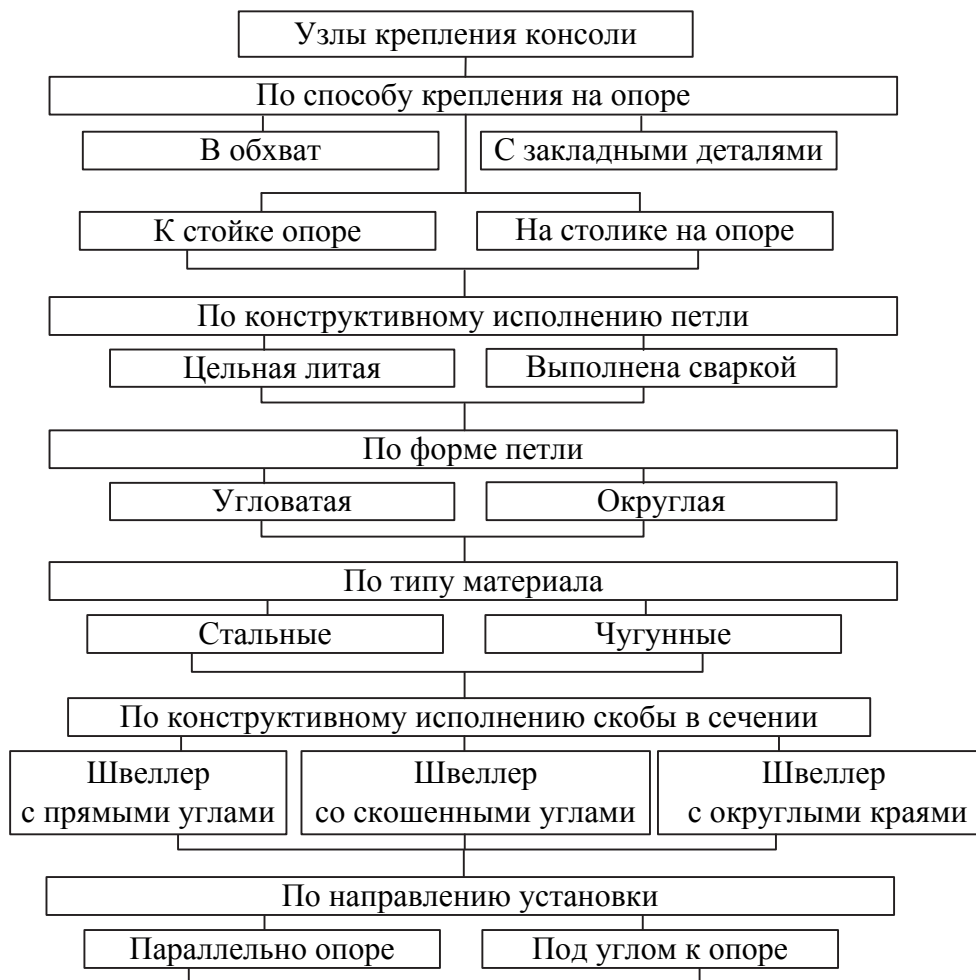


Рисунок 2 – Классификация узлов крепления консоли к опоре

Для предотвращения подобных последствий требуется уделить внимание данному вопросу и исследовать величину силы трения в узлах крепления консоли в зависимости от типа контактной подвески, а также предложить способ уменьшения силы трения в узлах крепления консоли.

В лаборатории «Конструкции контактных сетей, линий электропередачи и токосъема» Омского государственного университета путей сообщения на кафедре «Электроснабжение железнодорожного транспорта» разработан стенд (устройство) для исследования сухого трения в узлах крепления консоли (рисунок 3) [8]. Устройство предназначено для измерения силы трения в узлах крепления поворотной консоли. Устройство состоит из консоли, измерительного и возвращающего блоков, блока нагружения.

Консоль 1 посредством узлов крепления 2 устанавливается на опору или фрагмент опоры 3, закрепленный на основании 4. Узлы крепления выполнены с возможностью монтажа консоли постоянного или переменного тока на железобетонные или металлические стойки. В точке крепления несущего троса производится монтаж комплекса устройств, который состоит из трех частей: измерительного блока, возвращающего блока и блока нагружения. Измерительный блок состоит из троса 5, прикрепленного в точке крепления несущего троса, динамометра 6, лебедки 7 и измерительной шкалы 8. Возвращающий блок представляет собой пружину 9, жестко закрепленную одним концом на консоли в точке крепления несущего троса, а другим концом – на неподвижной балке. Блок нагружения представляет собой подставку с грузами 10, прикрепленную в точке крепления несущего троса, данный блок предназначен для имитации веса контактной подвески и позволяет исследовать трение в узлах крепления консоли различного типа.

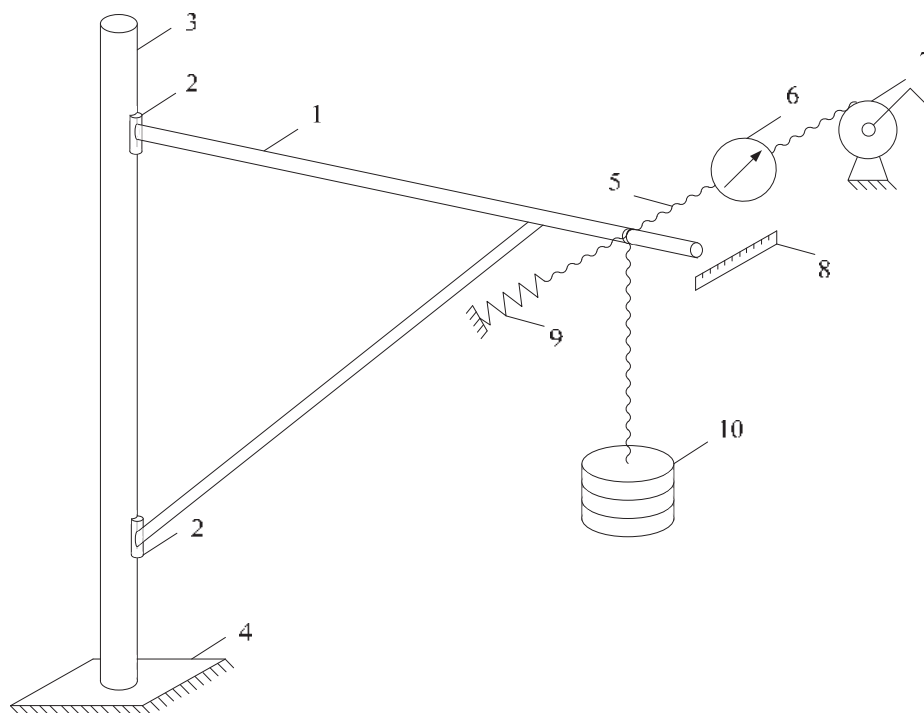


Рисунок 3 – Схема устройства для исследования трения в узлах крепления консоли

Принцип работы устройства. Посредством лебедки и троса на консоль прикладывается горизонтальное усилие, которое постепенно увеличивается. В момент сдвига консоли из первоначального положения, означающего достижение силы, приложенной к консоли, силы трения в шарнире, на динамометре фиксируется значение силы, с которой лебедка тянет трос. Затем посредством лебедки, троса и пружины производится возвращение консоли в исходное положение. Снятые показания динамометра заносятся в таблицу и используются для расчета коэффициентов трения испытываемых узлов крепления.

Для расчета коэффициентов трения в узлах крепления составлена математическая модель консоли. В штатном положении на консоль контактной сети действует внешняя нагрузка от веса контактной подвески, собственного веса консоли, ветрового воздействия на контактные провода и тросы и др. [9]. Указанная нагрузка передается на узлы крепления (кинематические пары), возникает трение, которое может быть учтено в дальнейших расчетах в виде момента сил трения. В зависимости от направления опорной реакции относительно оси

вращения различают вращательные кинематические пары с радиальной и осевой нагрузкой, т. е., в каждой из двух кинематических пар возникает момент сил трения, зависящий от осевой и от радиальной составляющей опорной реакции.

Для определения нагрузок составляется расчетная схема, которая позволяет найти внешнюю нагрузку от веса самой консоли (рисунок 4).

На рисунке 4 положения центров масс отдельных элементов обозначены окружностями.

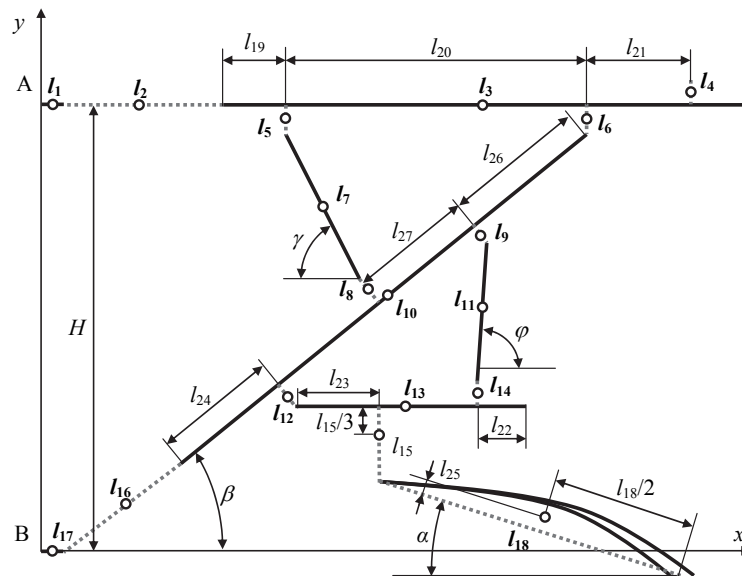


Рисунок 4 – Расчетная схема для определения центра массы консоли

Масса каждого элемента обозначена далее m_i (индекс i соответствует индексу длины l_i), а ее координаты в осях $хоу$ – y_{ci} и x_{ci} ($i \in 1; 18$). Из расчетной схемы получаем следующие соотношения для определения положения центра массы консоли (y_c, x_c):

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta = \arccos \left(\frac{l_2 + l_9 + l_{20}}{l_{10} + l_{16}} \right); \\ \gamma = \arctg \left(\frac{H - l_5 - (l_{10} + l_{16} - l_{26} - l_{27}) \sin \beta - l_8 \cos \beta}{l_{17} + (l_{10} + l_{16} - l_{26} - l_{27}) \cos \beta - l_8 \sin \beta - l_1 - l_2 - l_{19}} \right); \\ \phi = \arctg \left(\frac{H - l - l_{26} \sin \beta - l_9 \cos \beta + l_{12} \cos \beta - (l_{16} + l_{24}) \sin \beta}{(l_{10} - l_{24} - l_{26}) \cos \beta - l_9 \sin \beta - l_{12} \sin \beta - l_{13} + l_{22}} \right); \\ y_c = \frac{\sum_{i=1}^{18} y_{ci} \cdot m_i}{\sum_{i=1}^{18} m_i}; \\ x_c = \frac{\sum_{i=1}^{18} x_{ci} \cdot m_i}{\sum_{i=1}^{18} m_i}. \end{array} \right. \quad (1)$$

Далее составляется расчетная схема, которая позволяет найти опорные реакции, влияющие на момент сил трения (рисунок 5).

На рисунке 5 представлены следующие опорные реакции:

- X_A – радиальная опорная реакция в верхнем узле крепления;
- X_B – радиальная опорная реакция в нижнем узле крепления;
- Y_A – осевая опорная реакция в верхнем узле крепления;

- X_A – осевая опорная реакция в нижнем узле крепления.
- Кроме реакций на рисунке 5 представлены внешние нагрузки:
- P_K – вес консоли (для консоли КС-160 $P_K = 877$ Н);
- $P_{КП}$ – горизонтальная нагрузка от зигзага;
- $P_{НТ1}$ – вертикальная нагрузка от несущего троса;
- $P_{НТ2}$ – горизонтальная нагрузка от несущего троса.

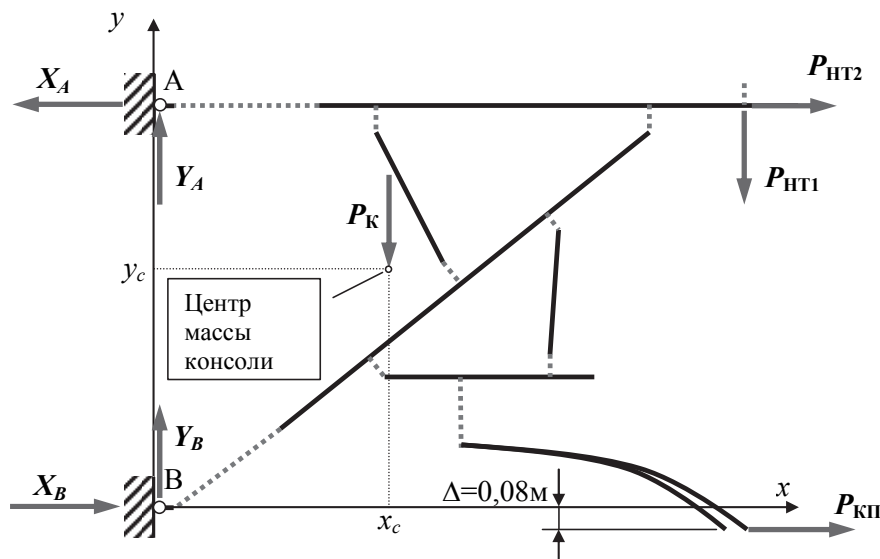


Рисунок 5 – Расчетная схема для определения опорных реакций

Для учета горизонтальных нагрузок от несущего троса T и расчета влияния момента сил трения $M_{тр}$ в шарнирах опоры на падение натяжения несущего троса ΔT составлена расчетная схема, представленная на рисунке 6.

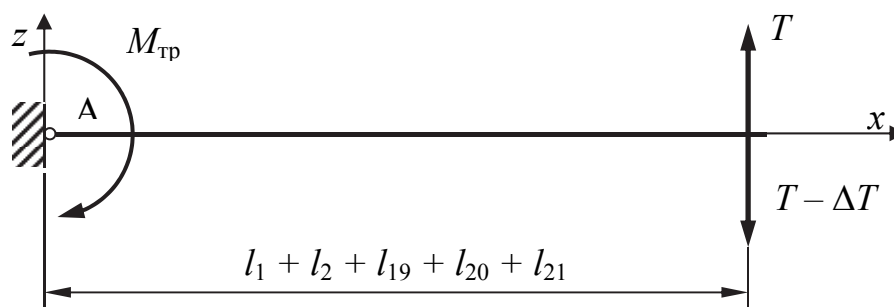


Рисунок 6 – Расчетная схема (вид сверху) для определения уменьшения силы натяжения несущего троса из-за сил трения в шарнирах опоры

Составив уравнения равновесия для расчетной схемы в осях x и y (рисунок 5), получаем следующие значения опорных реакций:

$$\begin{cases} Y_A = Y_B = \frac{1}{2}(P_K + P_{НТ1}); \\ X_A = \frac{1}{H}(P_{НТ1}(l_1 + l_2 + l_{19} + l_{20} + l_{21}) - P_{КП}\Delta + P_K x_c) + P_{НТ2}; \\ X_B = X_A - P_{НТ2} - P_{КП}. \end{cases} \quad (2)$$

При помощи полученных выражений для опорных реакций можно рассчитать момент сил трения в узлах крепления консоли согласно формулам (3) и (4):

$$M_{\text{тр}} = \frac{2(R^3 - r^2)}{3(R^2 - r^2)}(P_K + P_{\text{HT1}})f +$$

$$+ \left(\frac{1}{H} (P_{\text{HT1}}(l_1 + l_2 + l_{19} + l_{20} + l_{21}) - P_{\text{КП}}\Delta + P_K x_c) + P_{\text{HT2}} \right) \cdot r \cdot f_{\rho} +$$

$$+ \left(\frac{1}{H} (P_{\text{HT1}}(l_1 + l_2 + l_{19} + l_{20} + l_{21}) - P_{\text{КП}}\Delta + P_K x_c) - P_{\text{КП}} \right) \cdot r \cdot f_{\rho}. \quad (3)$$

где R и r – наружный и внутренний радиусы площадки трения в шарнире.

Формула (3) составлена с учетом трения скольжения двух типов поверхностей в шарнире: плоской (нижняя поверхность скольжения, коэффициент f) и цилиндрической (боковая поверхность скольжения, коэффициент f_{ρ}).

Для расчета момента сил трения в качестве коэффициентов сил трения f и f_{ρ} используются значения, полученные экспериментально.

Составив сумму моментов относительно точки A для расчетной схемы в осях x и z (рисунок 6), получаем следующее падение силы натяжения в опоре:

$$\Delta T = M_{\text{тр}} / (l_1 + l_2 + l_{19} + l_{20} + l_{21}). \quad (4)$$

Для получения исходных данных, используемых при расчете изменения натяжения проводов и тросов контактных подвесок, проведены экспериментальные исследования, в которых были задействованы стандартные узлы крепления (скобы в форме швеллера со скошенными углами и петли, выполненные при помощи сварки); стандартные узлы крепления, расклиненные в процессе эксплуатации; цельнолитые узлы крепления ЗАО «Универсал – контактные сети».

На рисунке 7 приведены испытываемые узлы крепления и также результаты расчетов на основе экспериментально полученных данных (коэффициенты трения по плоской f и цилиндрической f_{ρ} поверхностям) в зависимости от типа контактной подвески.

В результате расчетов было выявлено, что стандартные расклиненные узлы крепления имеют наибольшие значения коэффициентов сухого трения при вращении консоли. Узлы крепления, подвергнутые сильному износу в процессе эксплуатации и имеющие дефекты, необходимо заменять на исправные. Цельнолитые узлы крепления при вращении консоли имеют наименьшие значения коэффициентов сухого трения по сравнению со стандартными узлами крепления.

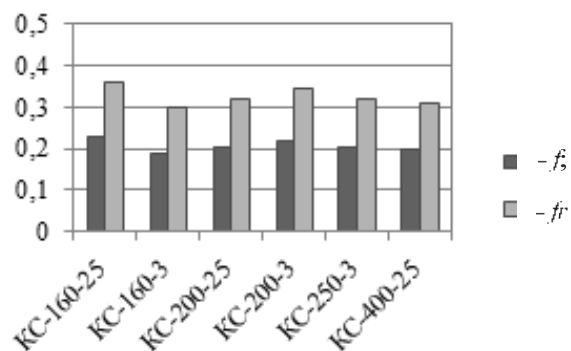
С целью уменьшения трения в узлах крепления консоли были проведены исследования. Величина момента трения в узлах крепления консоли определяется коэффициентом трения пары «сталь – сталь» и составляет 0,8. Применяемые узлы крепления являются необслуживаемыми, и в них не применяется смазка, что обуславливает сухой режим трения. Отсутствие защитной смазки вызывает коррозию соприкасаемых поверхностей и способствует значительному увеличению трения, что приводит к повышению значения момента сопротивления повороту консолей при температурном изменении длины несущего троса, это снижает стабильность натяжения несущего троса на длине анкерного участка и, в итоге, эффективность токосъема.

Для исключения перечисленных выше недостатков предлагается узел крепления консоли, имеющий конструкцию жестко закрепленной скобы на опоре, в которой установлены ось и поворотная петля, дополнительно снабдить подшипником скольжения, размещенным в по-

воротной петле и взаимодействующим с вертикальной осью [10]. Подшипник скольжения может быть выполнен из антифрикционного и силового слоев, обладает эффектом самосмазывания и не нуждается в обслуживании в течение всего срока эксплуатации. Коэффициент трения пары «сталь – подшипник» составляет 0,04. Для того чтобы выполнить исследования силы трения в предложенном, снабженном подшипником узле крепления, цельнолитые узлы крепления были дополнены подшипником из фторопласта. Коэффициент трения пары «сталь – фторопласт» составляет 0,04.



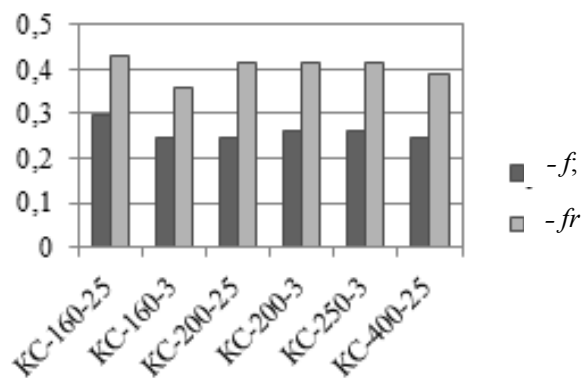
а



б



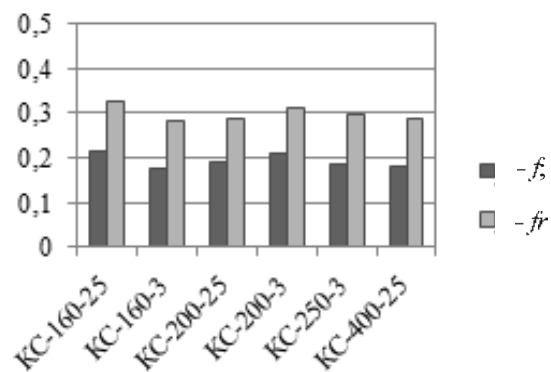
в



г



д



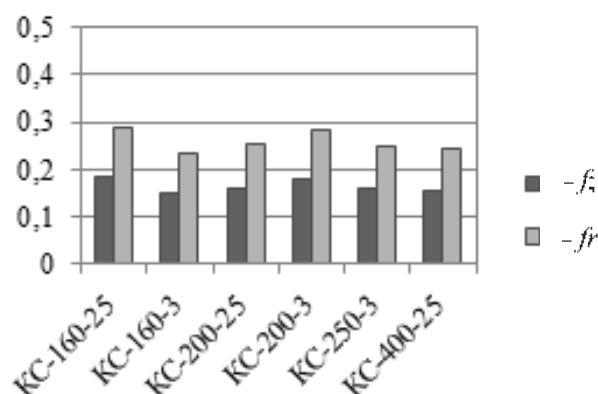
е

Рисунок 7 – Стандартные (а), стандартные расклиненные (в), цельнолитые (д) узлы крепления и соответствующие диаграммы коэффициентов трения (б, г, е)

На рисунке 8 приведены цельнолитой узел крепления, дополненный подшипником из фторопласта и результаты расчетов на основе экспериментально полученных данных (коэффициенты трения по плоской f и цилиндрической f_r поверхностям) в зависимости от типа контактной подвески.



а

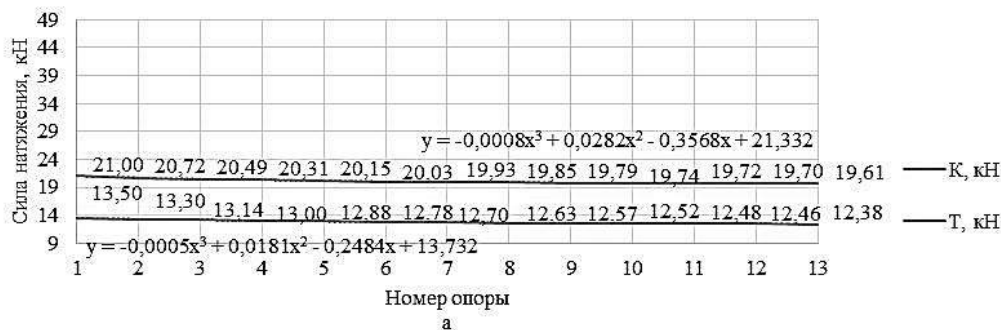


б

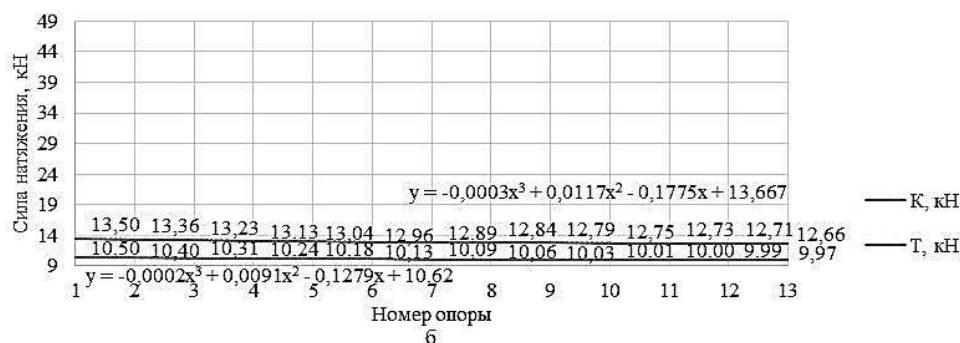
Рисунок 8 – Цельнолитой (а) узел крепления, дополненный подшипником из фторопласта, и диаграммы коэффициентов трения для данного узла крепления (б)

В результате расчетов было определено, что дополнение узла крепления подшипником из фторопласта позволило уменьшить значения коэффициентов сухого трения по плоской f и цилиндрической f_r поверхностям в среднем минимум в 1,18 и 1,16 раза соответственно.

На рисунках 9 – 12 представлены графики изменения натяжения по длине анкерного участка для контактных подвесок постоянного и переменного тока.



а



б

Рисунок 9 – График изменения натяжения по длине анкерного участка с учетом трения в узлах крепления консоли для контактной подвески КС-160 постоянного (а) и переменного (б) тока

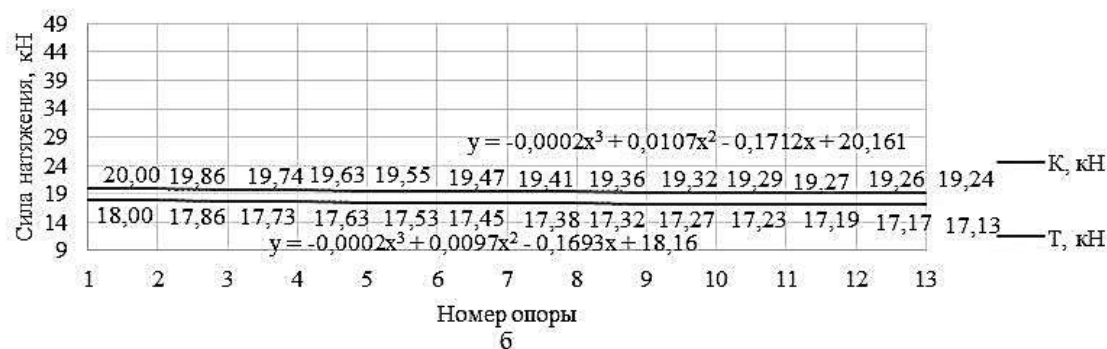
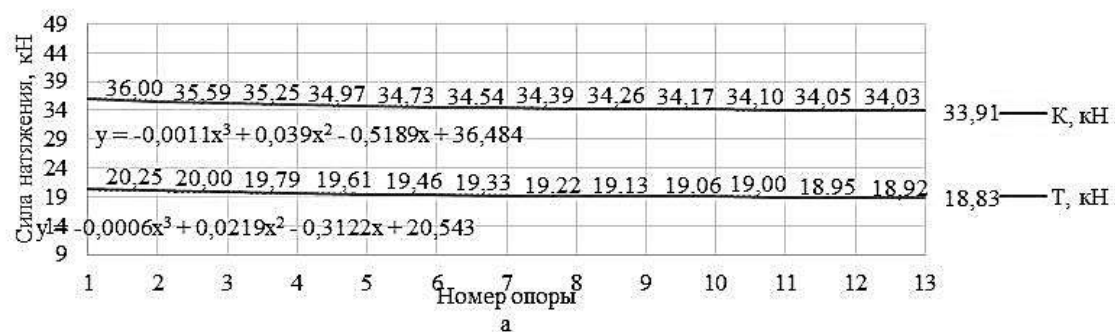


Рисунок 10 – График изменения натяжения по длине анкерного участка с учетом трения в узлах крепления консоли для контактной подвески КС-200 постоянного (а) и переменного (б) тока

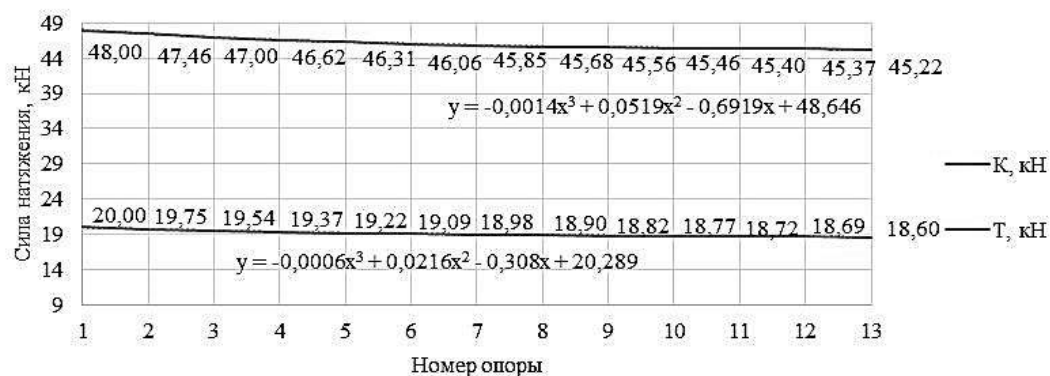


Рисунок 11 – График изменения натяжения по длине анкерного участка с учетом трения в узлах крепления консоли для контактной подвески КС-250 постоянного тока

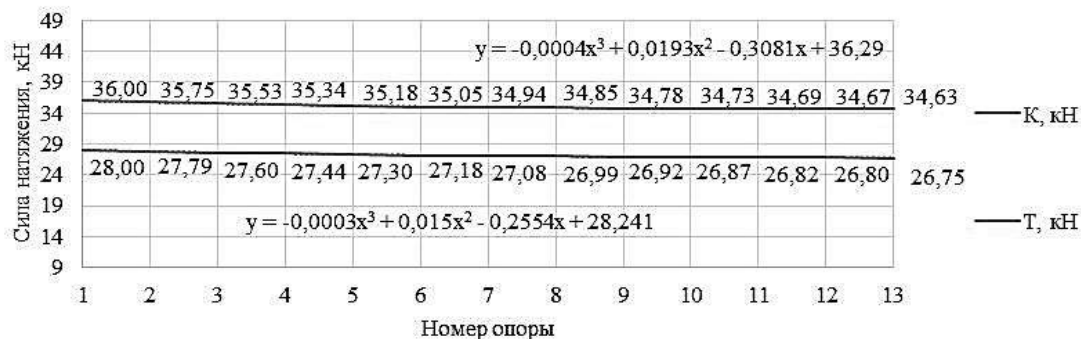


Рисунок 12 – График изменения натяжения по длине анкерного участка с учетом трения в узлах крепления консоли для контактной подвески КС-400 переменного тока

Согласно выполненным расчетам изменение натяжения по длине анкерного участка для отдельных типов контактных подвесок превышает нормы отклонения от номинального значения (таблица), что является недопустимым при высоких скоростях движения.

Изменение натяжения проводов контактных подвесок

Изменение натяжения, %	Тип контактной подвески					
	КС-160-3	КС-160-25	КС-200-3	КС-200-25	КС-250-3	КС-400
ΔK	6,62	6,22	5,81	3,80	5,79	3,81
ΔT	8,30	5,05	7,01	4,83	7,00	4,46
Допустимое $\Delta K, T, \%$	10,00	10,00	5,00	5,00	5,00	5,00

Данные результаты приведены для расчета изменения натяжения по длине анкерного участка прямого пути с вертикально выставленными опорами. Однако в условиях эксплуатации опорные и поддерживающие конструкции изменяют свое положение, оказывая влияние на численное значение натяжения и других параметров и показателей контактной подвески, что отрицательно сказывается на качестве токосъема и скорости движения подвижного состава. Предложено техническое решение, снижающее силу трения в узлах крепления консолей, что улучшает параметры токосъема при высокоскоростном движении.

Список литературы

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р. [Текст]. – М., – С. 6 – 10.
2. Сидоров, О. А. Исследование влияния натяжения проводов на качество токосъема [Текст] / О. А. Сидоров, С. В. Заренков, О. А. Ходунова // Вестник РГУПС / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. – Ростов-на-Дону. – 2013. – № 2 (50). – С. 54 – 60.
3. Заренков, С. В. Совершенствование методов расчета и измерения эластичности цепных контактных подвесок [Текст]: Дис... канд техн. наук / Заренков Семен Вальерьевич. – Омск, 2009. – С. 101 – 110.
4. Заренков, С. В. Совершенствование измерительных устройств и методов исследования влияния параметров контактной подвески на изменение натяжения проводов [Текст] / С. В. Заренков, О. А. Ходунова // Инновационный транспорт. – 2013. – № 1 (7). – С. 18 – 22.
5. Фрайфельд, А. В. Проектирование контактной сети. [Текст] / А. В. Фрайфельд, Г. Н. Брод. – М.: Транспорт, 1991. – 335 с.
6. Кудряшов, Е. В. Метод расчета эластичности контактной подвески на основе простой конечно-элементной модели. Измерения эластичности [Текст] / Е. В. Кудряшов, С. В. Заренков, О. А. Ходунова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2011. – № 4 (8). – С. 16 – 26.
7. Михеев, В. П. Контактные сети и линии электропередач [Текст] / В. П. Михеев. – М.: Маршрут, 2003. – 421 с.
8. Сидоров, О. А. Исследование влияния силы трения в узлах крепления поворотной консоли на изменение натяжения проводов по длине анкерного участка [Текст] / О. А. Сидоров, С. В. Заренков, О. А. Ходунова // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2013. – № 3 (38). – С. 103 – 106.
9. Марквардт, К. Г. Контактная сеть. [Текст] / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1994. – 335 с.
10. Пат. 143722 Российская Федерация, МПК В60М 1/23. Узел крепления консоли контактной подвески железной дороги на опоре [Текст] / Буталов С. Л., Беляев Н. В.; заявлено 11.02.2014; Опул. 27.07.2014. Бюл. № 21.

References

1. *Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v RF do 2030 goda. Rasporyazheniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 17 iyunya 2008 g. № 877-r* (Strategy for the development of rail transport in the Russian Federation until 2030. Order of the Government of the Russian Federation of June 17, 2008). № 877-r. pp. 6 – 10.
2. Sidorov O. A., Zarenkov S.V., Khodunova O. A. Investigation of the effect of wire tension on the quality of a current collector [Issledovaniye vliyaniya natyazheniya provodov na kachestvo tokos'yema]. *Vestnik RGUPS*, 2013, №2 (50). pp. 54 – 60.
3. Zarenkov S. V. *Sovershenstvovaniye metodov rascheta i izmereniya elastichnosti tsepnykh kontaktnykh podvesok* (Improvement of methods for calculating and measuring the elasticity of chain contact pendants). Thesis. Omsk, 2009. pp. 101 – 110.
4. Zarenkov S. V., Khodunova O. A. Perfection of measuring devices and methods for studying the influence of the parameters of the contact suspension on the change in the tension of the wires [Sovershenstvovaniye izmeritel'nykh ustroystv i metodov issledovaniya vliyaniya parametrov kontaktnoy podveski na izmeneniye natyazheniya provodov]. *Innovative transport*, 2013. №1 (7). pp. 18 – 22.
5. Freifeld A.V, Brod G. N. . *Proektirovaniye kontaktnoy seti. 3-e izd., pererab. i dop.* (Designing the contact network. 3rd ed., revised and additional). Moscow: Transport, 1991. 335 p.
6. Kudryashov E. V. Method for calculating the elasticity of the contact suspension based on a simple finite element model. Measurements of elasticity [Metod rascheta elastichnosti kontaktnoy podveski na osnove prostoy konechno-elementnoy modeli. Izmereniya elastichnosti]. *Izvestiya Transsiba*. 2011. № 4 (8). P. 16 – 26.
7. Mikheev V. P. *Proyektirovaniye kontaktnoy seti. 3-ye izd., pererab. i dop* (Contact networks and power lines). Moscow: Marshrut, 2003. 421 p.
8. Sidorov, O. A., Zarenkov S. V., Khodunova O. A. Investigation of the effect of frictional force in the nodes of fastening the rotary console on the change in the tension of wires along the length of the anchor section [Issledovaniye vliyaniya sily treniya v uzlakh krepleniya povorotnoy konsoli na izmeneniye natyazheniya provodov po dline ankernogo uchastka]. *Transport of the Urals*, 2013. №3 (38). pp. 103 – 106.
9. Marquardt K. G. *Kontaktnaya set'. 4-ye izd., pererab. i dop* [Contact network. 4 th ed., revised and additional]. Moscow: Transport, 1994. 335 p.
10. Butalov S. L., Belyaev N. V. *Patent RU 143722, IPC B60M 1/23*. 27.07.2014.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лукьянова Олеся Андреевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Преподаватель кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: fffoxx@mail.ru

Заренков Семен Валерьевич

ООО «Техносканер».

Октябрьская ул., 159, г. Омск, 644007, Российская Федерация.

Директор, кандидат технических наук.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lukyanova Olesya Andreevna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Teacher of the department «Power supply of Rail-road Transport», OSTU.

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

E-mail: fffoxx@mail.ru

Zarenkov Semyon Valerevich

LLC «Technoscaner».

159, Oktyabrskaya st., Omsk, 644007, the Russian Federation.

Director, Ph. D. in Engineering.

Саля Илья Леонидович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Информатика, прикладная математика и механика», ОмГУПС.

Salya Ilya Leonidovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Computer science, Applied Mathematics and Mechanics», OSTU.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Лукьянова О. А. Исследование влияния силы сухого трения в узлах крепления поворотных консолей на изменение натяжения по длине анкерного участка электрифицированной железнодорожной магистрали / О. А. Лукьянова, С. В. Заренков, И. Л. Саля // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 4(32). – С. 88 – 101.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Lukyanova O. A., Zarenkov S. V., Salia I. L. Investigation of the influence of the dry friction power in the units of the mounting convoys on the change of tension on the length of the anchor site of the electrified railway. Journal of Transsib Railway Studies, 2017, vol. 32, no 4, pp. 88 – 101 (In Russian).

УДК 621.331УДК 629.4

М. М. Никифоров, С. Ю. Ушаков, А. Л. Каштанов

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

ТЕХНОЛОГИЯ УЧЕТА РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНЫМ СОСТАВОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ТАКИМ КОМПЛЕКСАМ

Аннотация. В статье выполнен анализ текущего состояния учета электроэнергии на электроподвижном составе. Показаны основные недостатки существующей системы учета электроэнергии на тягу поездов. Представлены технические требования к информационно-измерительным комплексам учета электроэнергии для электроподвижного состава. Описаны технология учета потребления электроэнергии на тягу поездов при наличии на электроподвижном составе информационно-измерительных комплексов учета электроэнергии и порядок обработки результатов измерений, в том числе минимально необходимый перечень фиксируемых в процессе поездки параметров. Приведен порядок расчета расхода электроэнергии электроподвижным составом в границах произвольной зоны учета электроэнергии. Рассмотрены перспективы применения предложенных разработок на сети железных дорог для обеспечения мониторинга энергоэффективности перевозочного процесса.

Ключевые слова: тяга поездов, электроподвижной состав, учет электроэнергии.

Mikhail M. Nikiforov, Sergey Yu. Ushakov, Alexey L. Kashtanov

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

THE TECHNOLOGY OF ELECTRICITY ACCOUNTING ON THE ROLLING STOCK WITH THE USE OF INFORMATION-MEASURING COMPLEXES AND TECHNICAL REQUIREMENTS FOR SUCH COMPLEXES

Abstract. The article analyzes the current state of electricity measuring on the electric rolling stock. The main shortcomings of the existing electric power measuring systems for train traction are shown. The technical requirements for information-measuring systems of electricity accounting on electric rolling stock are presented. The technology of electricity accounting on the rolling stock with the use of information-measuring complexes and the procedure for pro-

cessing the measurement results are described. The minimum required list of fixing parameters during the trip is determined. The procedure for calculating the electric power consumption of electric rolling stock within the boundaries of an arbitrary electricity metering zone is given. The prospects of application of the proposed developments on the railway network are considered to provide monitoring of the transportation process energy efficiency.

Keywords: train traction, electric rolling stock, electric energy measuring.

Достоверность учета электроэнергии на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций и электроподвижного состава (ЭПС) является ключевым фактором, от которого зависит качество анализа, планирования и нормирования расхода электроэнергии на тягу поездов.

Вопросу обеспечения достоверности учета электроэнергии на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций традиционно уделяется основное внимание, так как именно по ним осуществляются расчеты за потребленную электроэнергию [1].

Важным критерием, характеризующим эффективность электропотребления на тягу поездов, является небаланс электроэнергии, отпущенной с шин тяговых подстанций и потребленной ЭПС. Небаланс включает в себя технологическую и так называемую коммерческую составляющую, обусловленную погрешностями приборов учета электроэнергии, а также методическими ошибками и погрешностями, возникающими при определении расхода электроэнергии на тягу поездов [2, 3]. При этом основными причинами коммерческой составляющей небаланса являются устаревшая приборная база учета электроэнергии на ЭПС и традиционно применяемые способы сбора и обработки данных о расходе электроэнергии на тягу поездов [4].

С целью снижения коммерческой составляющей небаланса электроэнергии на тягу поездов, а также совершенствования системы анализа эффективности ее использования был разработан и запатентован способ определения расхода электроэнергии ЭПС в границах произвольной зоны учета [5]. На основании этого способа была разработана концепция совершенствования учета электроэнергии на тягу поездов, позволяющая создать автоматизированную систему мониторинга энергоэффективности перевозочного процесса в границах произвольного участка железной дороги [6, 7].

В настоящее время выполнены теоретические и экспериментальные исследования по оценке эффективности внедрения автоматизированных систем учета электроэнергии на фидерах контактной сети тяговых подстанций [8, 9]. Однако организовать полноценную систему мониторинга энергоэффективности перевозочного процесса не представляется возможным по следующим причинам:

- нахождение в эксплуатации значительной доли морально и физически устаревших счетчиков электрической энергии с низким классом точности и высоким порогом чувствительности (более 50 % эксплуатируемых в настоящее время на ЭПС, принадлежащем ОАО «Российские железные дороги», счетчиков электроэнергии имеют классы точности 2,0 и ниже);

- частые отказы счетчиков электрической энергии;

- отсутствие масштабных преобразователей напряжения на электровозах переменного тока;

- уязвимость схем подключения средств измерения электроэнергии для несанкционированного вмешательства извне;

- низкая функциональность средств измерения электроэнергии;

- значительное влияние на результат измерений человеческого фактора вследствие отсутствия автоматизации процесса сбора и обработки информации о потреблении электроэнергии;

- применение расчетных методов распределения расхода электроэнергии между соседними железными дорогами на участках взаимозаездов локомотивных бригад.

Анализ перечисленных причин показывает, что возникла необходимость разработки и внедрения на ЭПС, принадлежащем ОАО «Российские железные дороги», а в перспективе и

на приватном подвижном составе, который станет обращаться на путях общего пользования, современных информационно-измерительных комплексов (ИИК), которые были бы лишены указанных выше недостатков, а также соответствовали бы требованиям, предъявляемым к системам коммерческого учета электроэнергии.

Для формирования единого подхода к обеспечению учета электроэнергии на ЭПС в Омском государственном университете путей сообщения были разработаны, согласованы и утверждены распоряжением ОАО «РЖД» № 3226р от 31 декабря 2014 г. технические требования к автоматизированным информационно-измерительным комплексам учета электроэнергии на тяговом подвижном составе.

С целью обеспечения необходимой точности измерений электроэнергии, соответствующей коммерческому учету, устанавливаются следующие требования к элементам ИИК ЭПС:

- класс точности блока учета (счетчика) электроэнергии при измерениях – не хуже:

- по активной энергии: 0,5S по ГОСТ 30206-94 для переменного тока и ГОСТ 10287-83 для постоянного тока;

- по реактивной энергии: 1,0 по ГОСТ 26035-83;

- классы точности первичных измерительных преобразователей (ПИП) тока и напряжения – не ниже 0,5;

- потери напряжения во вторичной измерительной цепи не должны превышать 0,25 % номинального вторичного напряжения ПИП.

Для защиты информации от несанкционированного доступа в ИИК ЭПС должны быть реализованы как физические средства защиты (пломбирование открывающихся корпусов измерительных блоков и клеммников электрических цепей ПИП напряжения и тока), так и программные (наличие системы паролей и разграничения доступа пользователей к изменению параметров, времени и данных, шифрование информации при ее передаче через беспроводные каналы связи, автоматическая регистрация в электронных журналах всех событий, связанных с изменениями параметров настройки, коррекции данных или системного времени).

Помимо основной задачи – измерения расхода и возврата электроэнергии подвижным составом за поездку – растущие потребности компании в сфере управления энергетической эффективностью перевозочного процесса диктуют необходимость существенного расширения функционала бортовых информационно-измерительных комплексов. Основные функции ИИК ЭПС, устанавливаемые техническими требованиями, и основное назначение их использования приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Функции ИИК ЭПС

Функция ИИК ЭПС	Основное назначение
1	2
Измерение следующих электрических величин: действующих значений тока (со знаком) и напряжения, средние значения активной (со знаком) и реактивной мощности (по четырем квадрантам), расхода и возврата активной и реактивной энергии нарастающим итогом	Учет активной и реактивной энергии, анализ изменения электрических параметров ЭПС в зависимости от режимов вождения поездов, режимов работы системы тягового электроснабжения и поездной обстановки
Регистрация географических координат местоположения ЭПС по данным спутниковых навигационных систем GPS/ГЛОНАСС, даты и времени, получаемых от системы обеспечения единого времени (СОЕВ)	Возможность привязки измеряемых электрических величин ко времени и местоположению ЭПС
Обеспечение возможности выбора следующих интервалов усреднения результатов измерения электрических величин: 1 с, 3 с или 1 мин	Определение расхода и возврата электроэнергии в границах произвольной зоны учета, формирование профилей тока, напряжения на токоприемнике и мощности ЭПС по ходу его движения

Окончание таблицы 1

1	2
Обеспечение беспроводного канала связи между секциями одного ЭПС	Возможность сбора информации об общем электропотреблении, значении тока и мощности ЭПС, в том числе работающего по системе многих единиц
Возможность записи измеряемых и регистрируемых параметров и их хранения во внутренней памяти до 35 суток	Последующий анализ измеряемых и регистрируемых параметров

Еще одна важная функция ИИК ЭПС – возможность беспроводной передачи измеряемых и регистрируемых параметров на сервер обработки данных в режиме реального времени – должна реализовываться путем оснащения ИИК интерфейсами связи (протоколами передачи данных), обеспечивающими информационное взаимодействие с внешними устройствами (в частности устройствами беспроводной передачи данных, в том числе входящими в состав других бортовых комплексов): RS-485, RS-232, CAN, Ethernet, WLAN, GPRS, GSM. Данная функция позволит выполнять оперативный анализ данных по электропотреблению и других электрических параметров, а также исключит влияние человеческого фактора на процесс сбора, передачи и обработки информации.

Обработка данных, полученных с ИИК ЭПС, позволяет определять потребление и объем рекуперации электроэнергии в границах произвольной зоны учета как по отдельному локомотиву, так и за любой произвольный промежуток времени по всем локомотивам, проследовавшим по участку. В качестве зон учета электроэнергии принимаются следующие: межподстанционные зоны (далее – МПЗ), дистанции электроснабжения (далее – ЭЧ), полигоны железных дорог (далее – ЖД), тарифные зоны (далее – ТЗ), поездоучастки (далее – ПУ), пути отстоя (далее – ПО), нормируемые участки (далее – НУ).

Разработанная технология обработки данных ИИК ЭПС, также утвержденная к использованию на сети железных дорог ОАО «Российские железные дороги» распоряжением старшего вице-президента ОАО «РЖД» В. А. Гапановича № 3226р от 31 декабря 2014 г., включает в себя следующее:

- перечень параметров, подлежащих фиксации ИИК ЭПС, и способы их фиксации;
- описание способов считывания и передачи информации с ИИК ЭПС на сервер;
- порядок обработки информации, полученной с борта ЭПС, и форму представления данных для расчета электропотребления в зонах учета;
- алгоритм определения расхода и рекуперации электроэнергии ЭПС в границах зон учета;
- алгоритм определения расхода электроэнергии ЭПС в режиме простоя на путях отстоя;
- методику замещения данных в условиях неисправности ИИК ЭПС.

Минимальный перечень параметров, достаточный для выполнения расчетов, предусмотренных Технологией, определяется поставленной целью определения значений расхода и рекуперации электроэнергии ЭПС за различные периоды времени в границах различных зон учета. Помимо непосредственно информации о значениях расхода и рекуперации ЭПС указанный перечень должен содержать информацию, позволяющую однозначно идентифицировать принадлежность измеренных значений к конкретным ЭПС, локомотивной бригаде, поезду, зоне учета электроэнергии и периоду времени.

По способу получения в ИИК ЭПС фиксируемые параметры подразделяются на импортируемые и измеряемые [10]. Импортируемые параметры заносятся во внутреннюю память ИИК ЭПС каждой секции при его монтаже на борт подвижного состава. К ним относятся серия и номер ЭПС. Измеряемые параметры получают путем измерения величин с использованием различных датчиков и модулей ИИК ЭПС. Все измеряемые параметры фиксируются с заданным интервалом ΔT и сохраняются в памяти ИИК ЭПС.

Учет расхода и рекуперации электроэнергии ЭПС осуществляется отдельно. Для пассажирских электропоездов и электропоездов дополнительно определяется значение расхода электроэнергии на энергообеспечение пассажирских вагонов.

Для организации передачи информации с ИИК ЭПС предполагается использование технологической ремонтно-оперативной радиосвязи ОАО «РЖД» (далее – РОРС) на базе подвижной радиотелефонной связи стандарта GSM в режиме GPRS с помощью бортовых GSM-модулей. Обмен информацией осуществляется с помощью унифицированного протокола передачи данных по беспроводному каналу связи в сети РОРС GSM.

Сбор данных с ИИК ЭПС, их обработка и хранение осуществляются на серверах верхнего уровня ОАО «РЖД». Если ИИК ЭПС не оснащены устройствами ГЛОНАСС/GPS/GALILEO (в случаях, когда на борту ЭПС уже имеются устройства аналогичного назначения в составе других бортовых комплексов, отвечающие техническим требованиям, предъявляемым к таким устройствам), соотнесение измеренных ИИК ЭПС параметров с географическими координатами осуществляется на сервере.

Также на сервере осуществляется сопоставление измеренных ИИК ЭПС параметров с границами зон учета электроэнергии по методу соотнесения результатов измерений количества электрической энергии (мощности) с навигационными и информационными сведениями, который был разработан в Омском государственном университете путей сообщения и утвержден для применения на сети железных дорог распоряжением старшего вице-президента ОАО «Российские железные дороги» В. А. Гапановича № 2339р от 16 ноября 2010 г., «Методика измерения электроэнергии (мощности) на тяговом подвижном составе». В соответствии с данным методом измеренные географические координаты местоположения ЭПС сопоставляются с географическими координатами границ зон учета электроэнергии.

База данных географических координат границ зон учета электроэнергии хранится на сервере баз данных ОАО «РЖД». Пример представления соответствия географических координат границам различных типов зон учета электроэнергии приведен в таблице 2.

Отнесение измеренных ИИК параметров к той или иной поездке в границах участка работы локомотивной бригады (далее – ЛБ) выполняется путем сопоставления их по времени, серии и номеру ЭПС с данными маршрута локомотивной бригады, полученными из АС ЦОММ. Для определения значений расхода электроэнергии при различных состояниях ЭПС (в режиме отстоя, при маневрировании на станции, при движении с поездом и т. д.) данные, полученные с ИИК ЭПС, соотносятся по времени, серии и номеру ЭПС с моментами изменения кодов состояния ЭПС, получаемыми из АСОУП.

В результате обработки на сервере формируется массив данных соотнесенных результатов измерения с данными маршрута локомотивной бригады, границами зон учета и кодами состояния ЭПС [10]. Определение значений расхода и рекуперации электроэнергии ЭПС в границах зон учета осуществляется на сервере.

Расход электроэнергии ЭПС в границах любой зоны учета за отчетный период в соответствии с рекомендациями работы [1] определяется по формуле:

$$W_{3y} = \sum_{s=1}^f \sum_{i=1}^q (W_{is} - W_{(i-1)s}), \quad (1)$$

где $(W_{is} - W_{(i-1)s})$ – измеренное значение приращения количества электроэнергии, потребленной ЭПС из контактной сети, за интервал измерения ΔT ;

q – количество интервалов измерения электроэнергии за время нахождения ЭПС в границах расчетной зоны учета в отчетном периоде;

f – количество ЭПС, находившихся в расчетной зоне учета в отчетном периоде.

Таблица 2 – Пример представления соответствия географических координат границ зон учета электроэнергетики

Наименование зоны учета	Код зоны учета	Географические координаты границ зон учета				
		граница 1	граница 2	граница 3	...	граница k
МПЗ						
МПЗ1	З ₁	Ф _{З11} ; λ _{З11}	Ф _{З12} ; λ _{З12}	—	—	—
МПЗ2	З ₂	Ф _{З21} ; λ _{З21}	Ф _{З22} ; λ _{З22}	—	—	—
...	...	...	...			
МПЗj	З _j	Ф _{Зj1} ; λ _{Зj1}	Ф _{Зj2} ; λ _{Зj2}	—	—	—
...	...	...	...			
Дистанции электроснабжения						
ЭЧ1	Э ₁	Ф _{Э11} ; λ _{Э11}	Ф _{Э12} ; λ _{Э12}	—	—	—
ЭЧ2	Э ₂	Ф _{Э21} ; λ _{Э21}	Ф _{Э22} ; λ _{Э22}	Ф _{Э23} ; λ _{Э23}	—	—
...	...	...	...	...	...	...
ЭЧj	Э _j	Ф _{Эj1} ; λ _{Эj1}	Ф _{Эj2} ; λ _{Эj2}	Ф _{Эj3} ; λ _{Эj3}	...	Ф _{Эjk} ; λ _{Эjk}
...	...	...	...	...	...	...
Полигоны железных дорог						
...	...	...	...	...	...	...
ЖДj	Ж _j	Ф _{Жj1} ; λ _{Жj1}	Ф _{Жj2} ; λ _{Жj2}	Ф _{Жj3} ; λ _{Жj3}	...	Ф _{Жjk} ; λ _{Жjk}
...	...	...	...	...	...	...
		граница 1	граница 2	граница 3	...	граница k
Тарифные зоны						
...	...	...	...	...	...	...
ТЗj	Т _j	Ф _{Тj1} ; λ _{Тj1}	Ф _{Тj2} ; λ _{Тj2}	Ф _{Тj3} ; λ _{Тj3}	...	Ф _{Тjk} ; λ _{Тjk}
...	...	...	...	...	...	...
Поездоучастки						
...	...	...	...	...	...	...
ПУj	П _j	Ф _{Пj1} ; λ _{Пj1}	Ф _{Пj2} ; λ _{Пj2}	—	—	—
...	...	...	...	...	...	...
Пути отстоя						
...	...	...	...	...	...	...
ПОj	О _j	Ф _{Оj1} ; λ _{Оj1}	Ф _{Оj2} ; λ _{Оj2}	—	—	—
...	...	...	...	...	...	...
Нормируемые участки						
...	...	...	...	...	...	...
НУj	Н _j	Ф _{Нj1} ; λ _{Нj1}	Ф _{Нj2} ; λ _{Нj2}	—	—	—
...	...	...	...	...	...	...

Аналогично формуле (1) определяются значения рекуперации (W_{3y}^R) и расхода электроэнергии на энергообеспечение пассажирских вагонов (W_{3y}^B) в границах расчетной зоны учета за отчетный период.

Расход электроэнергии между моментом времени сдачи ЭПС предыдущей локомотивной бригадой и моментом времени приема ЭПС следующей локомотивной бригадой (отмечены соответствующими кодами состояния локомотива в графе 10 таблицы 4) является расходом электроэнергии ЭПС без бригады. Общий расход электроэнергии ЭПС без бригады в границах зоны учета (за исключением участков работы локомотивных бригад) за отчетный период определяется по формуле:

$$W_{3y}^{BB} = \sum_{s=1}^{f1} \sum_{i=1}^{q1} (W_{is} - W_{(i-1)s}), \quad (2)$$

где $q1$ – количество интервалов измерения значений расхода электроэнергии за время нахождения ЭПС в границах расчетной зоны учета в отчетном периоде, ограниченных моментами времени сдачи ЭПС предыдущей локомотивной бригадой и моментами времени приема ЭПС следующей локомотивной бригадой;

$f1$ – количество ЭПС, находившегося в расчетной зоне учета в отчетном периоде в режиме простоя без бригады.

Аналогично формуле (2) определяется значение расхода электроэнергии на энергообеспечение пассажирских вагонов без бригады ($W_{3y}^{ББ}$) в границах зоны учета за отчетный период.

Значение общего расхода электроэнергии ЭПС в режиме простоя на путях отстоя за отчетный период определяется аналогично формуле (2).

Значение расхода электроэнергии в режиме ожидания ремонта, технического обслуживания или модернизации на путях отстоя за отчетный период определяется по формуле:

$$W_{ПО}^{о.рем.} = \sum_{s=1}^{f2} \sum_{i=1}^{q2} (W_{is} - W_{(i-1)s}), \quad (3)$$

где $q2$ – количество интервалов измерения значений расхода электроэнергии за время нахождения ЭПС на путях отстоя в отчетном периоде, ограниченных моментами сдачи его локомотивной или экипировочной бригадой перед постановкой в ремонт, на техническое обслуживание или модернизацию и окончанием ремонта, технического обслуживания или модернизации, отмечаемых в актах и книгах соответствующих форм согласно «Инструкции по учету локомотивов», утвержденной распоряжением первого вице-президента ОАО «РЖД» В. Н. Морозова № 2155р от 29 октября 2012 г., для электровозов и «Инструкции по учету наличия, состояния, ремонта, технического обслуживания, работы и использования ТПС», утвержденной распоряжением ОАО «РЖД» № 2293р от 11 ноября 2009 г., для МВПС; $f2$ – количество единиц ЭПС, находившихся на путях отстоя в отчетном периоде в режиме простоя.

Значение расхода электроэнергии в режиме ожидания работы на путях отстоя за отчетный период определяется по формуле:

$$W_{ПО}^{о.раб.} = \sum_{s=1}^{f2} \sum_{i=1}^{q3} (W_{is} - W_{(i-1)s}), \quad (4)$$

где $q3$ – количество интервалов измерения значений расхода электроэнергии за время нахождения ЭПС на путях отстоя в отчетном периоде, ограниченных моментом окончания ремонта, технического обслуживания или модернизации и моментом выдачи его на станцию.

В случае неисправности ИИК ЭПС приоритет в отношении средств учета значений расхода электроэнергии на ЭПС определяется следующим образом:

картриджи регистраторов параметров движения и автоведения или иных регистраторов параметров работы ЭПС (далее – регистратор параметров), содержащих информацию о значении расхода электроэнергии с привязкой к пути;

штатные счетчики электроэнергии.

При учете электроэнергии регистраторами параметров информация с картриджей в установленном в ОАО «РЖД» порядке передается на сервер, где выполняется соотнесение результатов измерения с данными маршрута локомотивной бригады, кодами состояния ЭПС и границами зон учета для конкретного ЭПС, в результате чего формируется таблица 4.

При учете значений расхода электроэнергии штатными счетчиками их показания заносятся машинистом в маршрут машиниста в установленном порядке. В итоге в АС ЦОММ формируются значения расхода электроэнергии в целом по поездке. Значение расхода электроэнергии по i -й поездке в расчетной зоне учета при этом определится по формуле:

$$W_{3y_i} = W_i \cdot \frac{\sum_{i=1}^x W'_{3y_i}}{\sum_{i=1}^x W'_i}, \quad (5)$$

где W_i – общий расход электроэнергии по поездке (по данным АС ЦОММ);

W'_i – общий расход электроэнергии по i -й поездке по аналогичному участку работы локомотивных бригад в предшествующем отчетном периоде (по умолчанию принимается один месяц); W'_{3y_i} – расход электроэнергии в расчетной зоне учета по результатам i -й поездки по аналогичному участку работы локомотивных бригад в предшествующем отчетном периоде;

x – количество i -х поездок по аналогичному участку работы локомотивных бригад в предшествующем отчетном периоде.

Рекуперация и расход электроэнергии на энергообеспечение пассажирских вагонов определяются по формуле, аналогичной (5).

Результаты расчета заносятся в таблицу той же формы, что и таблица 4. Однако в этом случае в столбцах 4 – 6 будут содержаться суммарные значения расхода (рекуперации) электроэнергии в границах минимальной зоны учета электроэнергии, пересекаемой данным ЭПС в ходе поездки. При этом в столбцах 3 и 11 будут заполнены лишь строки, совпадающие с началом и окончанием поездки локомотивной бригады, а столбцы 7 и 8 будут оставаться пустыми.

Разработанные в Омском государственном университете путей сообщения и утвержденные для внедрения на сети железных дорог технология учета расхода электроэнергии электроподвижным составом с использованием информационно-измерительных комплексов и технические требования к таким комплексам являются одной из составляющих разрабатываемой в настоящее время автоматизированной системы мониторинга энергоэффективности перевозочного процесса, внедрение которой, как ожидается, позволит

исключить коммерческую составляющую небаланса электроэнергии на тягу поездов;

обеспечить оценку эффективности использования электроэнергии на тягу поездов, в том числе и энергии рекуперации;

локализовать участки с повышенным уровнем потерь электроэнергии в элементах и оборудовании системы тягового электроснабжения.

Список литературы

1. Каштанов, А. Л. Повышение эффективности контроля электропотребления на тягу поездов и нетяговые нужды по данным АСКУЭ: Монография [Текст] / А. Л. Каштанов, М. М. Никифоров, И. Ю. Норкин / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – 118 с.

2. Хряков, А. А. Снижение коммерческой составляющей потерь электрической энергии на тягу поездов на полигоне постоянного тока [Текст] / А. А. Хряков, М. М. Никифоров // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2011. – № 1 (5). – С. 42 – 45.

3. Никифоров, М. М. Прогнозирование небаланса электрической энергии на тягу поездов в границах железных дорог [Текст] / М. М. Никифоров, С. Ю. Ушаков, А. Г. Зверев // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы науч. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2016. – С. 106 – 112.

4. Школьников, Е. Н. Коммерческий учет электрической энергии на электроподвижном составе [Текст] / Е. Н. Школьников, В. Т. Черемисин, С. Ю. Ушаков // Железнодорожный транспорт. – 2016. – № 8. – С. 50 – 54.

5. Пат. на изобретение № 2559408 Россия, МПК В60L3/00 (2006.01). Способ определения расхода электроэнергии электроподвижным составом в границах произвольной зоны учета / Каштанов А. Л., Незевак В. Л., Никифоров М. М., Пашков Д. В., Ушаков С. Ю., Черемисин В. Т.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – № 2014110567/11; заявл. 19.03.2014; опубл. 10.08.2015. Бюл. № 22.

6. Черемисин, В. Т. Концепция единой автоматизированной системы учета электрической энергии на тягу поездов [Текст] / В. Т. Черемисин, С. Ю. Ушаков, А. Л. Каштанов // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2013. – № 4 (39). – С. 83 – 86.

7. Этапы реализации автоматизированной системы мониторинга энергоэффективности перевозочного процесса [Текст] / В. Т. Черемисин, С. Ю. Ушаков и др. // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 3. – С. 45 – 49.

8. Черемисин, В. Т. Повышение энергетической эффективности электротяги при внедрении мониторинга электроэнергии на фидерах контактной сети [Текст] / В. Т. Черемисин, А. Л. Каштанов, М. М. Никифоров // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2015. – № 2 (45). – С. 67 – 70.

9. Никифоров, М. М. Перспективы повышения эффективности использования электроэнергии на тягу поездов при внедрении системы учета на фидерах контактной сети тяговых подстанций постоянного тока [Текст] / М. М. Никифоров, А. Л. Каштанов // Энергосберегающие технологии, контроль и управление для предприятий железнодорожного транспорта: Межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2015. – С. 18 – 23.

10. Черемисин, В. Т. Автоматизированный мониторинг энергетической эффективности работы электроподвижного состава ОАО «РЖД» / В. Т. Черемисин, С. Ю. Ушаков, Д. В. Пашков // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, – 2014. – № 3. – С. 87 – 91.

References

1. Kashtanov A. L., Nikiforov M. M., Norkin I. Yu. *Povysheniye effektivnosti kontrolya elektropotrebleniya na tyagu poyezdov i netyagovyye nuzhdy po dannym ASKUE* (Increasing the effectiveness of the electric power consumption for traction and non-traction needs control using the ASKUE data). Monograph. Omsk: OSTU, 2010, 118 p.

2. Khryakov A. A., Nikiforov M. M. Reduction of the electric energy losses commercial component in train traction at the DC railway [Snizheniye kommercheskoy sostavlyayushchey poter' elektricheskoy energii na tyagu poyezdov na poligone postoyannogo toka]. *Izvestiya Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*. 2011, no. 1 (5). pp. 42 – 45.

3. Nikiforov M. M., Ushakov S. Yu., Zverev A. G. Forecasting the imbalance of electric energy in train traction within the boundaries of railways [Prognozirovaniye nebalansa elektricheskoy energii na tyagu poyezdov v granitsakh zheleznikh dorog]. *Materialy nauchno-prakticheskoy konferencii: «Innovacionnye proekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte»* (Materials of the scientific-practical conference: «Innovative projects and technologies in education, industry and transport»). Omsk, 2016, pp. 106 – 112.

4. Shkolnikov E. N., Cheremisin V. T., Ushakov S. Yu. Commercial accounting of electric energy on the electric rolling stock [Kommercheskiy uchet elektricheskoy energii na elektropodvizhnom sostave] *Zheleznodorozhnyy transport – Railway transport*. 2016, no. 8, pp. 50 – 54.

5. Kashtanov A. L., Nezevak V. L., Nikiforov M. M., Pashkov D. V., Ushakov S. Yu., Cheremisin V. T. *Pat. for invention No. 2559408*, 08.10.2015.

6. Cheremisin V. T., Ushakov S. Yu., Kashtanov A. L. The concept of the unified automated system for train traction electrical energy accounting [Kontseptsiya yedinoi avtomatizirovannoy sistemy ucheta elektricheskoy energii na tyagu poyezdov] *Transport Urala – Urals Transport*. 2013, no. 4 (39), pp. 83 – 86.

7. Cheremisin V. T., Ushakov S. Yu., Pashkov D. V., Nikiforov M. M. Automated transportation process energy efficiency monitoring system realization stages [Etapy realizatsii avtomatizirovannoy sistemy monitoringa energo-effektivnosti perevoznogo protsessa] *Zheleznodorozhnyy transport – Railway transport*. 2015, no. 3, pp. 45 – 49.

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

9. Nikiforov M. M., Kashtanov A. L. Prospects for increasing the train traction electric energy using efficiency via the introduction of a metering system on the DC traction substations contact network feeders [Perspektivy povysheniya effektivnosti ispol'zovaniya elektro-energii na tyagu poyezdov pri vnedrenii sistemy ucheta na fiderakh kontaktnoy seti tyagovykh podstantsiy postoyannogo toka] *Mezhvuzovskiy tematicheskiy sbornik nauchnykh trudov: «Energosberegayushchiye tekhnologii, kontrol' i upravleniye dlya predpriyatiy zheleznodorozhnogo transporta»* (Interuniversity thematic collection of scientific works: «Energy-saving technologies, control and management for the enterprises of railway transport»). Omsk: OSTU, 2015, pp. 18 – 23.

10. Cheremisin V. T., Ushakov S. Yu., Pashkov D. V. Automated monitoring of the JSC Russian Railways electric rolling stock energy efficiency [Avtomatizirovanny monitoring energeticheskoy effektivnosti raboty elektropodvizhnogo sostava OAO «RZHD»] *Izvestiya Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*. 2014, no. 3, pp. 87 – 91.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Никифоров Михаил Михайлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, заместитель директора Научно-исследовательского института энергосбережения на железнодорожном транспорте Омского государственного университета путей сообщения.

Тел.: (3812) 44-39-23.

E-mail: nikiforovmm@rambler.ru

Ушаков Сергей Юрьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: (3812) 44-39-23.

E-mail: ushakovsj@gmail.com

Каштанов Алексей Леонидович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 44-39-23.

E-mail: kesh-al@rambler.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Никифоров, М. М. Технология учета расхода электроэнергии электроподвижным составом с использованием информационно-измерительных комплексов и технические требования к таким комплексам [Текст] / М. М. Никифоров, С. Ю. Ушаков, А. Л. Каштанов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 4(32). – С. 101 – 110.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikiforov Mikhail Mikhailovich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Cand.Tech.Sci, deputy director, Research Institute for Energy Efficiency in Railway Transport, Omsk State Transport University

Тел.: (381-2) 44-39-23

E-mail: nikiforovmm@rambler.ru

Ushakov Sergey Yurevich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

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

Phone: (3812) 44-39-23.

E-mail: ushakovsj@gmail.com

Kashtanov Alexey Leonidovich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

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

Phone: (3812) 44-39-23.

E-mail: kesh-al@rambler.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Nikiforov M.M., Ushakov S. Yu., Kashtanov A. L. The technology of electricity accounting on the rolling stock with the use of information-measuring complexes and technical requirements for such complexes. Journal of Transsib Railway Studies, 2017, vol. 32, no 4, pp. 101 – 110. (In Russian).

Д. В. Борисенко, И. В. Присухина, С. А. Лунев

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

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕЛЬСОВОЙ ЦЕПИ
ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ОБУЧАЮЩЕЙ ВЫБОРКИ
ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ МАШИННОЙ КЛАССИФИКАЦИИ**

Аннотация. Повышение эффективности систем мониторинга рельсовых цепей требует реализации в них автоматического анализа собираемой информации: например, автоматической классификации состояния рельсовой цепи. Эта задача может быть решена средствами машинного обучения. Необходимым компонентом при разработке и исследовании алгоритма машинного обучения является обучающая выборка. В этой статье мы рассматриваем принципы построения математической модели рельсовой цепи, которая позволяет сгенерировать такую выборку. В качестве примера, комбинируя существующие методики расчета рельсовых цепей, мы приводим модель кодовой рельсовой цепи 25 Гц и демонстрируем ее работу.

Ключевые слова: рельсовая цепь, математическая модель, система мониторинга, машинное обучение, классификатор, напряжение, ток.

Dmitry V. Borisenko, Iлона V. Prisukhina, Sergey A. Lunev

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

**A MATHEMATICAL MODEL OF A TRACK CIRCUIT
FOR DATA SET GENERATION
IN MACHINE CLASSIFICATION APPLICATIONS**

Abstract. The quality of a track circuit monitoring system is defined to the great extent by its ability to automatically analyse the acquired data, i. e. identify the state of a track circuit. Machine learning techniques can be applied to implement this functionality. Designing a machine learning algorithm requires a learning data set from the subject domain. In this article we discuss a basic principle of track circuit mathematical model design that could be used to generate such data set. We also apply this principle and a combination of some existing methods to design and demonstrate a mathematical model of the 25 Hz AC track circuit.

Keywords: track circuit, mathematical model, monitoring system, machine learning, classifier, voltage, current

Одной из приоритетных задач программы инновационного развития железнодорожного транспорта в России на период до 2020 г. является проект «Цифровая железная дорога» [1]. Задачами, подлежащими решению в рамках данного проекта, являются построение цифровых моделей объектов инфраструктуры (в том числе объектов железнодорожной автоматики) в едином координатно-временном пространстве и обеспечение их непрерывного мониторинга [1].

Важную роль в решении поставленных задач играют системы технического диагностирования и мониторинга (СТДМ) [2]. Однако существующий уровень автоматизации применяемых СТДМ позволяет решить лишь вопрос получения и накопления диагностической информации. В то же время переход к «малолюдным технологиям» требует от СТДМ выполнения интеллектуальных функций – автоматического анализа диагностической информации и повышения их роли в поддержке принятия решений.

Автоматизация анализа большого объема данных и реализация интеллектуальных функций СТДМ может быть выполнена на основе машинного обучения. Данная область науки представляет собой совокупность алгоритмов анализа данных, алгоритмов их классификации, а также построения моделей прогнозирования [3, 4]. Таким образом, исследования,

направленные на применение этих алгоритмов для анализа диагностической информации от объектов железнодорожной автоматики, являются актуальными.

Одним из основных объектов железнодорожной автоматики, на которых широко применяются СТДМ [5] и возможно внедрение машинного обучения, являются рельсовые цепи. Рассмотрим три основных режима их работы: нормальный, шунтовой и контрольный [6].

Необходимым условием для исследования возможности применения машинного обучения при классификации состояния рельсовой цепи является источник данных, описывающий ее работу во всех состояниях. В качестве источника данных может быть использована математическая модель рельсовой цепи. Такой подход вполне приемлем для целей демонстрации методов машинного обучения, особенно на ранних этапах исследований.

Требования, предъявляемые к модели рельсовой цепи. Для применения в качестве источника данных при обучении классификатора состояния рельсовой цепи ее модель должна позволять рассчитывать комплексные напряжения и токи на входе и выходе при изменении параметров рельсовой цепи. Набор этих параметров определяется моделируемым режимом. В таблице 1 для каждого режима работы рельсовой цепи приведены варьируемые параметры модели и рассчитываемые с ее помощью величины, на основе которых предлагается выполнять классификацию.

Таблица 1 – Расчетные и варьируемые параметры модели рельсовой цепи в зависимости от режима работы

Режим работы рельсовой цепи	Параметры модели	Рассчитываемые величины
Нормальный	Сопротивление изоляции $r_{из}$ Напряжение на входе $U_{вх}$	$ i_{вх} $ – амплитуда тока на входе $\arg(i_{вх})$ – фаза тока на входе
Шунтовой	Сопротивление изоляции $r_{из}$ Напряжение на входе $U_{вх}$ Координата поездного шунта $x_{ш}$	$ U_{вых} $ – амплитуда напряжения на выходе $\arg(U_{вых})$ – фаза напряжения на выходе
Контрольный	Сопротивление изоляции $r_{из}$ Напряжение на входе $U_{вх}$ Координата обрыва рельсовой нити $x_{обр}$	$ i_{вых} $ – амплитуда тока на выходе $\arg(i_{вых})$ – фаза тока на выходе

Фазу напряжения, подаваемого от источника питания на вход рельсовой цепи, принимаем равной нулю, относительно нее будут определены фазы рассчитываемых величин.

Четырехполюсник рельсовой цепи. При построении математической модели рельсовой цепи, удовлетворяющей заявленным требованиям, целесообразно применить существующие общепринятые методики, изложенные в работах [6 – 8]. Эти методики имеют вполне утилитарное назначение и служат для определения оптимальной величины питающего напряжения, выдаваемого в рельсовую цепь, при котором обеспечивается ее устойчивое функционирование во всех режимах. Однако приведенные в них математические модели рельсовой цепи позволяют решить и поставленную задачу.

В соответствии с источником [6] принимается допущение о том, что рельсовая цепь является четырехполюсником, а расчет ведется на основе матриц А-параметров образующих ее элементов. Обобщенная структура модели рельсовой цепи, учитывающей эти элементы, приведена на рисунке 1. Входом рельсовой цепи считаются точки 1 – 1', а выходом – точки 2 – 2' (см. рисунок 1).

Преобразование электрической энергии в рельсовой цепи в соответствии с используемой обобщенной моделью описывается матрицей А-параметров [9], которая на основе каскадного включения четырехполюсников (см. рисунок 1) определяется формулой

$$N_{рц} = N_n \times N_{рл} \times N_k, \quad (1)$$

где N_n , $N_{р.л}$ и N_k – матрицы А-параметров четырехполосников замещения аппаратуры начала рельсовой цепи, рельсовой линии и аппаратуры конца рельсовой цепи соответственно.

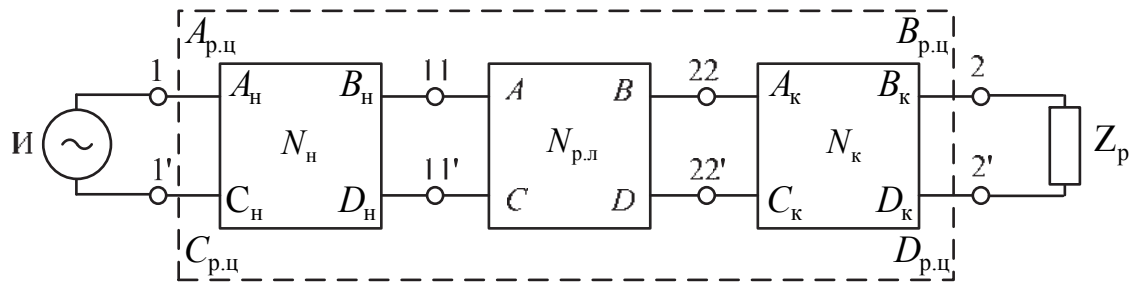


Рисунок 1 – Обобщенная электрическая схема одноканальной рельсовой цепи:
 N_n – четырехполосник, замещающий аппаратуру начала рельсовой цепи (питающий конец);
 $N_{р.л}$ – четырехполосник рельсовой линии; N_k – четырехполосник, замещающий аппаратуру конца рельсовой цепи (релейный конец); И – источник питания; Z_p – сопротивление нагрузки

Дальнейшее уточнение модели связано с учетом специфики конкретного типа рельсовой цепи. Авторами выбрана кодовая рельсовая цепь с частотой сигнального тока 25 Гц при электротяге переменного тока. Выбор обусловлен относительной простотой и распространенностью данного вида рельсовых цепей, их доступностью для проведения экспериментальных исследований.

Выбор типа рельсовой цепи определяет состав и способ включения аппаратуры начала и конца, а следовательно, и методику определения А-параметров четырехполосников N_n и N_k . Так, в соответствии с утверждением в работе [7] четырехполосник начала рельсовой цепи представляет собой каскадное включение четырехполосников ограничивающего резистора, изолирующего трансформатора, соединительных проводов между изолирующим трансформатором и дроссель-трансформатором и дроссель-трансформатора (рисунок 2).

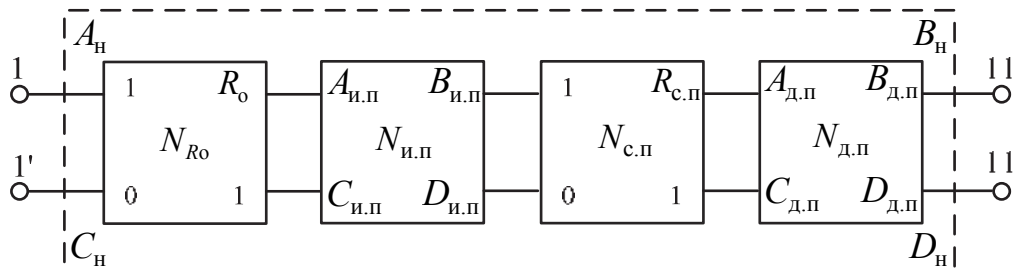


Рисунок 2 – Схема замещения устройств питающего конца рельсовой цепи:
 N_{R_0} – четырехполосник ограничивающего резистора; $N_{и.п}$ – четырехполосник изолирующего трансформатора питающего конца; $N_{с.п}$ – четырехполосник соединительных проводов между изолирующим трансформатором и дроссель-трансформатором; $N_{д.п}$ – четырехполосник дроссель-трансформатора питающего конца

Матрица N_n в соответствии с каскадным соединением четырехполосников получается по формуле

$$N_n = N_{R_0} \times N_{и.п} \times N_{с.п} \times N_{д.п}, \quad (2)$$

где N_{R_0} , $N_{и.п}$, $N_{с.п}$ и $N_{д.п}$ – матрицы А-параметров четырехполосников, изображенных на рисунке 2.

Четырехполюсник конца рельсовой цепи аналогичным образом построен по принципу каскадного включения четырехполюсников образующих его устройств (рисунок 3).

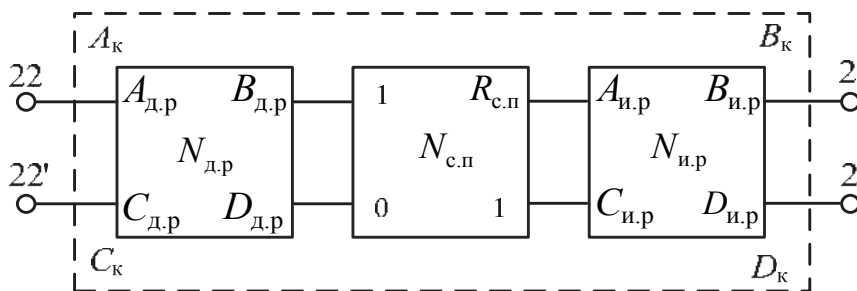


Рисунок 3 – Схема замещения устройств релейного конца рельсовой цепи:

$N_{д.р}$ – четырехполюсник дроссель-трансформатора релейного конца; $N_{с.п}$ – четырехполюсник соединительных проводов между дроссель-трансформатором и изолирующим трансформатором; $N_{и.р}$ – четырехполюсник изолирующего трансформатора релейного конца

Тогда, матрица А-параметров четырехполюсника N_k будет иметь вид:

$$N_k = N_{д.р} \times N_{с.п} \times N_{и.р}, \quad (3)$$

где $N_{д.р}$, $N_{с.п}$ и $N_{и.р}$ – матрицы А-параметров соответствующих четырехполюсников, изображенных на рисунке 3.

Матрицы N_{Ro} , $N_{и.п}$, $N_{с.п}$, $N_{д.р}$, $N_{с.п}$, $N_{и.р}$, $N_{д.п}$, фигурирующие в формулах (2) и (3), характеризуют отдельные элементы аппаратуры рельсовой цепи и определяются на основе справочных данных, приведенных, например, в работе [7]. Свойства этих элементов не зависят от режима работы рельсовой цепи. Таким образом, матрицы N_n и N_k , полученные по формулам (2) и (3), используются при моделировании любого из режимов.

Рельсовая линия является чувствительным элементом рельсовой цепи, поэтому А-параметры четырехполюсника $N_{р.л}$ на рисунке 1 определяются для каждого ее режима отдельно. В нормальном режиме, согласно источнику [7], они описываются формулами:

$$\begin{cases} A = \text{ch}(\gamma l); \\ B = Z_b \cdot \text{sh}(\gamma l); \\ C = \frac{\text{sh}(\gamma l)}{Z_b}; \\ D = \text{ch}(\gamma l), \end{cases} \quad (4)$$

где γ – коэффициент распространения;

Z_b – волновое сопротивление, Ом;

l – длина рельсовой линии, км.

Модель рельсовой линии в шунтовом режиме подробно рассмотрена в работе [8] и представляется формулами:

$$\left\{ \begin{aligned} A &= \operatorname{ch}(\gamma(l - x_{\text{ш}})) \cdot \operatorname{ch}(\gamma x_{\text{ш}}) + Z_{\text{Б}} \operatorname{sh}(\gamma(l - x_{\text{ш}})) \cdot \left(\frac{1}{R_{\text{с}}} \operatorname{ch}(\gamma x_{\text{ш}}) + \frac{1}{Z_{\text{Б}}} \operatorname{sh}(\gamma x_{\text{ш}}) \right); \\ B &= \operatorname{ch}(\gamma(l - x_{\text{ш}})) \cdot Z_{\text{Б}} \operatorname{sh}(\gamma x_{\text{ш}}) + Z_{\text{Б}} \operatorname{sh}(\gamma(l - x_{\text{ш}})) \cdot \left(\frac{1}{R_{\text{с}}} Z_{\text{Б}} \operatorname{sh}(\gamma x_{\text{ш}}) + \operatorname{ch}(\gamma x_{\text{ш}}) \right); \\ C &= \frac{1}{Z_{\text{Б}}} \operatorname{sh}(\gamma(l - x_{\text{ш}})) \cdot \operatorname{ch}(\gamma x_{\text{ш}}) + \operatorname{ch}(\gamma(l - x_{\text{ш}})) \cdot \left(\frac{1}{R_{\text{с}}} \operatorname{sh}(\gamma x_{\text{ш}}) + \frac{1}{Z_{\text{Б}}} \operatorname{sh}(\gamma x_{\text{ш}}) \right); \\ D &= \frac{1}{Z_{\text{Б}}} \operatorname{sh}(\gamma(l - x_{\text{ш}})) \cdot Z_{\text{Б}} \operatorname{sh}(\gamma x_{\text{ш}}) + \operatorname{ch}(\gamma(l - x_{\text{ш}})) \cdot \left(\frac{1}{R_{\text{с}}} Z_{\text{Б}} \operatorname{sh}(\gamma x_{\text{ш}}) + \operatorname{ch}(\gamma x_{\text{ш}}) \right), \end{aligned} \right. \quad (5)$$

где $x_{\text{ш}}$ – координата поездного шунта, которая изменяется в пределах рельсовой линии от 0 до l (отсчет координаты производится с релейного конца рельсовой цепи), км;

$R_{\text{с}}$ – сопротивление шунтирования рельсов колесными парами поезда, Ом.

В контрольном режиме А-параметры четырехполюсника рельсовой линии, как следует из источника [8], определяются формулами:

$$\left\{ \begin{aligned} A &= \operatorname{ch}(\gamma x_{\text{обр}}) \cdot \operatorname{ch}(\gamma(l - x_{\text{обр}})) + (Z_{\text{зо}} \operatorname{ch}(\gamma x_{\text{обр}}) + Z_{\text{Б}} \operatorname{sh}(\gamma x_{\text{обр}})) \frac{1}{Z_{\text{Б}}} \operatorname{sh}(\gamma(l - x_{\text{обр}})); \\ B &= \operatorname{ch}(\gamma x_{\text{обр}}) \cdot Z_{\text{Б}} \operatorname{sh}(\gamma(l - x_{\text{обр}})) + (Z_{\text{зо}} \operatorname{ch}(\gamma x_{\text{обр}}) + Z_{\text{Б}} \operatorname{sh}(\gamma x_{\text{обр}})) \cdot \operatorname{ch}(\gamma(l - x_{\text{обр}})); \\ C &= \frac{1}{Z_{\text{Б}}} \operatorname{sh}(\gamma x_{\text{обр}}) \cdot \operatorname{ch}(\gamma(l - x_{\text{обр}})) + \left(\frac{1}{Z_{\text{Б}}} Z_{\text{зо}} \operatorname{sh}(\gamma x_{\text{обр}}) + \operatorname{ch}(\gamma x_{\text{обр}}) \right) \frac{1}{Z_{\text{Б}}} \operatorname{sh}(\gamma(l - x_{\text{обр}})); \\ D &= \operatorname{sh}(\gamma x_{\text{обр}}) \cdot \operatorname{sh}(\gamma(l - x_{\text{обр}})) + \left(\frac{1}{Z_{\text{Б}}} Z_{\text{зо}} \operatorname{sh}(\gamma x_{\text{обр}}) + \operatorname{ch}(\gamma x_{\text{обр}}) \right) \cdot \operatorname{ch}(\gamma(l - x_{\text{обр}})), \end{aligned} \right. \quad (6)$$

где $x_{\text{обр}}$ – координата повреждения рельсовой нити, которая изменяется в пределах рельсовой линии от 0 до l (отсчет координаты производится с релейного конца рельсовой цепи), км;

$Z_{\text{зо}}$ – эквивалентное сопротивление участка обрыва рельсовой нити, Ом.

На основе формул (1) – (6) модель рельсовой цепи представляется матрицей $N_{\text{р.ц}}$, а компоновка этой модели выполняется следующим образом (рисунок 4).

Для любого режима $N_{\text{р.ц}}$ рассчитывается по формуле (1), в которой матрицы $N_{\text{н}}$ и $N_{\text{к}}$ определяются по формулам (2) и (3). При этом элементы матрицы $N_{\text{р.л}}$ в формуле (1) в зависимости от режима, для которого строится модель, определяется по формулам (4), (5) или (6).

Расчет электрических сигналов на входе и выходе рельсовой цепи. Полученная математическая модель рельсовой цепи позволяет определить расчетные величины, перечисленные в таблице 1.

Расчет этих величин удобно выполнить в матричной форме.

Для этого введем матрицы входных и выходных напряжений и токов следующим образом:

$$M_{\text{ВХ}} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{\text{ВХ}} \\ \dot{i}_{\text{ВХ}} \end{bmatrix}, \quad M_{\text{ВЫХ}} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{\text{ВЫХ}} \\ \dot{i}_{\text{ВЫХ}} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где $\dot{U}_{\text{вх}}$, $\dot{I}_{\text{вх}}$ – комплексные напряжение и ток на входе рельсовой цепи (в точках 1 – 1' на рисунке 1),

$\dot{U}_{\text{вых}}$, $\dot{I}_{\text{вых}}$ – комплексные напряжение и ток на выходе рельсовой цепи (в точках 2 – 2' на рисунке 1).

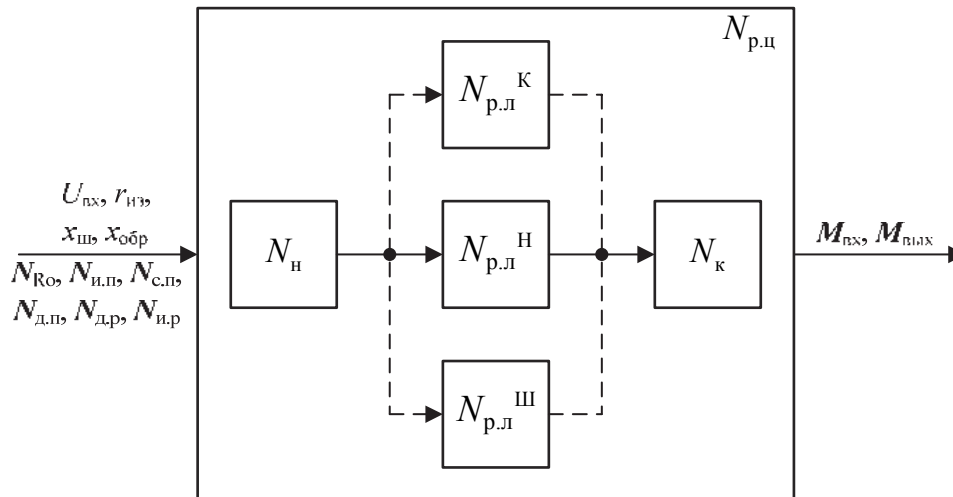


Рисунок 4 – Схема компоновки модели рельсовой цепи:

$N_{\text{р.ц}}$ – модель рельсовой цепи; $N_{\text{Н}}$ – модуль начала модели рельсовой цепи; $N_{\text{р.л.Н}}$ – модуль рельсовой линии в нормальном режиме; $N_{\text{р.л.Ш}}$ – модуль рельсовой линии в шунтовом режиме; $N_{\text{р.л.К}}$ – модуль рельсовой линии в контрольном режиме; $N_{\text{К}}$ – модуль конца модели рельсовой цепи

Модель рельсовой цепи представлена матрицей А-параметров, следовательно, справедливо выражение

$$\mathbf{M}_{\text{вх}} = \mathbf{N}_{\text{рц}} \cdot \mathbf{M}_{\text{вых}}. \quad (8)$$

Напряжение $U_{\text{вх}}$ на входе рельсовой цепи является одним из задаваемых параметров модели, т. е. его величина и фаза известны во время моделирования. Ток на входе четырехполюсника рельсовой цепи может быть найден по формуле

$$\dot{I}_{\text{вх}} = \frac{\dot{U}_{\text{вх}}}{\dot{Z}_{\text{вх}}}, \quad (9)$$

где $\dot{Z}_{\text{вх}}$ – входное сопротивление четырехполюсника $N_{\text{рц}}$, которое определяется через его А-параметры по формуле [10]

$$\dot{Z}_{\text{вх}} = \frac{Z_{\text{р}} A_{\text{р.ц}} + B_{\text{р.ц}}}{Z_{\text{р}} C_{\text{р.ц}} + D_{\text{р.ц}}}, \quad (10)$$

где $Z_{\text{р}}$ – сопротивление нагрузки рельсовой цепи (см. рисунок 1).

Нагрузкой рельсовой цепи является путевой приемник, сопротивление которого определяется на основе справочных данных [7]. Таким образом, имея заданное входное напряжение и рассчитанный по формулам (9) и (10) входной ток, получаем полностью определенную

матрицу $M_{\text{вх}}$. Выражение для расчета выходных напряжений и токов получается из формулы (8) и имеет вид:

$$M_{\text{вых}} = N_{\text{р.ц}}^{-1} \cdot M_{\text{вх}}. \quad (11)$$

Реализация модели рельсовой цепи. Формулы (7), (9) – (11) позволяют получить расчетные величины из таблицы 1 на основе задаваемых параметров модели. При этом расчет следует выполнять в следующей последовательности.

1. Определение А-параметров четырехполюсника $N_{\text{р.л}}$ рельсовой линии на основе заданных параметров модели по формулам (4), (5) или (6) в зависимости от режима.
2. Определение А-параметров четырехполюсника $N_{\text{н}}$ питающего конца по формуле (2) на основе справочных данных.
3. Определение А-параметров четырехполюсника $N_{\text{к}}$ релейного конца по формуле (3) на основе справочных данных.
4. Определение А-параметров четырехполюсника $N_{\text{р.ц}}$ рельсовой цепи по формуле (1).
5. Расчет тока $I_{\text{вх}}$ на входе рельсовой цепи по формулам (9) и (10) на основе заданного напряжения на входе и А-параметров четырехполюсника $N_{\text{р.ц}}$ рельсовой цепи и справочных данных.
6. Формирование матрицы $M_{\text{вх}}$ в соответствии с выражением (7).
7. Расчет тока $I_{\text{вых}}$ и напряжения $U_{\text{вых}}$ на выходе рельсовой цепи по формуле (11).

Приведенный алгоритм удобно описать на языке программирования, в котором определены операции над матрицами. Для реализации модели авторами выбран язык программирования Octave.

Для демонстрации разработанной модели приведем результаты расчета напряжений и токов на входе и выходе рельсовой цепи в трех режимах. В качестве приемника рассчитана кодовая рельсовая цепь с частотой сигнального тока 25 Гц и путевым реле типа ИМВШ-110, дроссель-трансформаторами типа ДТ-1-150 и изолирующими трансформаторами типа ПРТ-А. Сопротивление соединительных проводов между дроссель-трансформатором и изолирующим трансформатором на релейном и питающем концах принято равным 0,3 Ом, сопротивление ограничивающего резистора на питающем конце составляет 200 Ом. Длина рельсовой линии выбрана равной 2 км.

На рисунке 5 приведен расчетный график зависимости величины тока на входе рельсовой цепи от напряжения источника питания и сопротивления изоляции рельсовой линии в нормальном режиме. Напряжение источника питания задавалось в диапазоне от 140 до 160 В с шагом 1 В, а диапазон изменения сопротивления изоляции рельсовой линии составил от 1 до 50 Ом·км с шагом 1 Ом·км.

На рисунке 6 построен график напряжения на выходе рельсовой цепи в шунтовом режиме при входном напряжении 150 В, изменении координаты поездного шунта от 0 до 2 км с шагом 0,1 км и изменении сопротивления изоляции от 1 до 50 Ом·км с шагом 1 Ом·км.

График изменения величины тока на выходе рельсовой цепи в контрольном режиме приведен на рисунке 7. При расчете входное напряжение принято равным 150 В, координата обрыва рельсовой нити изменялась в пределах от 0 до 2 км с шагом 0,1 км, а сопротивление изоляции изменялось в пределах от 1 до 15 Ом·км с шагом 0,2 Ом·км.

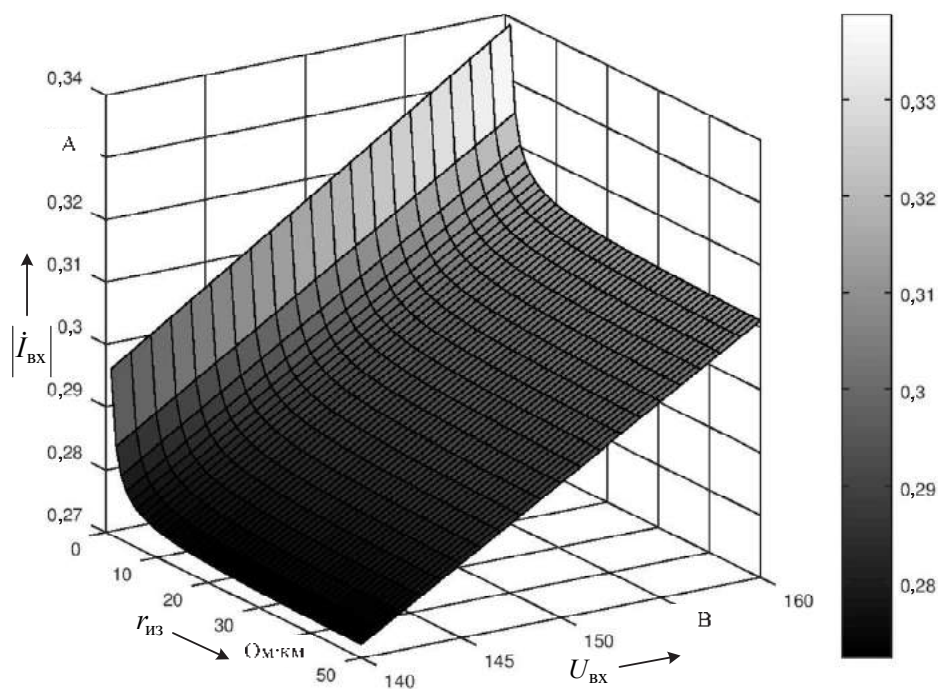


Рисунок 5 – График изменения тока на входе рельсовой цепи в нормальном режиме

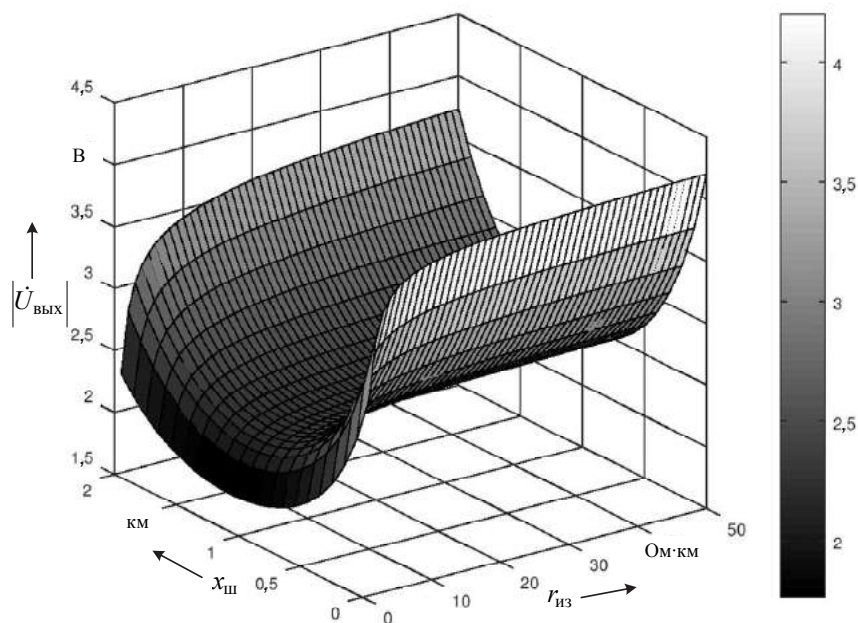


Рисунок 6 – График изменения напряжения на выходе рельсовой цепи в шунтовом режиме

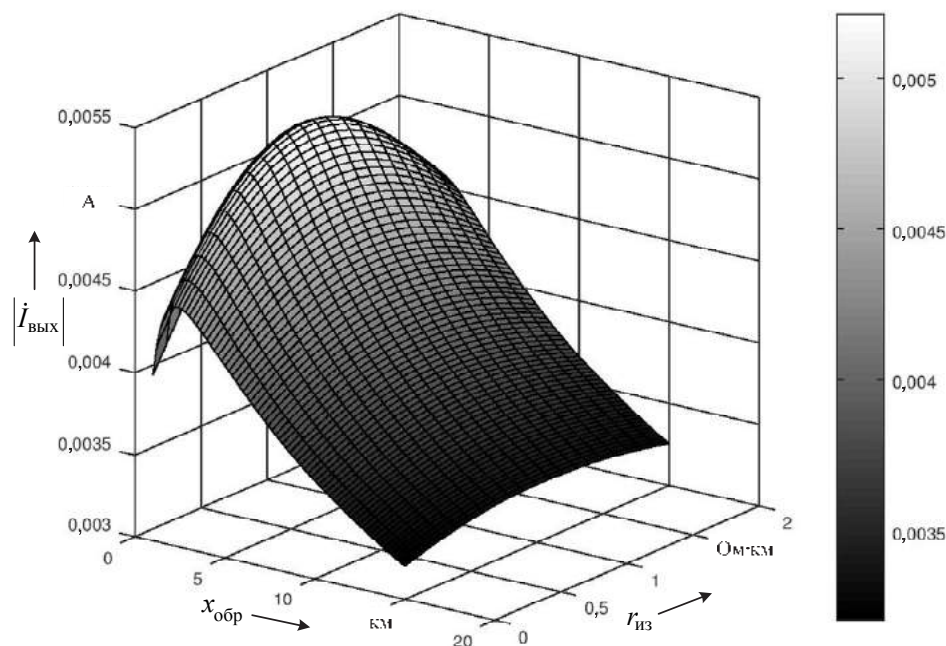


Рисунок 7 – График изменения тока на выходе рельсовой цепи в контрольном режиме

Полученные графики соответствуют общим положениям теории рельсовых цепей и подтверждаются примерами расчетов из работы [7]. Представленные алгоритмы позволяют рассчитывать амплитуды и фазы электрических сигналов на входе и выходе рельсовой цепи, находящейся в различных режимах и при различных сочетаниях ее параметров. Таким образом, представленная модель может служить источником данных при построении экспериментальных алгоритмов машинного обучения, выполняющих классификацию состояния рельсовых цепей.

Список литературы

1. Розенберг, Е. Н. Цифровая железная дорога – ближайшее будущее [Текст] / Е. Н. Розенберг // Автоматика, связь, информатика. – 2016. – № 10. – С. 4 – 7.
2. Обслуживание устройств ЖАТ по состоянию с применением систем диагностики [Текст] / Н. А. Меньшиков, А. Е. Лебедев и др. // Автоматика, связь, информатика. – 2016. – № 9. – С. 35 – 37.
3. Hastie, T. The elements of statistical learning [Text] / T. Hastie, R. Tibshirani, J. Friedman. – New York: Springer, 2009. – 745 p.
4. Bishop, Christopher M. Pattern Recognition and Machine Learning [Text] / Christopher M. Bishop. – New York: Springer, 2010. – 738 p.
5. Ефанов, Д. В. Становление и перспективы развития систем функционального контроля и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики [Текст] / Д. В. Ефанов // Автоматика на транспорте. – 2016. – №1. – С. 124 – 148.
6. Брылеев, А. М. Теория, устройство и работа рельсовых цепей [Текст] / А. М. Брылеев, Ю. А. Кравцов, А. В. Шишляков. – М.: Транспорт, 1978. – 344 с.
7. Рельсовые цепи магистральных железных дорог [Текст] / В. С. Аркатов, Ю. В. Аркатов и др. / ООО «Миссия-М». – М., – 2006. – 496 с.

8. Тарасов, Е. М. Принцип инвариантности в системах контроля состояний рельсовых линий [Текст] / Е. М. Тарасов, Д. В. Железнов, А. С. Белоногов / УМЦ ЖДТ. – М., 2016. – 212 с.

9. Котляренко, Н. Ф. Электрические рельсовые цепи [Текст] / Н. Ф. Котляренко. – М.: Трансжелдориздат, 1961. – 327 с.

10. Белецкий, А. Ф. Теория линейных электрических цепей [Текст] / А. Ф. Белецкий. – М.: Радио и связь, 1986. – 543 с.

References

1. Rozenberg E. N. Digital Railways – the near future [Cifrovaja zheleznaja doroga – blizhajshee budushhee]. *Automation, communication, informatics*, 2016, no. 10, pp. 4 – 7.

2. Menshikov N. A., Lebedev A. E., Moskvina E. A., Ivanov A. A. Servicing of the signaling devices with diagnostics [Obsluzhivanie ustroystv ZhAT po sostojaniyu s primeneniem sistem diagnostiki]. *Automation, communication, informatics*, 2016, no. 9, pp. 35 – 37.

3. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The elements of statistical learning, New York, Springer, 2009, 745 p.

4. Bishop Christopher M. Pattern Recognition and Machine Learning, New York, Springer, 2010, 738 p.

5. Efanov D. V. Formation and perspectives of development of functional control and monitoring systems for signaling devices [Stanovlenie i perspektivy razvitiya sistem funkcional'nogo kontrolja i monitoringa ustroystv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemehaniki]. *Automation in transport*, 2016, no. 1, pp. 124 – 148.

6. Bryleev A. M., Kravtsov Y. A., Shishlyakov A. V. *Teorija, ustrojstvo i rabota rel'sovyh cepej* (Theory, arrangement and operation of rail circuits). Moscow: Transport Publ., 1978, 344 p.

7. Arkatov V. S., Arkatov Y. V., Kazeev S. V., Obodovsky Y. V. *Rel'sovye cepi magistral'nyh zheleznyh dorog* (Rail circuits of the main railways). Moscow: Missia-M Publ., 2006, 496 p.

8. Tarasov E. M., Zheleznov D. V., Belonogov A. S. *Princip invariantnosti v sistemah kontrolja sostojanij rel'sovyh linij* (The principle of invariance in rail lines). Moscow: FGBOU «Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniju na zheleznodorozhnom transporte» Publ., 2016, 212 p.

9. Kotlyarenko N. F. *Jelektricheskie rel'sovye cepi* (Electrical rail circuits). Moscow: Transzheldorizdat Publ., 1961, 327 p.

10. Beletskiy A. F. *Teorija linejnyh jelektricheskikh cepej* (Theory of linear electric circuits). Moscow: Radio i svjaz' Publ., 1986, 543 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Борисенко Дмитрий Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика», ОмГУПС.

Тел.: 8 (3812) 31-18-72.

E-mail: borisenkovd@omgups.ru

Присухина Илона Вадимовна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Borisenko Dmitry Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph.D., Associate professor at the Signalling and Interlocking Department, OSTU.

Phone: 8 (3812) 31-18-72.

E-mail: borisenkovd@omgups.ru

Prisukhina Ilona Vadimovna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Postgraduate student of the Signalling and Interlocking Department, OSTU.

Аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика», ОмГУПС.
Тел.: 8 (3812) 31-18-72.
E-mail: prisukhinaiv@omgups.ru

Phone: 8 (3812) 56-26-64.
E-mail: prisukhinaiv@omgups.ru

Лунев Сергей Александрович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.
Кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Автоматика и телемеханика», ОмГУПС.
Тел.: 8 (3812) 31-18-72.
E-mail: lunevsa@omgups.ru

Lunev Sergey Aleksandrovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.
Ph.D. in Technical Sciences, Head of the Signalling and Interlocking Department, OSTU.
Phone: 8 (3812) 31-18-72.
E-mail: lunevsa@omgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Борисенко, Д. В. Математическая модель рельсовой цепи для генерации обучающей выборки при решении задач машинной классификации [Текст] / Д. В. Борисенко, И. В. Присухина, С. А. Лунев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 4(32). – С. 111 – 121.

Borisenko D. V., Prisukhina I. V., Lunev S. A. A mathematical model of a track circuit for data set generation in machine classification applications. Journal of Transsib Railway Studies, 2017, vol. 32, no 4, pp. 111 – 121 (In Russian).

УДК 519.715

А. И. Давыдов, М. М. Соколов, Е. Е. Анорина, Л. В. Кукина

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

АЛГОРИТМ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТА ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА ПРИ ОБСЛУЖИВАНИИ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СТАНЦИИ

Аннотация. В данной статье рассмотрен научный подход к оптимизации маршрута электромеханика при обслуживании устройств системы централизации и блокировки (СЦБ) на станции. Для этого авторами предлагается использовать алгоритм решения известной задачи коммивояжера. Этот алгоритм является основой для построения технологических карт перемещений электромехаников по станции как составной части технологических карт обслуживания устройств автоматики и телемеханики.

Ключевые слова: задача коммивояжера, минимизация, целевая функция, электромеханик, станция, Microsoft Excel.

Alexey I. Davydov, Maxim M. Sokolov, Elizaveta E. Anorina, Ludmila V. Kukina

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

ALGORITHM OF SELECTING THE OPTIMUM ROUTE OF ELECTROMECHANICS AT AUTOMATIC AND TELEMCHANICS DEVICES AT RAILWAY STATION

Annotation. In this article, a scientific approach to optimizing the electromechanical route for servicing the centralization and blocking devices at the station is considered. For this purpose, the authors propose to use the algorithm for solving the known traveling salesman problem. This algorithm is the basis for constructing technological maps of

the movement of electromechanics around the station, as a component of technological maintenance cards for automation and telemechanics devices.

Keywords. *The problem of the traveling salesman, minimization, objective function, electromechanics, station, Microsoft Excel.*

На крупных железнодорожных станциях расстояния между устройствами, требующими обслуживания электромехаником, могут быть достаточно большими, а перемещения между ними могут занимать значительное время, что приводит к потере рабочего времени. Кроме того, система менеджмента качества [1 – 3], активно внедряемая на железнодорожном транспорте, требует построения технологических карт всех производственных процессов. Процессная модель работы дистанции СЦБ представлен на рисунке 1 [4].

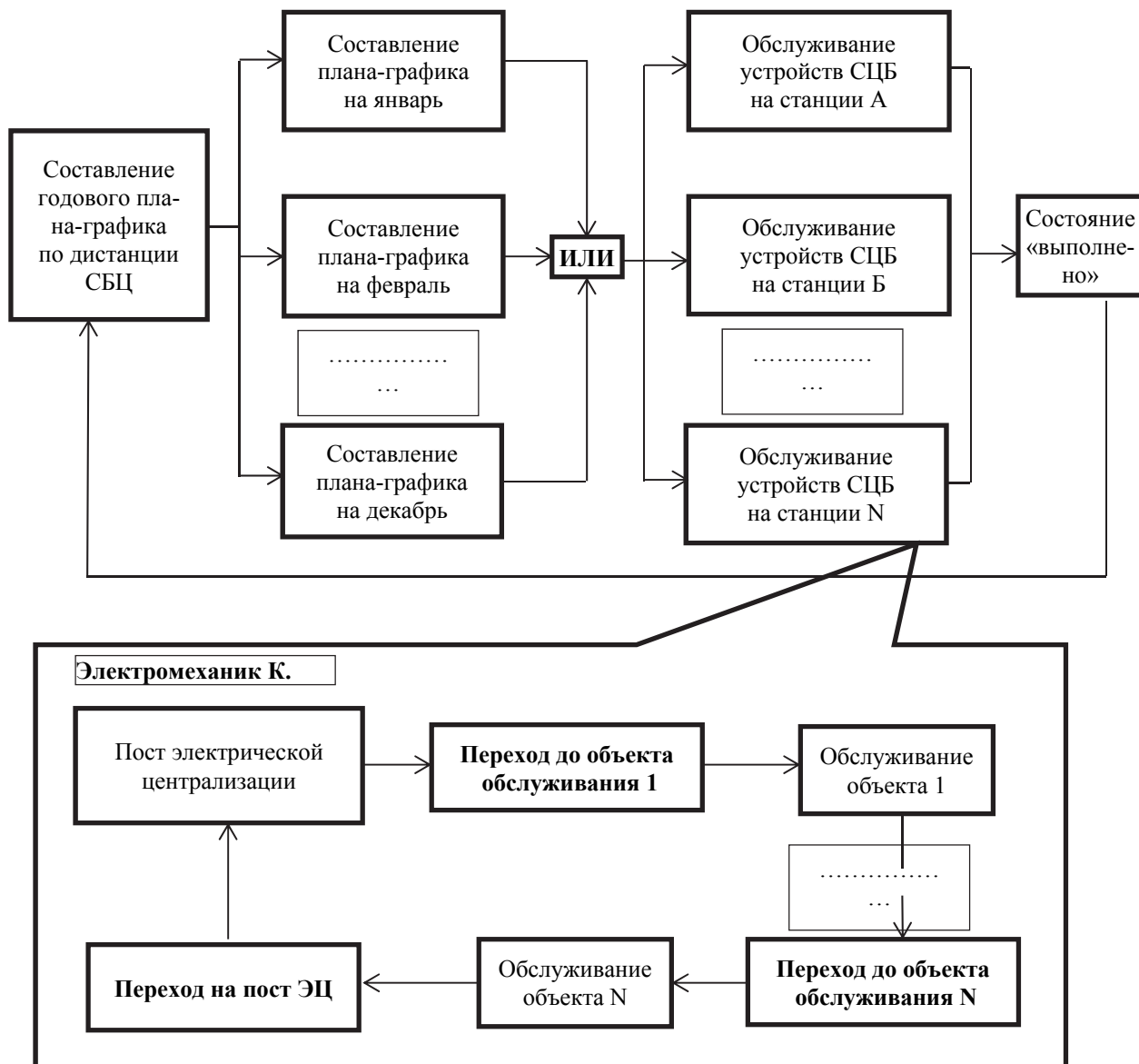


Рисунок 1 – Процессная модель работы дистанции СЦБ

Исследуемая станция разбита на участки, каждый из которых обслуживается одним электромехаником. Как правило, при выполнении плановых работ требуется много времени на пропуск поездов. Поэтому актуальна задача сокращения времени перехода от устройства

Разработан алгоритм поиска оптимального маршрута, который представлен на рисунке 4.

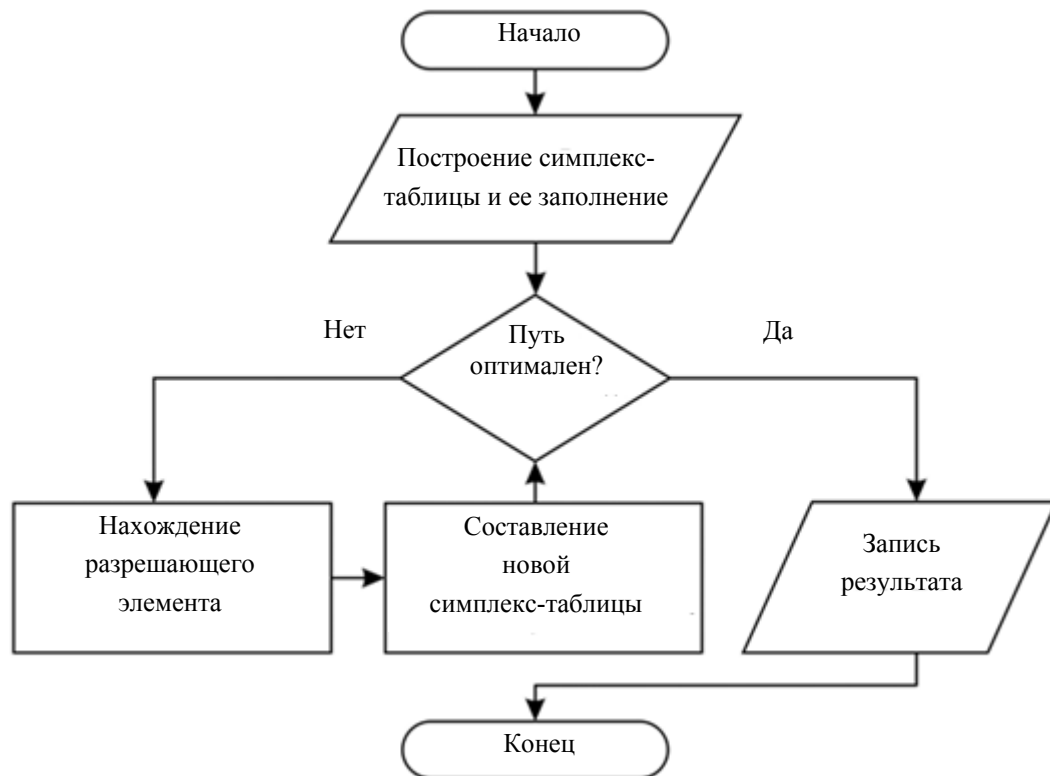


Рисунок 4 – Алгоритм поиска оптимального маршрута электромеханика

Для решения задачи необходимо установить некоторые ограничения.

1. Электромеханик может посетить объект только один раз – суммы по строкам (i) равны единице, электромеханик может уйти от объекта только один раз – суммы по столбцам (j) равны единице в соответствии с соотношением:

$$\begin{cases} \sum_i x_{ij} = 1; \\ \sum_j x_{ij} = 1. \end{cases} \quad (1)$$

2. Предотвращение закливания на одном объекте. Расстояния от какого-либо объекта до него самого – ноль. Программа распознает ноль как минимальное значение и закливит путь на этом объекте, поэтому обозначаем данные расстояния числами на порядок выше, чем остальные расстояния, тем самым не давая программе включить их в минимальный маршрут (рисунок 5).

3. Обеспечение устранения распада единого маршрута на несколько не связанных между собой частичных маршрутов с помощью соотношения приведенного ниже:

$$u_i - u_j + (n-1) \cdot x_{ij} \leq n-2, i \neq j, j = 2 \dots n, \quad (2)$$

где n – число объектов в маршруте;

u_{ij} – переменные, введенные дополнительно для учета данного ограничения.

Реализация этого ограничения в MS Excel представлена на рисунке 6.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
2											
3			пост ЭЦ	ЧИ	ЧП	87 стр	81 стр	91 стр	75 стр	73 стр	
4		пост ЭЦ	10000	500,60	448,30	258,18	224,02	213,47	209,16	140,51	
5		ЧИ	500,60	10000	52,30	218,90	248,60	273,50	263,60	329,30	
6		ЧП	448,30	52,30	10000	166,60	201,60	221,20	211,30	277,00	
7		87 стр	258,18	218,90	166,60	10000	35,40	45,26	50,28	126,70	
8		81 стр	224,02	248,60	201,60	35,40	10000	18,27	15,00	91,30	
9		91 стр	213,47	273,50	221,20	45,36	18,27	10000	16,99	93,29	
10		75 стр	209,16	263,30	211,30	50,28	15,00	16,99	10000	71,20	
11		73 стр	140,51	329,30	277,00	126,70	91,30	93,29	71,20	10000	
12											

∞

Рисунок 5 – Предотвращение заикливания маршрута

$=\$G\$25-D25+8*D20$

	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
8										
9										
10										
11										
12										
13										
14										
15										
16										
17										
18										

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
14												
15			пост ЭЦ	ЧИ	ЧП	87 стр	81 стр	91 стр	75 стр	73 стр		ограничения
16			пост ЭЦ	0	0	0	0	0	0	0	0	1
17			ЧИ	0	0	1	0	0	0	0	0	1
18			ЧП	0	0	0	1	0	0	0	0	1
19			87 стр	0	0	0	0	0	1	0	0	1
20			81 стр	0	1	0	0	0	0	0	0	1
21			91 стр	1	0	0	0	0	0	0	0	1
22			75 стр	0	0	0	0	1	0	0	0	1
23			73 стр	0	0	0	0	0	0	1	0	1
24			ограничения	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25			переменные		3	4	5	2	6	1	0	
26												

Рисунок 6 – Устранение распада единого маршрута

Решение задачи (рисунок 7) заключается в определении минимума целевой функции, которая как раз и выражает минимальную длину маршрута при установленных ограничениях:

$$\sum_i c_i x_{ij} \rightarrow \min, \quad (3)$$

где c_i – расстояние между устройствами;

x_{ij} – бинарная переменная, обозначающая посещение устройства.

При этом исключаем из пути ячейки, которые обозначают переход от объекта к нему самому:

$$\sum_i x_{ii} = 0. \quad (4)$$

На рисунке 8 представлена решенная задача в виде таблицы. В качестве результата получаем массив нулей и единиц, причем единицы находятся в ячейках, соответствующих минимальным расстояниям между объектами, и обозначают последовательность их обхода:

«1», если электромеханик переходит от одного объекта к другому; «0», если не переходит от одного объекта к другому.

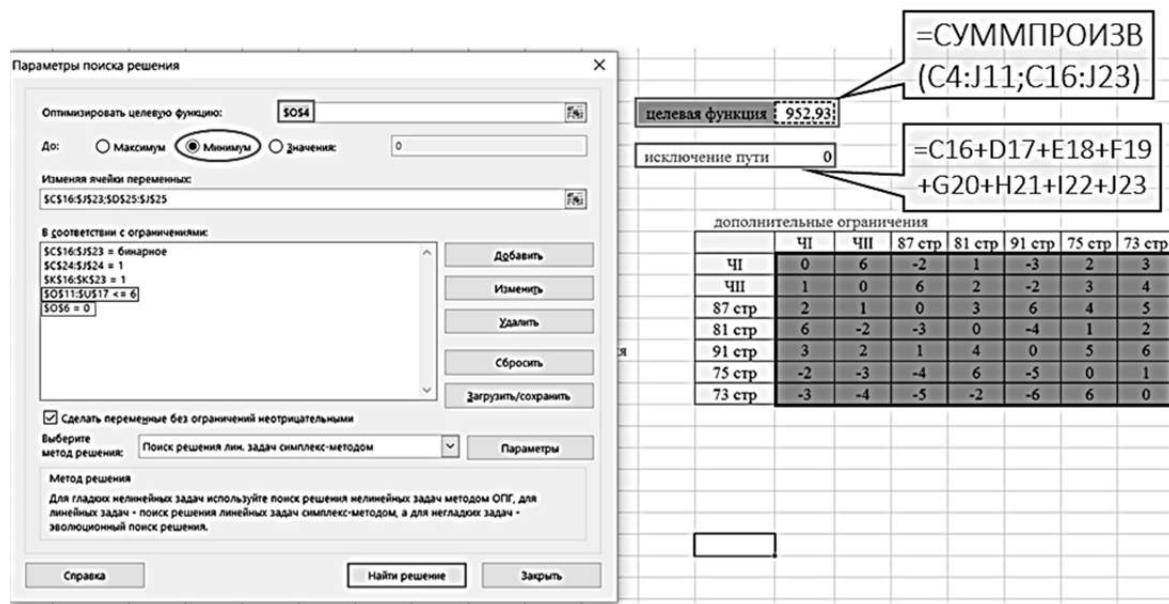


Рисунок 7 – Реализация решения задачи с помощью надстройки «Поиск решения»

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
14												
15			пост ЭЦ	ЧИ	ЧП	87 стр	81 стр	91 стр	75 стр	73 стр	ограничения	
16		пост ЭЦ	0	0	0	0	0	0	0	1	1	
17		ЧИ	0	0	1	0	0	0	0	0	1	
18		ЧП	0	0	0	1	0	0	0	0	1	
19		87 стр	0	0	0	0	0	1	0	0	1	
20		81 стр	0	1	0	0	0	0	0	0	1	
21		91 стр	1	0	0	0	0	0	0	0	1	
22		75 стр	0	0	0	0	1	0	0	0	1	
23		73 стр	0	0	0	0	0	0	1	0	1	
24		ограничения	1	1	1	1	1	1	1	1		
25		переменные		3	4	5	2	6	1	0		

Рисунок 8 – Табличное решение задачи поиска маршрута электромеханика

На рисунке 9 представлен оптимизированный маршрут электромеханика, который на 21 % короче выбранного изначально, приведенного на рисунке 2. Применение данного метода приобретает актуальность на крупных станциях со значительным количеством объектов и большими расстояниями между ними.

Кроме порядка реализации алгоритма с помощью надстройки «Поиск решения» создана программа на языке Visual Basic for Application. Главное окно приложения приведено на рисунке 10.

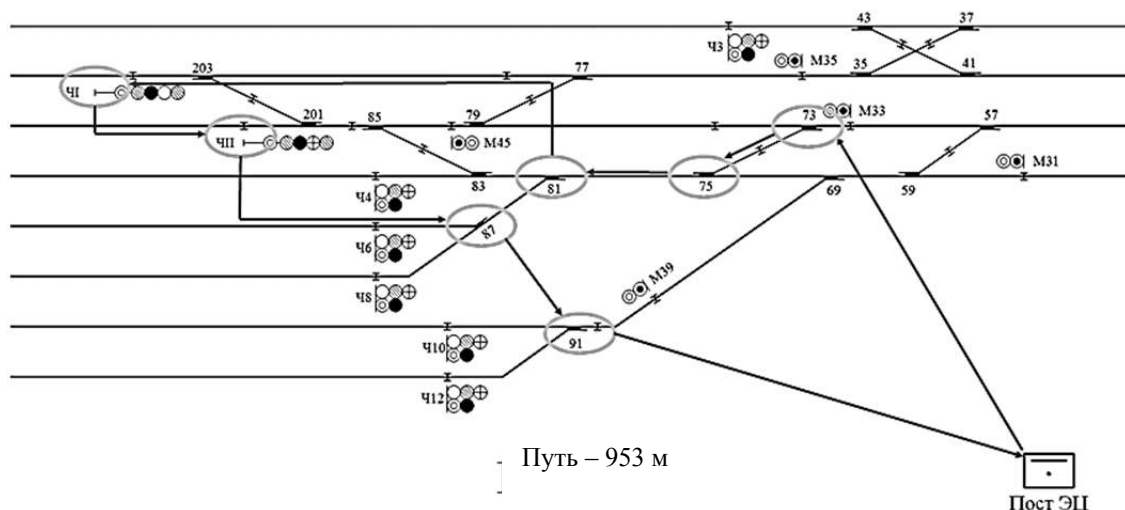


Рисунок 9 – Оптимизированный маршрут электромеханика

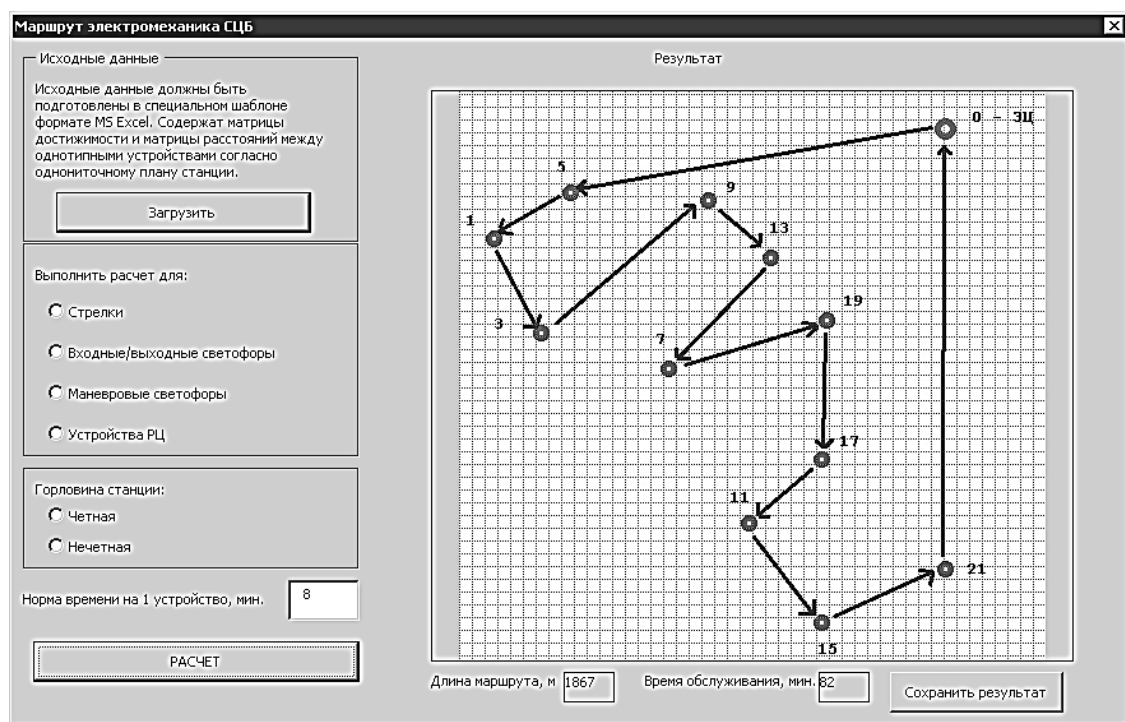


Рисунок 10 – Главное окно визуального приложения

На основе электронного приложения планируется разработка научно обоснованной методики построения карт технологических перемещений электромехаников по станции при обслуживании устройств автоматики и телемеханики на станции во время технологических окон с учетом наличия служебных проходов и индивидуальных особенностей объекта, которая позволит сэкономить значительное количество времени на переходах специалиста между объектами.

Список литературы

1. Степов, В. В. Повышение внутренней эффективности и качества управления в компании [Текст] / В. В. Степов // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 2. – С. 32, 33.

2. ГОСТ Р 56020-2014. Бережливое производство. Основные положения и словарь [Текст]. – М.: Стандартиформ, 2014. – 33 с.
3. Целько, А. В. Обеспечить технологическую устойчивость инфраструктуры [Текст] / А. В. Целько // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 2. – С. 44.
4. Манн, Д. Бережливое управление бережливым производством: Пер. с англ. [Текст] / Д. Манн. – М.: Стандарты и качество, 2009. – 208 с.
5. Техническая эксплуатация устройств и систем железнодорожной автоматики и телемеханики: Учебное пособие [Текст] / Вл. В. Сапожников, Л. И. Борисенко и др.; Под ред. Вл. В. Сапожникова. – М.: Маршрут, 2003. – 336 с.
6. Реклейтис, Г. Оптимизация в технике [Текст] / Г. Реклейтис. – М.: Мир, 1982. – 348 с.
7. Ашманов, С. А. Линейное программирование [Текст] / С. А. Ашманов. – М.: Наука, 2001. – 340 с.
8. Колесников, А. В. Методология и технология решения сложных задач методами функциональных гибридных интеллектуальных систем [Текст] / А. В. Колесников, И. А. Кириков / ИПИ РАН. – М., 2007. – 374 с.
9. Пападимитриу, Х. Х. Комбинаторная оптимизация. Алгоритмы и сложность [Текст] / Х. Х. Пападимитриу, К. Стайглиц. – М.: Мир, 1984. – 512 с.
10. Сесекин, А. Н. Метод динамического программирования в задаче коммивояжера: Учебное пособие [Текст] / А. Н. Сесекин, А. Г. Ченцов / УГТУ – УПИ. – Екатеринбург, 2005. – 435 с.

References

1. Stepov V.V. Increase of internal efficiency and quality of management in the company // [Povyshenie vnutrennei effektivnosti i kachestva upravleniia v kompanii]. *Zheleznodorozhnyi transport – The journal of Railway Transport*, 2015. no 2. pp. 32 – 33.
2. *Berezhlivoe proizvodstvo. Osnovnye polozheniia i slovar'*, GOST R 56020 - 2014 (Lean production. Basic provisions and vocabulary, State Standart 56020-2014). Moscow, Standartinform, 2015, 16 p.
3. Tselko A. V. Provide technological stability of the infrastructure [Obespechit' tekhnologicheskuiu ustoychivost' infrastruktury]. *Zheleznodorozhnyi transport – The journal of Railway Transport*, 2015. no 2. pp. 44.
4. Mann, D. *Berezhlivoe upravlenie berezhlivym proizvodstvom* (Lean management of lean production). Moscow: Standarty i kachestvo, 2009.
5. Sapozhnikov Vl. V. *Tekhnicheskaya ekspluatatsiya ustroystv i sistem zheleznodorozhnoi avtomatiki i telemekhaniki* (Technical operation of devices and systems of railway automatics and telemechanics). Moscow: Marshrut, 2003.
6. Reckleitis G. *Optimizatsiya v tekhnike* (Optimization in technology). Moscow: Mir, 1982.
7. Ashmanov S. A. *Lineinoe programmirovaniye* (Linear programming). Moscow: Nauka, 2001.
8. Kolesnikov A.V., Kirikov I.A. *Metodologiya i tekhnologiya resheniya slozhnykh zadach metodami funktsional'nykh gibridnykh intellektual'nykh sistem* (Methodology and technology for solving complex problems using the methods of functional hybrid intelligent systems). Moscow: IPI RAS, 2007.
9. Papadimitriou H.H., Stajglitz K. *Kombinatornaya optimizatsiya. Algoritmy i slozhnost'* (Combinatorial optimization. Algorithms and complexity). Moscow: Mir, 1984.
10. Sesekin A. N., Chentsov A. G. *Metod dinamicheskogo programmirovaniia v zadache kommivoiazhera* (The method of dynamic programming in the traveling salesman problem). Ekaterinburg: USTU-UPI, 2005.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Давыдов Алексей Игоревич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Информатика, прикладная математика и механика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (913) 632-82-32.

E-mail: DavydovAI@omgups.ru

Соколов Максим Михайлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-72.

E-mail: SokolovMM@omgups.ru

Анорина Елизавета Евгеньевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Студент Института автоматизации, телекоммуникаций и информационных технологий, ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-72.

Кукина Людмила Васильевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Студент Института автоматизации, телекоммуникаций и информационных технологий, ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-72.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Давыдов, А. И. Алгоритм выбора оптимального маршрута электромеханика при обслуживании устройств автоматизации и телемеханики на железнодорожной станции [Текст] / А. И. Давыдов, М. М. Соколов, Е. Е. Анорина, Л. В. Кукина // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 4(32). – С. 121 – 129.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Davydov Alexey Igorevich

Omsk State Transport University.

Marks pr., 35, Omsk, 644046, Russian Federation.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Informatics, Applied Mathematics and Mechanics, Omsk State Transport University.

Tel.: +7 (913) 632-82-32.

E-mail: DavydovAI@omgups.ru

Sokolov Maxim Mikhailovich

Omsk State Transport University.

Marks pr., 35, Omsk, 644046, Russian Federation.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automation and Telemechanics, Omsk State Transport University.

Tel.: +7 (3812) 31-18-72.

E-mail: SokolovMM@omgups.ru

Anorina Elizaveta Evgenievna

Omsk State Transport University.

Marks pr., 35, Omsk, 644046, Russian Federation.

A student of the Institute of Automation, Telecommunications and Information Technology, Omsk State Transport University.

Tel.: +7 (3812) 31-18-72.

Kukina Lyudmila Vasilyevna

Omsk State Transport University.

Marks pr., 35, Omsk, 644046, Russian Federation.

A student of the Institute of Automation, Telecommunications and Information Technology, Omsk State Transport University.

Tel.: +7 (3812) 31-18-72.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Davydov A. I., Sokolov M. M., Anorina E. E., Kukina L. V. The algorithm for choosing the optimal route for an electromechanic when servicing automation and telemechanics devices at a railway station. Journal of Transsib Railway Studies, 2017, vol. 32, no 4, pp. 121 – 129 (In Russian).

А. Г. Малютин, А. А. Лаврухин, А. С. Окишев

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

АРХИТЕКТУРНЫЕ АСПЕКТЫ РЕАЛИЗАЦИИ КОРПОРАТИВНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И УЧЕТА РЕСУРСОВ

Аннотация. Рассматриваются концепция и архитектурные аспекты развития корпоративной информационной системы мониторинга и учета ресурсов. Актуальность совершенствования автоматизированных систем обусловлена интенсификацией использования современных информационных технологий в промышленности и на транспорте. Целью работы является выбор архитектуры распределенной информационной системы мониторинга и учета ресурсов (далее – системы), обеспечивающей оперативность принятия решений при управлении технологическими объектами. При этом необходимо учесть современные тенденции развития информационных систем и те концепции построения систем, которые обеспечивают требования, установленные для систем подобного класса и назначения. Система основана на ранее разработанном прототипе, введенном в опытную эксплуатацию, и отличается от него новыми решениями, позволяющими повысить мобильность, масштабируемость и отказоустойчивость. Описываются основные реализованные архитектуры и функциональные возможности системы.

Ключевые слова: автоматизация, корпоративная информационная система, мониторинг, учет, измерение, электроэнергия, передача данных, алгоритм.

Andrey G. Malyutin, Andrey A. Lavrukhin, Andrey S. Okishev

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

ARCHITECTURAL ASPECTS OF THE IMPLEMENTATION OF THE CORPORATE INFORMATION SYSTEM FOR MONITORING AND RESOURCES ACCOUNTING

Abstract. We consider the concept and architectural aspects of the development of the corporate information system for monitoring and resources accounting. The relevance of improving automated systems is due to the intensification of the use of modern information technologies in industry. The aim of the work is to select the architecture of the distributed information system for monitoring and resources accounting (hereinafter – the system), which ensures prompt decision-making in the management of technological objects. We consider the current trends in the development of information systems and concepts that provide the requirements established for systems of this class and purpose. The system is based on previously designed prototype that has been put into operation, and differs from it in new solutions that allow to increase mobility and fault tolerance. We describe the basic implemented architectures and the system functionality.

Keywords: automation, corporate information system, monitoring, accounting, measurement, electric power, data transfer, algorithm.

Задача проектирования автоматизированной корпоративной информационной системы мониторинга и учета ресурсов связана с необходимостью выбора и проработки широкого комплекса технических решений с учетом специфики объекта автоматизации [1]. В первую очередь необходимо осуществить исследование или изучение объекта, особенностей и режимов его работы, динамики происходящих в нем процессов с целью уточнения требований технического задания.

Необходимо выявить функциональные задачи, которые связаны с основным назначением функционирования соответствующей конкретной службы системы или ее части. При этом функциональные задачи могут быть условно подразделены на служебные внутрисистемные задачи и пользовательские задачи, ориентированные на обслуживание функций пользователей системы. Часто в корпоративных информационных системах (КИС) выделяют два основных уровня, которые соответственно реализуют системные и

прикладные (например, управленческие) функции. Системная составляющая КИС является программно-аппаратной базой для функционирования прикладного уровня и решает задачи формирования единой универсальной информационной среды для передачи, обработки и хранения информации. Этими тремя основными услугами системного уровня пользуется прикладной уровень, реализованный исключительно в виде программных приложений.

При разработке архитектуры автоматизированной системы необходимо обеспечить выполнение одновременно требований надежности, экономичности, масштабируемости и конфигурируемости. Применяемые при построении системы решения должны отвечать требованиям информационной безопасности и иметь запас для расширения функциональности системы и ее перспективного развития.

В большинстве случаев автоматизированные системы можно представить иерархической структурой, на вершине которой – автоматизированные рабочие места, операторные станции, серверы различных служб и сервисы, задачи которых – выполнение интеграции в рамках всей системы, централизованный сбор и комплексный анализ данных, изменение режимов работы системы как целого. При этом подсистема верхнего уровня может быть как централизованной, так и распределенной, использующей все современные информационные технологии, обеспечивающей различные уровни доступа для разных категорий персонала, работающего с системой. Для передачи информации могут быть задействованы глобальные или корпоративные сети, в том числе они могут резервировать друг друга.

Наибольшую сложность, а значит, и интерес представляют распределенные системы, в которых объект автоматизации состоит из множества локальных подсистем, расположенных на больших расстояниях друг от друга. Примером является система электроснабжения железной дороги, с которой связана задача – осуществление мониторинга и технического учета электроэнергии на вводах тяговых подстанций и фидерах контактной сети железной дороги с целью выявления небаланса токов и мощностей и выполнения мероприятий по повышению энергетической эффективности работы системы электроснабжения. Особенность этой системы – необходимость точных синхронных измерений тока и напряжения с временным интервалом порядка 3 с на объектах, расположенных удаленно друг от друга. Точность синхронизации должна достигать единиц миллисекунд.

Необходимость такого детального синхронного учета электроэнергии в системе электроснабжения ОАО «РЖД», как отмечается в статье [2], связана с возникновением коммерческой составляющей небаланса, определяемой как разность небаланса и технологических потерь электроэнергии в тяговой сети. Несмотря на появление частного электроподвижного состава (ЭПС) остается нерешенным вопрос легитимного отнесения расхода электрической энергии на тягу поездов на всех участников перевозочного процесса на путях общего пользования. Создание системы, учитывающей энергоресурсы, требует определения в автоматическом режиме расхода и возврата электроэнергии электроподвижным составом на тягу поездов в границах зон учета (тарифных зон, железных дорог, межподстанционных зон), расхода электрической энергии ЭПС в режиме «горячего» простоя на тракционных путях ремонтных локомотивных депо, непроизводительных расходов электрической энергии на «горячий» простой в пути следования, трогание с места и разгон [2, 3].

Рассматриваемые в настоящей статье архитектурные аспекты реализации информационной системы успешно опробованы и внедрены при создании автоматизированной системы мониторинга и учета электроэнергии на фидерах контактной сети системы электроснабжения постоянного тока участка Шаля – Подволошная Свердловской железной дороги

[4 – 7], но их можно обобщить на широкий класс корпоративных систем мониторинга и учета ресурсов.

В распределенных автоматизированных системах типовое решение состоит в использовании промежуточного уровня – технологических контроллеров или промышленных компьютеров, осуществляющих сбор данных, управление в режиме реального времени на локальных участках объекта автоматизации и временную синхронизацию всех устройств системы. Нижний уровень системы состоит из отдельных измерительных устройств и исполнительных механизмов.

К настоящему времени существует два основных подхода, на которые следует опираться при построении архитектуры автоматизированной системы: предусматривающий полную детерминированность и обеспечивающий возможность самоорганизации системы [1]. При работе с технологическими объектами в большинстве случаев самоорганизация оправдана только на нижнем уровне системы, в то время как структура и режим функционирования верхних двух уровней остаются стационарными. Примерами могут быть гибкий автоматизированный роботизированный завод или склад, на нижнем уровне которого в масштабе цехов или складских помещений отдельные технологические операции выполняются роботами не по заранее заданному алгоритму, а в соответствии с построенной объектно-ориентированной или событийной моделью. Для такой системы характерны мобильность устройств, расположенных на ее нижнем уровне, применение беспроводных технологий передачи данных, динамическое изменение конфигурации и параметров сети передачи данных.

При обследовании и выполнении диагностических мероприятий на объектах автоматизации может возникать необходимость быстрой установки и демонтажа измерительных и других технологических устройств нижнего уровня, например, при мониторинге и исследовании режимов работы устройств в распределенной системе электроснабжения. В этом случае оптимальным также будет применение беспроводных технологий передачи данных с возможностью быстрой самонастройки информационной сети.

Таким образом, можно выделить следующие общие требования к информационной системе мониторинга и учета ресурсов:

- возможность расширения функционала, гибкость и управляемость инфраструктуры, масштабируемость (без остановки работы уже сконфигурированной системы);

- простота разработки и конфигурирования;

- надежность и отказоустойчивость системы, достигаемая за счет резервирования и независимой избыточности;

- работа в реальном масштабе времени всей транспортной и серверной инфраструктуры;

- гарантированный прозрачный доступ к информации 24 часа в сутки, семь дней в неделю, 365 дней в году;

- высокая степень интеграции программных компонентов системы, например, за счет использования единой конфигурационной базы и однотипных протоколов передачи данных;

- малое время отклика, адекватная пропускная способность, отсутствие «узких мест», изоляция трафика без дополнительных задержек;

- точная синхронизация времени в масштабах всей системы.

С точки зрения основных функциональных задач система мониторинга и учета ресурсов должна обеспечивать сбор информации с источников данных (измерителей), промежуточную обработку и хранение информации и дальнейшее централизованное хранение и представление информации конечным пользователям системы. В соответствии с данным набором функциональных задач структура распределенной корпоративной информационной системы

мониторинга и учета ресурсов состоит из четырех основных уровней (далее – система) (рисунок 1).

Нижний уровень системы – информационно-измерительные комплексы (ИИК) – обеспечивает первичное преобразование и измерение информационных параметров, их кратковременное или среднесрочное хранение в устройствах памяти, необходимую их обработку (усреднение, фильтрацию, спектральный анализ, обнаружение событий) и передачу информации на следующий уровень. В управляющих системах в этот уровень входят исполнительные механизмы и локальные системы управления [8].

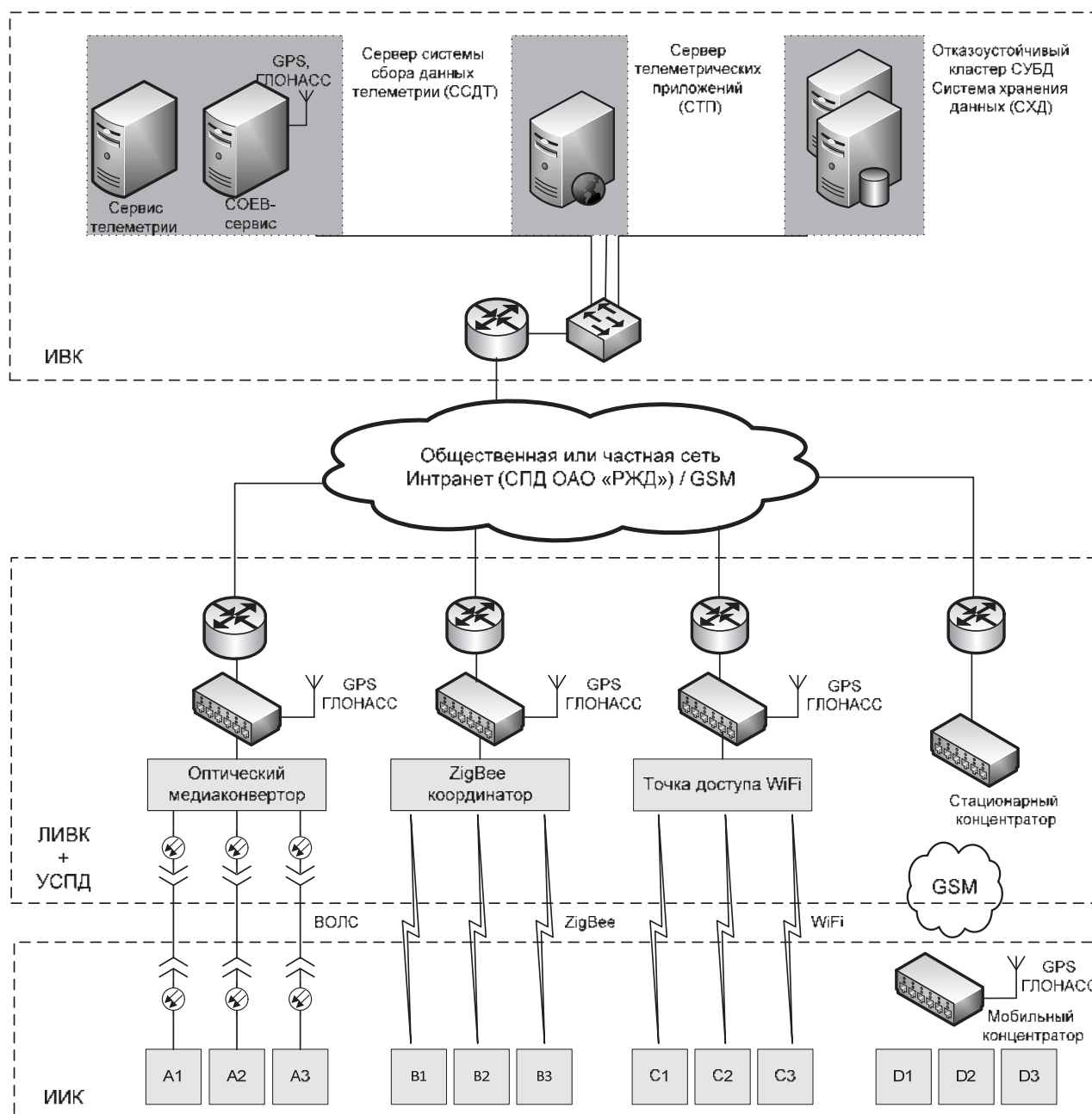


Рисунок 1 – Структура распределенной корпоративной информационной системы

Второй уровень – локальные информационно-вычислительные комплексы (ЛИВК) и соответствующие устройства сбора и передачи данных (УСПД). Основным устройством этого уровня является промышленный контроллер (осуществляющий функции локального и согласованного управления) либо промышленный компьютер (выполняющий сбор и среднесрочное или долгосрочное хранение данных в пределах одного участка). Устройство может также обрабатывать события, связанные с процессами, происходящими на рассматриваемом участке в целом.

Третий уровень – информационно-вычислительный комплекс (ИВК) – обеспечивает централизованный сбор информации с ЛИВК, долговременное хранение и предоставление информации на следующий уровень.

Четвертый уровень (внешний) – основные конечные потребители информации (пользователи) – представлен разнообразными клиентами (автоматизированные рабочие места) и серверами служб. Особенностью взаимодействия данного уровня с уровнем ИВК является применение стандартных интернет/интранет-ориентированных технологий, средств и протоколов обмена данными с использованием универсального web-клиента – браузера, что позволяет реализовать клиентскую часть на различных программно-аппаратных платформах. Такая архитектура имеет высокую степень масштабируемости, устойчивости, доступности, универсальности и унификации. Последние характеристики расширяются с применением сервис-ориентированной архитектуры (SOA, service-oriented architecture), основанной на использовании сервисов (служб) со стандартизированными интерфейсами, например, на базе языка XML.

Связь между первыми двумя уровнями системы может строиться на основе любых доступных технологий, как проводных (в том числе волоконно-оптических), так и беспроводных (WiFi, ZigBee, GSM, GSM-R, UMTS, LTE и др.). Применение беспроводных технологий связано либо с принципиальной мобильностью устройств в пределах локального участка, либо с необходимостью максимально быстрого развертывания системы. В случае, когда ИИК представляют собой счетчики электроэнергии, установленные на объектах ЭПС железной дороги, они могут передавать информацию как посредством технологии WiFi или ZigBee на концентратор данных, расположенный в точке приема данных с борта ЭПС, например, в локомотивных депо (C1, C2, C3 или B1, B2, B3), так и через сети мобильных операторов GSM (D1, D2, D3), но в последнем случае может потребоваться дополнительный мобильный концентратор данных, установленный на ЭПС, передающий информацию на стационарный концентратор, находящийся в депо.

Взаимодействие ЛИВК и ИВК осуществляется по проводной сети передачи данных (СПД) или при нахождении в зоне покрытия беспроводных сетей с использованием беспроводных технологий передачи данных (GSM, GSM-R, UMTS, LTE). Аналогичные технологии и сети могут применяться и для реализации взаимодействия ИВК и четвертого уровня.

В системе реализована концепция промежуточной программной среды (ППС) (или служба промежуточного уровня – middleware), которая в первую очередь обеспечивает единый и независимый механизм межкомпонентного обмена сообщениями и исполнения функциональных задач [9]. Кроме того, решаются такие задачи, как аутентификация и авторизация компонентов, защита передаваемых между компонентами данных, обеспечение целостности данных, балансировка нагрузки и обнаружение удаленных компонентов. Архитектура, реализующая концепцию промежуточной программной среды, представлена на рисунке 2. В системе используются несколько промежуточных сред, что приводит к формированию гетерогенной среды. Это позволяет упростить реализацию взаимодействия уровней с учетом

специфики транспортного уровня и географической удаленности компонентов разных уровней системы относительно друг друга.

На рисунке 3 представлена типовая архитектура системы с промежуточной программной средой, которая реализуется в каждом из уровней системы.

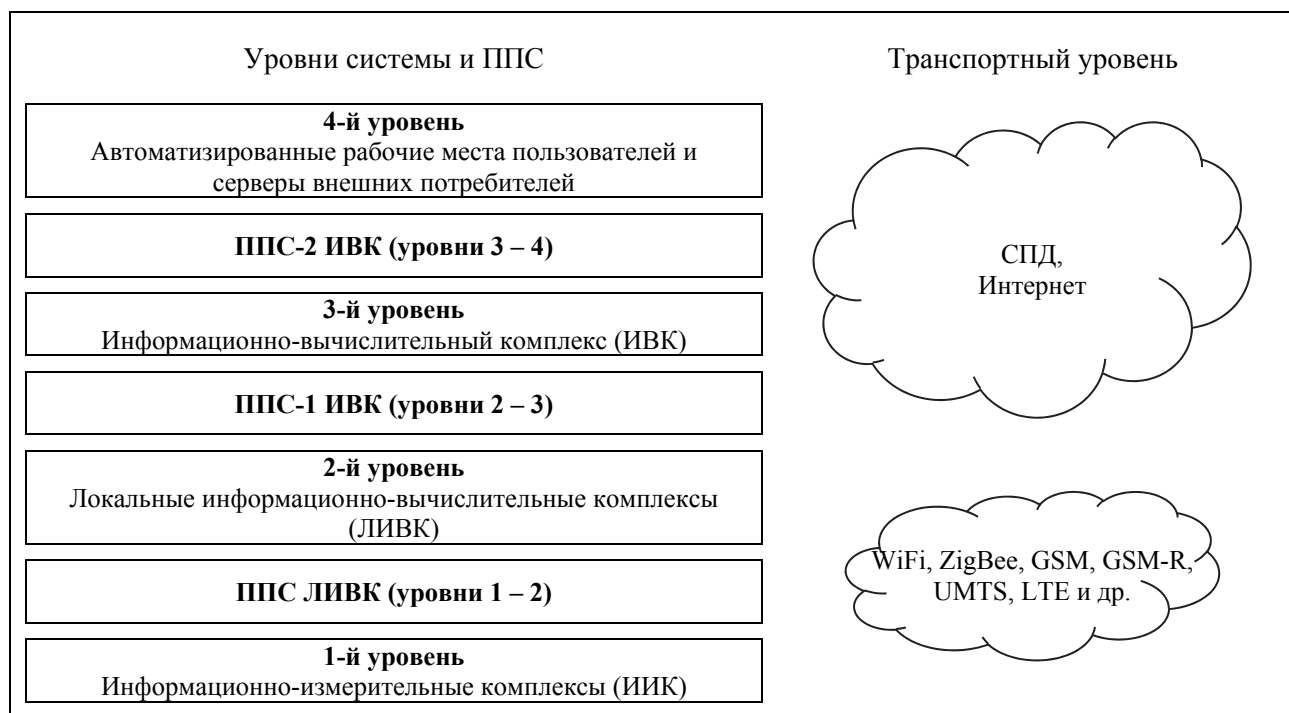


Рисунок 2 – Архитектура гетерогенной распределенной системы с промежуточными программными средами

Распределенные программные приложения	Одна или несколько функциональных задач		
Служба промежуточного уровня	Система промежуточного уровня (middleware)		
Уровень операционных систем узлов (ОС)	Локальная ОС	Локальная ОС	Локальная ОС
Уровень аппаратных решений (узлы): ИИК или концентраторы ЛИВК	Узел А	Узел В	Узел С
Транспортный уровень	Сеть передачи данных, Интернет (Ethernet, WiFi, ZigBee, GSM, GSM-R, UMTS, LTE и др.)		

Рисунок 3 – Архитектура системы с промежуточной программной средой

При разработке технологической архитектуры системы и УСПД, в частности, были приняты во внимание следующие общие принципы организации каналов передачи данных:

логически разделены транспортные подсети передачи данных на уровне локальных информационно-вычислительных комплексов (ЛИВК);

сеть радиодоступа и базовая пакетная сеть могут иметь разные схемы адресации, используемые в этих сетях. Отметим тот факт, что функции сети радиодоступа или базовой пакетной сети физически могут быть реализованы в одном оборудовании;

управление доступностью и маршрутизацией узлов сети радиодоступа полностью возложено на саму сеть радиодоступа;

функциональное разделение интерфейсов сети радиодоступа должно иметь несколько возможных опций;

интерфейсы должны базироваться на логической модели блока, управляемого данным интерфейсом;

один физический элемент сети может содержать в себе несколько логических блоков.

Технологическая архитектура обеспечивает следующие базовые транспортные функции:

- передача информационных и диагностических сообщений на более высокий уровень;
- получение командных сообщений (управляющей информации) с более высокого уровня;
- обнаружение ошибок в сообщениях;
- отбрасывание искаженных сообщений;
- повторная передача сообщений;
- функции защиты информации, включая управление ключами шифрования;
- управление качеством обслуживания;

На уровень ЛИВК возложены следующие специфичные транспортные функции:

- отправка командных сообщений (управляющей информации) на более низкий уровень;
- транзит командных сообщений (управляющей информации) с более высокого уровня на более низкий уровень;

– повторная установка соединения на уровнях ИИК-ЛИВК, ЛИВК-ИВК;

– установка, конфигурирование, регулировка сети радиодоступа.

К специфическим транспортным функциям уровня ИВК относятся

- отправка командных сообщений (управляющей информации) на более низкий уровень;
- получение управляющей информации от внешних административных систем.

Основой для построения транспортных коммуникаций удаленных элементов системы являются модель взаимодействия открытых систем OSI/ISO и стек протоколов TCP/IP, что является стандартным, межплатформенным, низкоуровневым сервисом для обмена данными. При этом все элементы системы имеют сетевой компонент операционных систем, основанный на интерфейсе сокетов, которые обеспечивают примитивы низкого уровня для непосредственного обмена потоком байтов между программными процессами. Из двух наиболее популярных в настоящее время основных концепций взаимодействия программных компонентов (обмен сообщениями и вызов процедур или методов объекта удаленного компонента) применена первая. Причем используется асинхронный вариант взаимодействия с очередью сообщений. В этом случае используется посредник – менеджер очередей сообщений. Программный компонент посылает сообщение в одну из очередей менеджера, после чего она может продолжить свою работу. В дальнейшем получающая сторона извлечет сообщение из очереди менеджера и приступит к его обработке.

Согласно доменному подходу [10] к описанию архитектур информационных систем рассматриваемая система относится к классу информационно-управляющих систем (ИУС), в которых реализуется процесс сбора данных, поступающих из разных источников, в частности от измерителей. Данные обрабатываются, и на их основе формируются разнообразные

отчеты, предназначенные различным категориям пользователей. Отчеты могут учитываться при принятии решения об эффективности функционирования объекта автоматизации.

На рисунке 4 представлена архитектура распределенного хранения, обработки и представления информации в контексте ИУС, она содержит следующие основные компоненты:

- источники данных (ИД) – измерители ИИК;
- база данных для хранения промежуточных результатов (БДХПР) обработки синхронизированных по времени данных измерений, поступающих от ИД («сырые данные»);
- подсистема обработки данных (ПО), осуществляющая обработку результатов измерения и подготовку для хранения и формирования отчетов;
- основная база данных (ОБД), обеспечивающая хранение данных мониторинга и учета, в виде, пригодном для формирования отчетов;
- подсистема генерации отчетов (ГО) – обеспечивает представление информации в удобном для пользователя виде;
- набор программных человекомашинных интерфейсов – обеспечивает доступ к отчетам на регулярной основе либо при возникновении исключительных ситуаций. В общем случае интерфейсы используются для реализации оперативного, тактического и стратегического управления.

Источники данных реализованы на первом уровне системы, БДХПР и ПО – частично на втором и третьем уровнях. Основная база данных, подсистема генерации отчетов и набор программных человекомашинных интерфейсов реализованы на третьем и четвертом уровнях системы.

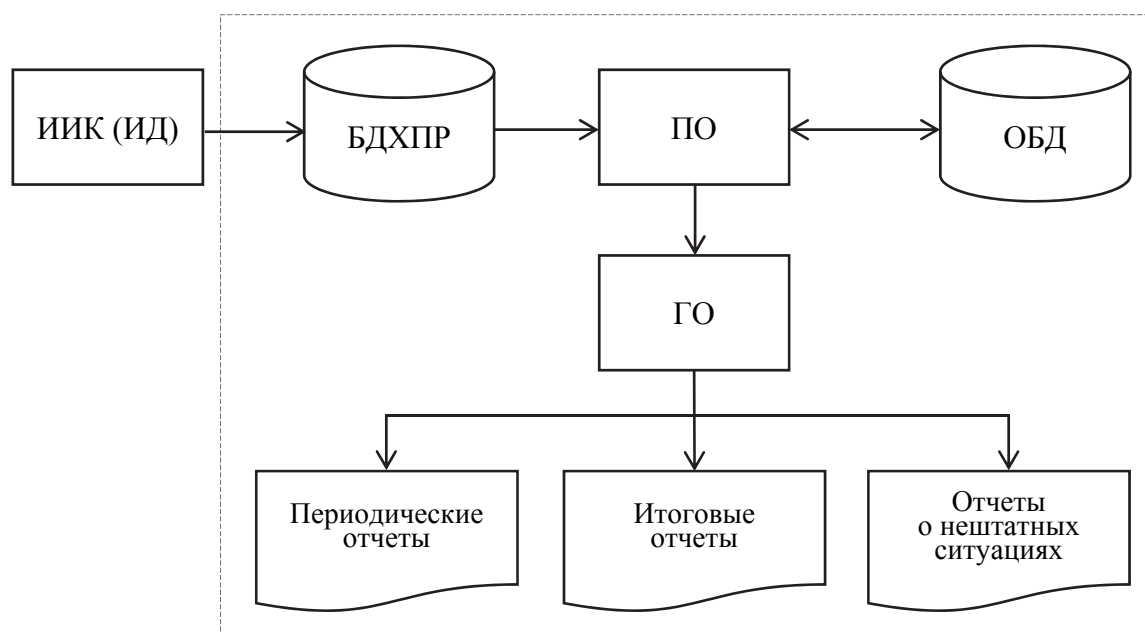


Рисунок 4 – Архитектура распределенного хранения, обработки и представления информации

БДХПР и ОБД являются элементами *архитектуры данных*, которая включает в себя логические и физические хранилища данных и средства управления данными. *Программная архитектура* реализована в подсистеме обработки данных, подсистеме генерации отчетов и программных человекомашинных интерфейсах. *Технологическая архитектура*, характеризующая аппаратные средства и системные программные средства, реализована в серверном оборудовании и УСПД.

Рассмотрим архитектурные решения, реализованные на третьем уровне системы. На рисунке 5 представлена трехзвенная архитектура информационно-вычислительного комплекса [9], в соответствии с которой функции ИВК распределены по трем слоям (уровням): слой представления, бизнес-логика, слой доступа к данным. Эти функции реализованы полностью или частично на разных элементах ИВК. Так, набор программных человекомашинных интерфейсов полностью реализуется на клиентах ИВК, а хранение данных – на серверах СУБД и в системе хранения данных (СХД).

Информационно-вычислительный комплекс состоит из следующих основных элементов:

- сервер системы сбора данных телеметрии (ССДТ);
- сервер телеметрических приложений (СТП);
- отказоустойчивый кластер СУБД и система хранения данных;
- маршрутизатор доступа и коммутатор.

Серверы ССДТ и СТП относятся к серверам приложений. Они реализуют основной функционал ИВК по сбору и обработке информации и формированию отчетов. Сервер системы сбора данных телеметрии (сервис телеметрии) осуществляет непосредственное взаимодействие с концентратором ЛИВК и прием от него данных телеметрии с ИИК. ССДТ выполняет также функцию системы обеспечения единого времени (СОЕВ) с использованием сигналов точного времени от спутников GPS/ГЛОНАСС. Сервер телеметрических приложений осуществляет обслуживание пользователей внешних систем по обеспечению доступа к данным телеметрии. Для этого в его составе действуют FTP-сервис и web-сервис, которые предоставляют услуги доступа к информации по протоколам FTP и HTTP. Прокси-сервис обеспечивает регламентированный доступ к сервисам, контроль и балансировку трафика приложений.

	<i>Клиенты</i>	<i>Серверы приложений</i>	<i>Серверы СУБД, СХД</i>
Слой представления	Интерфейс пользователя Интерфейс с сервером приложений		
Бизнес-логика		Реализация основных функций. Формирование запросов к СУБД	Хранимые процедуры
Слой доступа к данным			Выполнение запросов. Обработка транзакций. Хранение и управление файлами

Рисунок 5 – Трехзвенная архитектура информационно-вычислительного комплекса

ИВК обеспечивает решение следующих задач:

- автоматический и (или) по запросу сбор и хранение результатов измерений со всех ЛИВК, входящих в состав системы;
- ведение журналов событий со всех ЛИВК;
- резервное копирование баз данных и копирование их архива на внешний носитель информации;
- автоматическая коррекция времени в ИВК, синхронизация времени ИВК с единым календарным временем (СОЕВ);

– автоматическая передача результатов измерений, данных о состоянии средств измерений в ИВК и другим заинтересованным субъектам, предоставление пользователям и эксплуатационному персоналу регламентированного доступа к визуальным, печатным и электронным данным;

– механическая и программная защита от несанкционированного доступа к элементам ИВК.

В ИВК можно выделить следующие функциональные подсистемы, которые носят вспомогательный характер:

1) сетевая подсистема, предназначенная для организации взаимодействия между компонентами ИВК по протоколам семейства TCP/IP. Подсистема состоит из оборудования коммутации и маршрутизации трафика. Оборудование предназначается для маршрутизации и коммутации трафика внутри ИВК и между элементами системы;

2) подсистема информационной безопасности (ИБ), предназначенная для обеспечения уменьшения вероятности утечки конфиденциальной информации, несанкционированной модификации или утраты информации, т. е. уничтожения, необратимого искажения с потерей смысла, недоставления информации до адресата или блокировки доступа к ней. Подсистема информационной безопасности включает в себя комплекс следующих средств:

средства межсетевого экранирования – для обеспечения пакетной фильтрации сетевого трафика внутри ИВК и между элементами системы;

средства обнаружения и противодействия атакам – для обнаружения и исключения трафика сетевой атаки из потока данных;

средства контроля доступа оконечных устройств к сети – для предотвращения доступа к системе устройств, не соответствующих политике безопасности;

средства централизованного управления доступом – для централизованного управления доступом администраторов к оборудованию системы;

средства управления подсистемы ИБ – для централизованного управления средствами ИБ;

3) подсистема управления и мониторинга, предназначенная для безопасного управления элементами системы, включая централизованное администрирование, сбор системных сообщений и статистики и обновление программного обеспечения.

Таким образом, рассмотрены основные архитектуры, применяемые в корпоративной информационной системе мониторинга и учета ресурсов. Выбор той или иной архитектуры зависит от положения в иерархии и функционального назначения элемента системы. Были учтены современные тенденции развития информационных систем и те концепции построения систем, которые обеспечивают требования, установленные для систем подобного класса и назначения.

Список литературы

1. Ожегов, А. Н. Системы АСКУЭ: Учебное пособие [Текст] / А. Н. Ожегов / Вятский гос. ун-т. – Киров, 2006. – 102 с.

2. Черемисин, В. Т. Единая автоматизированная система учета электроэнергии на электроподвижном составе (ЕАСУЭ ЭПС) постоянного тока [Текст] / В. Т. Черемисин, С. Ю. Ушаков, А. Л. Каштанов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2013. – № 3. – С. 108 – 113.

3. Черемисин, В. Т. Автоматизированный мониторинг энергетической эффективности работы электроподвижного состава ОАО «РЖД» [Текст] / В. Т. Черемисин, Д. В. Пашков, С. Ю. Ушаков // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2014. – № 3. – С. 87 – 91.

4. Алгоритмы и структурные решения для построения автоматизированной системы мониторинга и учета электроэнергии на фидерах контактной сети [Текст] / А. А. Лаврухин, А. Г. Малютин и др. // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 4 (28). – С. 124 – 134.

5. Принципы построения информационной системы мониторинга и учета электроэнергии на фидерах контактной сети [Текст] / С. Н. Чижма, А. А. Лаврухин, и др. // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2015. – № 3 (23). – С. 94 – 104.

6. Информационная система оперативного контроля параметров электроэнергии в сети тягового электроснабжения [Текст] / С. Н. Чижма, А. А. Лаврухин и др. // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2015. – № 2. – С. 10 – 19.

7. Пат. 165423 Российская Федерация, МПК В60М3/00, Н02J1/00. Блок мониторинга и учета электроэнергии [Текст] / Черемисин В. Т.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – 2015151245/11; заявл. 30.11.2015; опубл. 20.10.2016, Бюл. № 29. – 4 с.

8. Kuznetsov A. A., Lavrukhin A. A., Kuznetsova M. A. Schemes and problems of SCADA system for electrical energy control on railway rolling stock / A. A. Kuznetsov, A. A. Lavrukhin, M. A. Kuznetsova // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 16 – 19 May 2017.

9. Таненбаум, Э. Распределенные системы. Принципы и парадигмы [Текст] / Э. Таненбаум, М. ван Стеен. – СПб: Питер, 2003. – 877 с.

10. J. Duffy, Daniel Domain Architectures. Models and. Architectures for UML Applications: Datasim Education. BV / Daniel J. Duffy. Amsterdam, Netherlands. – 2004.

References

1. Ozhegov, A. N. *Sistemy ASKUE: Uchebnoe posobie* (AMR system: study guide). Kirov: Vi-atSU, 2006. 102 p.

2. Cheremisin V. T. Edinaya avtomatizirovannaya sistema ucheta elektroenergii na elektropodvizhnom sostave (EASUE EPS) postoyannogo toka [The uniform automated system of electricity metering in electric rolling stock (EASA EPS) DC]. *Izvestija Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2013, № 3, P. 108 – 113.

3. Cheremisin V. T. *Avtomatizirovanny monitoring energeticheskoy effektivnosti raboty elektropdvizhnogo sostava OAO «RZhD»* [Automated monitoring of energy efficiency operation of the electric rolling stock of JSC «Russian Railways»]. *Izvestija Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2014, № 3, P. 87 – 91.

4. Lavrukhin A. A. Algorithms and structural solutions for construction the system of monitoring and electricity metering on the feeders of the contact network . *Izvestija Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2016, № 4 (28), P. 124 – 134.

5. Chizhma S. N. Printsipy postroeniia informatsionnoi sistemy monitoringa i ucheta elektroenergii na fiderakh kontaktnoi seti [Principles of construction of information system of monitoring and accounting of the electric power on feeders of a contact network]. *Izvestija Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2015, № 3 (23), С. 94 – 104.

6. Chizhma S. N. Informatsionnaia sistema operativnogo kontrolya parametrov elektroenergii v seti tiagovogo elektrosnabzheniia [Informatsionnaia sistema operativnogo kontrolya parametrov elektroenergii v seti tiagovogo elektrosnabzheniia]. *Informatsionnye intellektual'nye tekhnologii*, 2015, № 2, P. 10 – 19.

7. Cheremisin V. T., Chizhma S. N., Nikiforov M. M., Lavrukhin A. A., Maliutin A. G., Okishev A. S., Plotnikov Iu. V., Degtereva A. V. Blok monitoringa i ucheta elektroenergii. *Patent na poleznuiu model' RUS 165423*, 30.11.2015.

8. Kuznetsov A. A., Lavrukhin A. A., Kuznetsova M. A. Schemes and problems of SCADA system for electrical energy control on railway rolling stock. *2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 16 – 19 May 2017.

9. Tanenbaum E. *Printsipy i paradigmy* (Raspredelemnnyye sistemy) / E. Tanenbaum, M. van Steyen. SPb.: Piter, 2003. 877 p.

10. Duffy D. *Domain Architectures* (Models and Architectures for UML Applications. Datasim Education BV). Amsterdam, Netherlands, 2004. 412 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Малютин Андрей Геннадьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: MalyutinAG@omgups.ru

Лаврухин Андрей Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: LavruhinAA@omgups.ru

Окишев Андрей Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: OkishevAS@omgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Малютин, А. Г. Архитектурные аспекты реализации корпоративной информационной системы мониторинга и учета ресурсов [Текст] / А. Г. Малютин, А. А. Лаврухин, А. С. Окишев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – №4(32). – С. 130 – 141.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Malyutin Andrey Gennadievich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph.D. in Technical Sciences, head of the department «Automatic and control systems», OSTU.

Phone: (3812) 31-05-89.

E-mail: MalyutinAG@omgups.ru

Lavrukhin Andrey Aleksandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph.D. in Technical Sciences, the senior lecturer of the department «Automatic and control systems», OSTU.

Phone: (3812) 31-05-89.

E-mail: LavruhinAA@omgups.ru

Okishev Andrey Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph.D. in Technical Sciences, the senior lecturer of the department «Automatic and control systems», OSTU.

Phone: (3812) 31-05-89.

E-mail: OkishevAS@omgups.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Malyutin A. G. Architectural aspects of the implementation of the corporate information system for monitoring and resources accounting. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2017, vol. 32, no 4, pp. 130 – 141 (In Russian).

С. В. Савельев, В. Б. Пермяков, М. К. Шушубаева

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), г. Омск, Российская Федерация

О ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВИБРАЦИОННЫХ КАТКОВ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Аннотация. В статье представлены теоретические исследования взаимодействия уплотняющей машины с грунтами земляного полотна железнодорожной насыпи. Результаты исследований позволяют установить параметры уплотнителя, обеспечивающие эффективное протекание процесса уплотнения грунтовой среды. Установлено, что жесткость рабочего органа катка должна изменяться в широком диапазоне. Экспериментальные исследования нового образца рабочего органа подтвердили возможность регулирования жесткости в требуемом диапазоне для эффективного использования вибрационных катков при строительстве железнодорожных грунтовых насыпей.

Ключевые слова: железнодорожная насыпь, грунт, деформация, уравнение, жесткость, рабочий орган, уплотнение, эффективность.

Sergey V. Savelev, Vladislav B. Permyakov, Madina K. Shushubaeva

Siberian state automobile and highway university (SibADI), Omsk, the Russian Federation

ABOUT INCREASE OF EFFICIENCY OF USE OF VIBRATING ROLLERS IN THE CONSTRUCTION OF RAILWAY SUBGRADE

Abstract. The article presents theoretical studies of the interaction of the compacting machine with the soil of the road bed of the railway embankment. The results of the studies make it possible to establish the parameters of the sealant, which ensure an efficient flow of the compaction process of the ground environment. It is established that the rigidity of the working body of the roller must vary over a wide range. Experimental studies of a new sample of the working body confirmed the possibility of adjusting the rigidity in the required range for the effective use of vibrating rollers in the construction of railroad soil embankments.

Keywords: railway embankment, soil, deformation, equation, rigidity, working element, compaction, efficiency.

Строительство транспортной инфраструктуры и железнодорожных путей сообщения является важнейшей задачей для развития экономики нашей страны. Особое внимание при строительстве железных дорог необходимо уделять уплотнению грунтовой насыпи железной дороги. Именно земляное полотно является несущей конструкцией и воспринимает нагрузку от верхнего строения пути и железнодорожного подвижного состава, равномерно распределяет ее на нижележащий естественный грунт. Качественное и эффективное уплотнение земляного полотна обеспечивает его прочность, долговечность и работоспособность, а от этих факторов зависят работоспособность и безопасность всей железной дороги. Поэтому для осуществления операции уплотнения грунтовых насыпей необходимо использовать эффективные и высокопроизводительные машины – вибрационные катки.

Эффективность работы любой уплотняющей машины напрямую зависит от правильно подобранных конструктивных и режимных параметров, выбор которых обусловлен свойствами уплотняемых материалов. У различных типов грунтов процесс деформации протекает по-разному и требует приложения различных видов циклических нагрузок. Эффективность процесса уплотнения зависит прежде всего от соответствия тех или иных параметров машины определенным свойствам материала, меняющимся в процессе его деформирования.

Многие мировые производители, такие как BOMAG, HAMM, CATERPILLAR и другие, делают ставку конкретно на виброкатки, так как вибрационные процессы происходят в большей степени эффективнее статической укатки. Изменение нагрузки на материал у виброкатков происходит в первую очередь за счет дискретного или плавного изменения частоты колебаний и величины вынуждающей силы вибровозбудителя. Используются различные системы автоматического контроля качества процесса уплотнения, но этого явно недостаточно для обеспечения эффективной работы вибрационных катков. В первую очередь необходимо полагаться не только на технологические параметры – толщину, ширину слоя и его «первоначальные свойства», но и на их преобразование в процессе уплотнения. В основном это предел прочности материала, модуль упругости и т. д. Тем не менее для вибрационного уплотнения важнейшим фактором являются еще и реологические свойства материала – вязкость и жесткость, которые также меняются в процессе укатки. Исходя из сказанного стоит отметить, что для эффективной работы вибрационных катков необходимо не только регулировать параметры вибрации, но и изменять реологию рабочего органа уплотнителя [4, 5], что практически не применяется на современной уплотняющей технике. И именно это решение может дать перспективное направление совершенствования вибрационных катков. Расчетная схема взаимодействия рабочего органа катка с упруговязкопластичной средой представлена на рисунке 1.

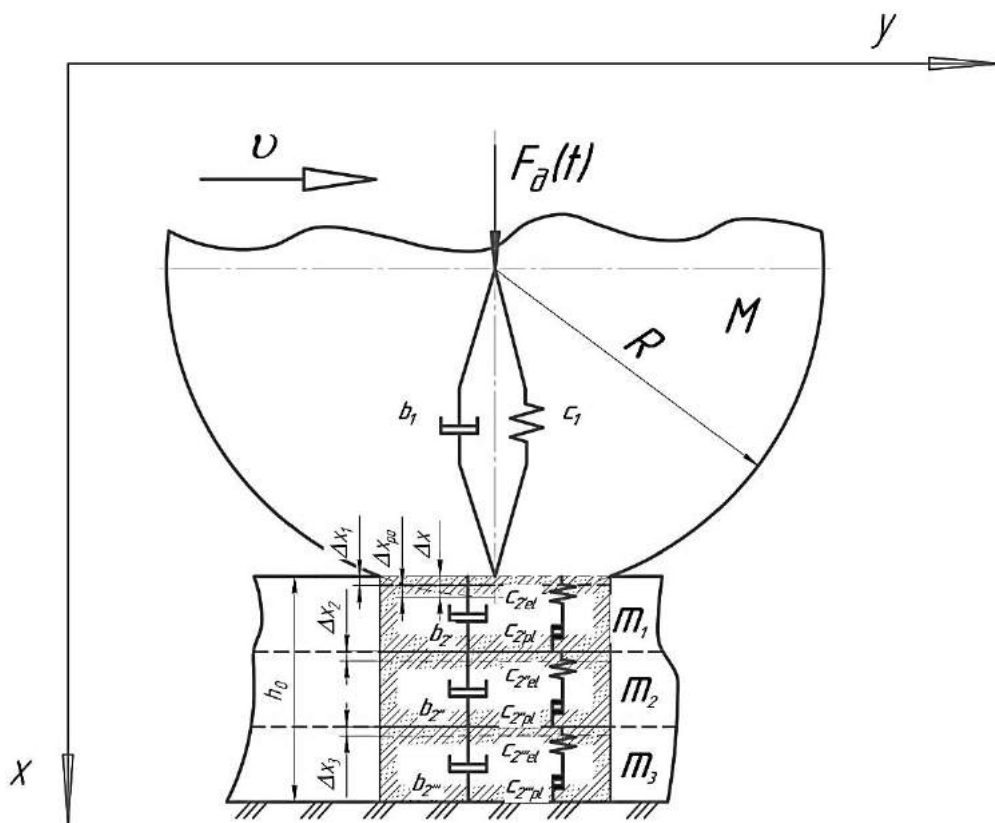


Рисунок 1 – Расчетная схема взаимодействия рабочего органа катка с упруговязкопластичной средой

На рисунке 1 обозначено: Δx_{po} – деформация рабочего органа, м; c_1 – жесткость РО, Н/м; b_1 – коэффициент вязкого трения РО, Нс/м; M – масса, приходящаяся на рабочий орган катка, кг; Δx_i – деформация соответствующего элементарного столба среды, м; $m = \rho_i V_i$ – соот-

ветствующая приведенная масса столба, кг; ρ_i – плотность соответствующего элементарного столба, кг/м³; V_i – объем соответствующего элементарного столба, м³; h_0 – толщина уплотняемого слоя среды, м; S – площадь контакта, м²; E_2 – модуль деформации среды, Па; $c_i^2 = E_2 S / h_i$ – жесткость элементарного столба среды, Н/м; $b_i^2 = \eta S / h_i$ – коэффициент вязкого трения элементарного столба среды, Нс/м; η – вязкость деформируемой среды, Нс/м²; $F_{\text{ст}} = Mg$ – сила тяжести, приходящаяся на рабочий орган катка, Н; $F_{\text{о}}(t) = F_0 \sin(\omega t) + F_{\text{ст}}$, Н; ω – частота вибровозбудителя, с⁻¹.

Описание деформации любых процессов – достаточно сложная задача. Изменение напряжений и преобразований в грунтах с помощью приложения к ним внешней силы от рабочего органа должно приводить к требуемым физико-механическим свойствам среды, для грунтовых насыпей это соответствующие плотность и прочность. Представим простой столб уплотняемой среды призматической формы определенных объема и массы, на который воздействует внешняя периодическая сила $F_0 \sin(\omega t)$ (вибрация рабочего органа катка). Действие внешней силы на деформируемую среду с частотой ω запишем в виде дифференциального уравнения движения массы среды при нагружении [2 – 4]:

$$m\Delta\ddot{x} + b_2(\Delta x_{\text{po}}, \Delta x)\Delta\dot{x} + c_2(\Delta x_{\text{po}}, \Delta x)\Delta x = F_{\text{о}}(t), \quad (1)$$

где Δx – деформация среды, м; Δx_{po} – деформация РО, м; m – приведенная масса среды, кг; F – внешняя сила, Н; c_2 – жесткость деформируемого столба среды, Н/м; b_2 – коэффициент вязкого трения деформируемого объема среды, Нс/м; t – время, с.

Начальными условиями, определяющими движение системы при нагружении циклического характера, будут задаваемые для начала каждого цикла соотношения $\Delta x_{\text{po}}(0) = 0$, $\Delta x(0) = 0$, $\Delta\dot{x}_{\text{po}}(0) = 0$, $\Delta\dot{x}(0) = 0$. При этом начальное положение координаты грунтового объема после начала разгрузки фиксируется значением набранной за цикл пластической деформации.

Рассматривается физически обоснованное приближенное описание процесса в рамках циклической модели для системы с переменными параметрами [3]. Для каждого цикла виброуплотнения можно считать деформацию среды изменяющейся в зависимости от меняющейся плотности и модуля деформации.

Уравнение динамики системы может быть записано следующим образом:

$$F_{\text{о}}(t) = F_1(t) + F_2(t), \quad (2)$$

где F_1 – сила сопротивления деформации рабочего органа,

$$F_1(\Delta x_{\text{po}}) = E_1 L (\sqrt{2R\Delta x_{\text{po}} - (\Delta x_{\text{po}})^2} + (R - \Delta x_{\text{po}}) \arccos(\frac{R - \Delta x_{\text{po}}}{R})), \quad (3)$$

где L – ширина рабочего органа, м; R – радиус рабочего органа, м, при этом диссипация энергии за счет вязких свойств материала рабочего органа может считаться пренебрежимо малой (по сравнению с таковой для уплотняемого объема среды);

F_2 – суммарная сила сопротивления деформированию грунтовой среды,

$$F_2(\Delta x_{\text{po}}, \Delta x) = \frac{E_2 L}{h_0} (2\sqrt{2R\Delta x_{\text{po}} - (\Delta x_{\text{po}})^2} + h_0 \tan \varphi) \Delta x + \frac{4\eta L}{\sin \varphi} \Delta\dot{x}, \quad (4)$$

где E_1 и E_2 – модули деформации соответственно рабочего органа и среды; φ – угол внутреннего трения среды.

С учетом того, что в течение всего процесса уплотнения жесткость рабочего органа должна всегда быть выше жесткости уплотняемой среды, условие для работы на деформацию среды, совершенной внешней силой, будет иметь вид:

$$\int_{\Delta x_{po}}^{\Delta x_0} F_1(x) dx = \int_0^{\Delta x} F_2(\Delta x_{po}, x) dx, \quad (5)$$

где под Δx_0 понимается максимальное смещение рабочего органа под воздействием вынуждающей силы на абсолютно жесткой поверхности в каждый момент времени, переменная интегрирования x соответствует текущей координате смещения. Смысл уравнения (11) состоит в том, что работа, совершаемая источником периодического силового воздействия, тратится на деформацию грунта с учетом преодоления сил вязкого трения.

Представленное уравнение не может быть решено без наложения необходимой дополнительной связи. Именно эта связь может быть получена из условия равновесия сил сопротивления деформированию среды и рабочего органа (РО) в момент «равновесия» системы в линейном приближении:

$$F_1(\Delta x_{po}) = E_1 L \left(\sqrt{2 \frac{\Delta x_{po}}{R}} \right) \Delta x_{po} - \text{сила сопротивления деформации рабочего органа};$$

$$F_2(\Delta x_{po}, \Delta x) = \frac{2L}{h} (\sqrt{2R\Delta x_{po}} + h_0 \tan \varphi) E_2 \Delta x + \frac{4L}{\sin \varphi} \eta \Delta \dot{x} - \text{сила сопротивления деформации}$$

среды. Отсюда величина может быть определена величина смещения, Δx_0 как

$$\Delta x = \left(\sqrt{\frac{R}{2}} \frac{F(t)}{EL} \right).$$

Условие равенства сил в момент «установившегося равновесия» системы определит величины деформаций грунта и рабочего органа и будет иметь вид:

$$E_1 L \left(\sqrt{2 \frac{\Delta x_{po}}{R}} \right) \Delta x_{po} = \frac{2L}{h_0} (\sqrt{2R\Delta x_{po}} + h_0 \tan \varphi) E_2 \Delta x. \quad (6)$$

Наложим связь $\Delta x = f(\Delta x_{po})$, что позволит решить уравнение (5), а затем найти деформацию среды на одном цикле динамического воздействия. Уравнение (5) при этом имеет вид:

$$\frac{2}{5} EL \left(\left(\sqrt{2 \frac{\Delta x}{R}} \right) (\Delta x) - \left(\sqrt{2 \frac{\Delta x}{R}} \right) (\Delta x) \right) + \frac{L \eta \omega}{\sin \varphi} \left(\frac{E \left(\sqrt{2 \frac{\Delta x}{R}} \right) \Delta x}{(2 \sqrt{2R\Delta x} + h \tan \varphi) E} \right) = 0. \quad (7)$$

Здесь первое слагаемое представляет энергию, затраченную на работу по деформации грунта, второе – среднюю энергию, затрачиваемую на преодоление сил вязкого трения. Для

момента времени, соответствующего амплитудному значению вынуждающей силы (окончанию этапа нагружения), $\Delta x = \left(\sqrt{\frac{R}{2}} \frac{F}{EL} \right)$.

Ненулевое решение этого уравнения и представляет собой деформацию рабочего органа в момент «равновесия», которое после подстановки в уравнение связи (6) позволяет получить деформацию среды Δx . Учет изменения жесткости и вязкости среды в зависимости от числа циклов виброуплотнения производится стандартным образом [2, 3].

Принимаем, что для каждого цикла вибрации показатели вязкости и упругости постоянные, тогда $\Delta x_i = \Delta x_i(c_{2(i-1)}, b_{2(i-1)})$ и деформация на последующем шаге есть функция от значений вязкости и упругости, принятых для предыдущего цикла.

Учитывая форму объема уплотняемой среды и действуя в рамках общепринятых допущений [2, 3], можно без труда получить выражение для нормальных напряжений по толщине слоя, перераспределяемой с глубиной:

$$F_0(\Delta x_{po}, \Delta x) = \sigma(x)S. \quad (8)$$

И далее –

$$\sigma(x) = \frac{\frac{F_0}{\Delta x_0} \Delta x_{po}}{S(x)}, \quad (9)$$

где $S(x)$ – площадь сечения уплотняемой области грунта в зависимости от глубины,

$$S(x) = L(2\sqrt{2R\Delta x_{po}} + 2x \tan \varphi). \quad (10)$$

В качестве дополнительного критерия эффективности процесса уплотнения рассматриваем значения виброускорений в грунтовой среде (по Д. Д. Баркану [5]), используя зависимость

$$A(x) = -\Delta x \omega^2 = f(\sigma(x)). \quad (11)$$

Математическое моделирование процесса уплотнения упруговязкопластичной грунтовой среды рабочим органом с изменяемой жесткостью проводилось в программной среде Maple 11. Блок-схема расчета представлена на рисунке 2.

Данные расчеты позволяют определить интенсивность процесса деформирования среды и рациональные режимы процесса уплотнения с учетом изменяемой жесткости РО. Выявляя зависимость жесткости рабочего органа на диапазон адаптации контактных напряжений, определим время, величину и частоту приложения внешней силы в зависимости от изменяющихся свойств деформируемой среды [2, 6].

Разработанные математические положения позволяют провести всесторонние исследования деформирования грунтовой среды рабочими органами с изменяемой жесткостью, определить рациональный диапазон жесткости РО, величину и частоту приложения внешней силы с учетом деформативных свойств уплотняемой среды.

Анализ влияния жесткости пневмошинного рабочего органа на интенсивность процесса уплотнения в упруговязкопластичном слое среды на примере легкого суглинистого грунта показал, что рациональная частота колебаний вибровозбудителя находится в пределах от 30 до 40 Гц, значение величины внешней периодической (вынуждающей) силы – в пределах от 50 до 100 кН.

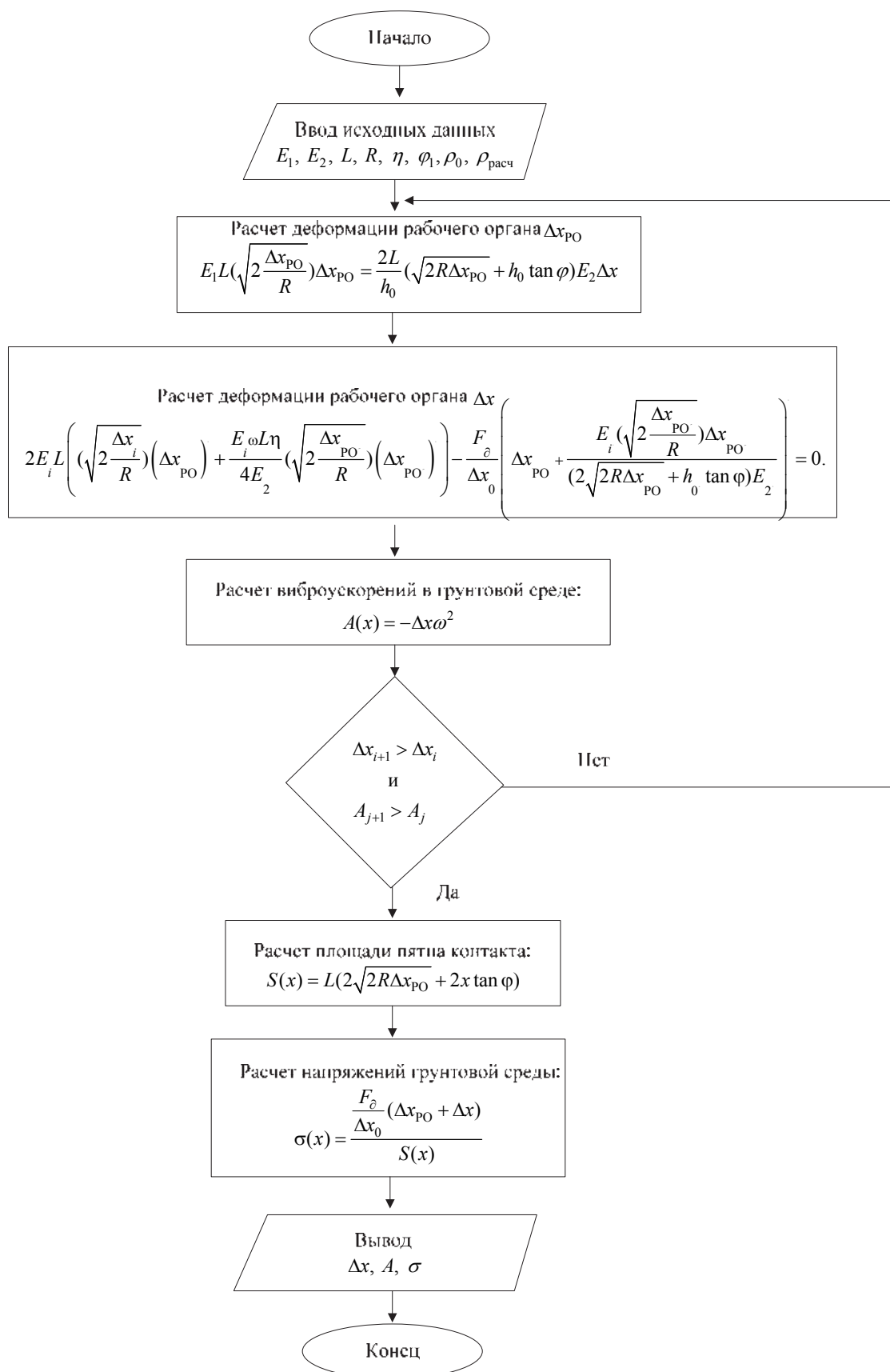


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма расчета в соответствии с моделью

Полученные зависимости дают наглядное представление о влиянии жесткости рабочего органа катка на интенсивность деформирования грунтов. Помимо жесткости на процесс уплотнения существенное влияние оказывают величина вынуждающей силы и частота ее приложения. При этом стоит отметить, что рациональные значения вынуждающей силы и частоты ее приложения при уплотнении грунтовых сред определены диапазонами 40 – 100 кН и 15 – 60 ГЦ соответственно [5, 6]. В исследования значения силы и частоты задаются в представленных диапазонах в соответствии с алгоритмом расчета (см. рисунок 2).

При выборе параметров уплотняющей машины необходимо определять их рациональные или даже оптимальные значения, учитывая свойства уплотняемого грунта.

Анализ исследований выявил существенное отличие рационального диапазона значений жесткости РО для связанных и несвязанных грунтовых сред. На рисунке 3 представлены зависимости напряжений от глубины при различной жесткости рабочего органа для суглинка.

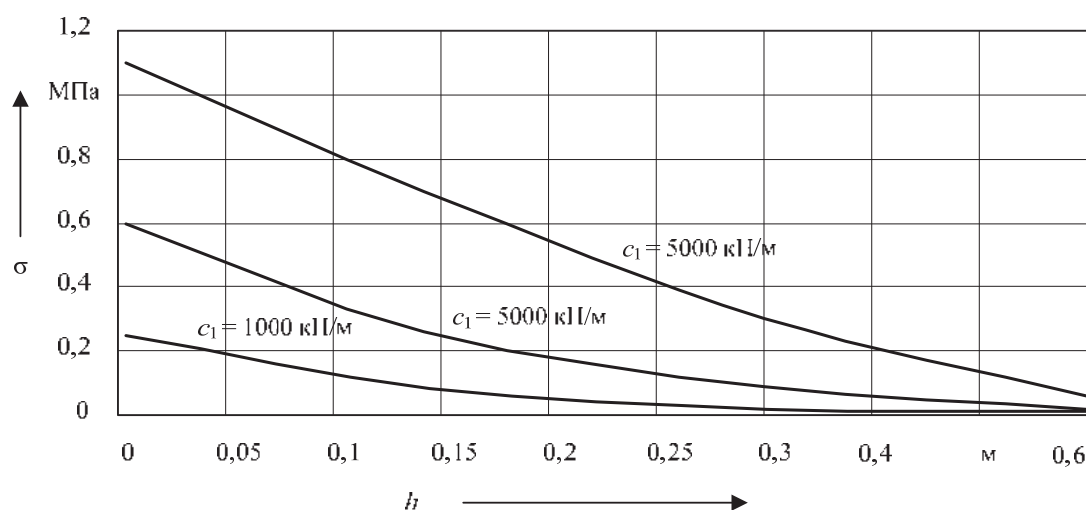


Рисунок 3 – Зависимость напряжений от глубины в суглинистом грунтовом слое при различной жесткости рабочего органа

Контактные напряжения не могут превышать предел прочности уплотняемого грунта [7]. Для плотного суглинистого грунта предельные контактные напряжения соответствуют диапазону от 0,7 до 1,2 МПа, а средние, по толщине слоя напряжения, – от 0,3 до 0,6 МПа. Жесткость рабочего органа, обеспечивающая данный диапазон напряжений (рисунок 6), соответствует значениям от 4000 до 5000 кН/м.

На рисунке 4 отражено, что преобразование жесткости РО в указанном диапазоне позволяет добиться максимально возможных контактных напряжений 0,8 МПа у поверхности слоя с их постепенным затуханием до глубины 0,4 м, что соответствует рациональной толщине уплотняемого слоя для связанного суглинистого грунта.

Экспериментальная часть исследований заключалась в практической реализации теоретических данных. Был разработан ряд новых рабочих органов [8 – 10], способных в требуемом диапазоне изменять свою жесткость. Для определения жесткости и коэффициента вязкого трения изучался экспериментальный образец одного из предложенных технических решений – пневмошинного рабочего органа, оснащенного металлическими бандажами. Суть конструкции заключается в том, что металлические бандажи не дают шинам деформироваться и таким образом повышают жесткость всего рабочего органа (рисунок 5). Преимущество такой конструкции не только в повышенной жесткости, но и в том, что ее можно плавно изменять, регулируя давление в шинах или количество бандажей в зависимости от требований к эффективности процесса уплотнения земляного полотна.

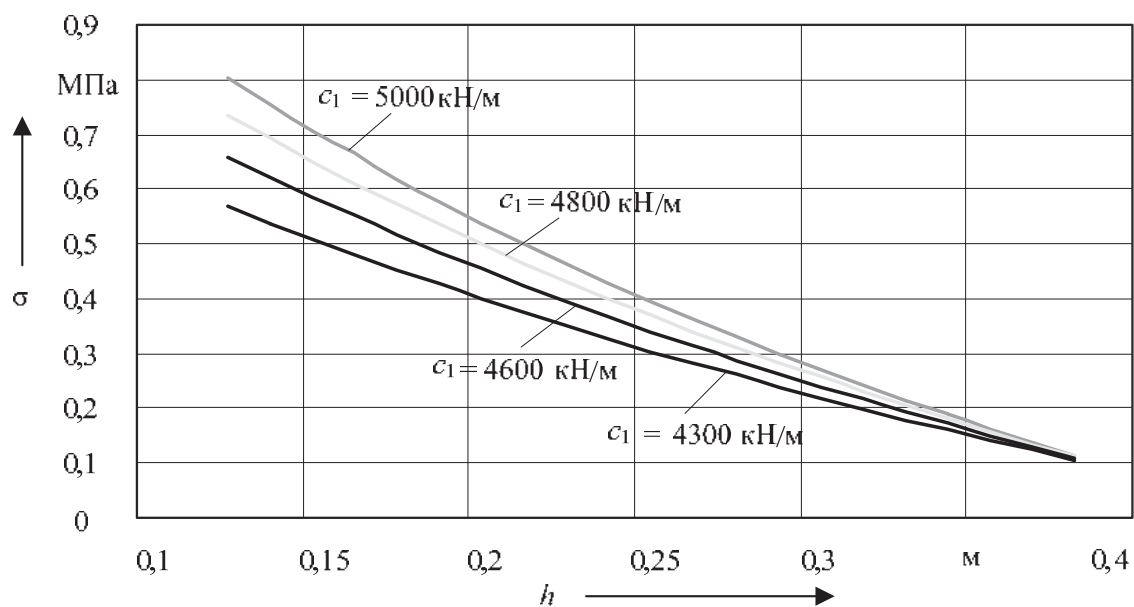


Рисунок 4 – Зависимость напряжений в суглинистом грунте от глубины при различной жесткости рабочего органа



Рисунок 5 – Экспериментальные исследования нового рабочего органа катка с изменяющейся жесткостью

Анализ полученных теоретических и экспериментальных результатов дает наглядное представление о интенсивности процесса деформирования обрабатываемой грунтовой среды с учетом параметров вибрации и жесткости рабочих органов виброкатков. Практическая ценность полученных результатов обуславливается необходимостью увеличения эффективности использования вибрационных катков для повышения их производительности, снижения себестоимости, энергозатрат и повышения качества работ при возведении земляного полотна железной дороги.

Список литературы

1. Савельев, С. В. Использование деформативных свойств пневмошин в вибрационных машинах [Текст] / С. В. Савельев, В. Б. Пермяков, В. В. Михеев // Вестник машиностроения. – 2014. – № 11. – С. 56, 57.
2. Овчинников, П. Ф. К теории вибрационных машин с учетом влияния обрабатываемой среды [Текст] / П. Ф. Овчинников // Прикладная механика. – 1965. – № 7. – С. 84 – 90.
3. Тимошенко, С. П. Колебания в инженерном деле [Текст] / С. П. Тимошенко, Д. Х. Янг, У. Уивер; Под ред. Э. И. Григолюка / Пер. с англ. Л. Г. Корнейчука. – М.: Машиностроение, 1985. – 472 с.
4. Корчагин, П. А. Управление жесткостью резинокордной оболочки [Текст] / П. А. Корчагин, В. В. Столяров // Известия высших учебных заведений. Строительство / Новосибирский гос. архитектурно-строительный ун-т. – Новосибирск. – 2007. – № 8. – С. 83 – 87.
5. Баркан, Д. Д. Динамика оснований и фундаментов [Текст] / Д. Д. Баркан. – М.: Стройвоенмориздат, 1948. – 411 с.
6. Савельев, С. В. Уплотнение грунтов катками с адаптивными рабочими органами: Монография [Текст] / С. В. Савельев / Сибирский гос. автомобильно-дорожный ун-т. – Омск, 2010. – 122 с.
7. Технологические машины и комплексы в дорожном строительстве (производственная и техническая эксплуатация): Учебное пособие [Текст] / В. Б. Пермяков, С. В. Савельев и др.; Под ред. В. Б. Пермякова / ООО «ИД «БАСТЕТ». – М., 2014. – 752 с.
8. Пат. 2341609 на изобретение. Российская Федерация, МПК: E01 C 19/28, 19./28. Валец дорожного катка [Текст] / Савельев С. В.; заявитель и патентообладатель Сибирская гос. автомобильно-дорожная академия. – № 20061395450; заявл. 07.11.2006; опубл. 20.12.2008.
9. Пат. № 2552364 на изобретение Российская Федерация, МПК: E01 C 19/28, 19./28. Валец дорожного катка / Савельев С. В., Демиденко А. И., Михеев В. В.; заявитель и патентообладатель Сибирская гос. автомобильно-дорожная академия. – № 2013107580; заявл. 20.02.2013; опубл. 16.05.2014.
10. Пат. № 2572478 на изобретение Российская Федерация, МПК: E01 C 19/28, 19./28. Самоходный вибрационный каток / Савельев С. В., Михеев В. В.; заявитель и патентообладатель Омский гос. техн. ун-т. – № 2014130611; заявл. 22.06.2014; опубл. 10.12.2015.

References

1. Savel'ev S. V., Permyakov V. B., Mikheev V. V. The use of the deformation properties of pneumosan in vibration machines [Ispol'zovanie deformativnykh svoystv pnevmoshin v vibracionnyh mashinah]. *Journal of mechanical engineering*. 2014. no. 11, pp. 56 – 57.
2. Ovchinnikov P. F. The theory of vibrating machines with the influence of the processing environment [Teorii vibracionnyh mashin s uchetom vlijanija obrabatyvaemoj sredy]. *Applied mechanics*. 1965. no. 7. pp. 84 – 90.
3. Timoshenko S. P. Oscillations in engineering [Kolebanija v inzhenernom dele]. *Mashinostroenie*, 1985. 472 p.
4. Korchagin P. A., Stolyarov V. V. Control of the stiffness of the rubber-shell [Upravlenie zhestkost'ju rezinokordnoj obolochki]. *News of higher educational institutions. Construction*. no. 8 2007. pp. 83 – 87.

5. Barkan D. D. *Dinamika osnovanij i fundamentov* (Dynamics of bases and foundations) Moscow: Stroiformat, 1948. 411 p.
6. Saveliev S. V. *Uplotnenie gruntov katkami s adaptivnymi rabochimi organami: monografija* (Compaction rollers with adaptive working bodies: monograph) Omsk: SibADI, 2010. 122 p.
7. Permyakov V. B., Saveliev S. V., Melnik S. V., Ivanov V. I. *Tehnologicheskie mashiny i komplekсы v dorozhnom stroitel'stve (proizvodstvennaja i tehničeskaja jekspluatacija)* (Technological machines and complexes in road construction (production and maintenance)). Moscow: ООО «ID»BASTET», 2014. 752 p.
8. Saveliev S. V. *Patent RU 2341609 of the invention. IPC: E01 With 19/28, 19./28. 20.12.2008.*
9. Saveliev S. V., Demidenko A. I., Mikheev V. V. *Patent RU. 2552364 for invention IPC: E01 With 19/28, 19./28. 16.05.2014.*
10. Saveliev S. V., Mikheev, V. V. *Patent RU. 2572478 for invention IPC: E01 With 19/28, 19./28. 10.12.2015.*

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Савельев Сергей Валерьевич

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ).

Мира пр-т, 5, г. Омск, 644080, Российская Федерация.

Доктор технических наук, доцент кафедры «ЭСМиК», СибАДИ.

Тел: 8-965-980-00-91.

Email: saveliev_sergval@mail.ru

Пермяков Владислав Борисович

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ).

Мира пр-т, 5, г. Омск, 644080, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «ЭСМиК», СибАДИ.

Тел: 8-3812-65-98-81.

Email: permyakov_vladislav@mail.ru

Шушубаева Мадина Кайргельдиновна

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ).

Мира пр-т, 5, г. Омск, 644080, Российская Федерация.

Аспирантка кафедры «ЭСМиК», СибАДИ.

Тел: 8-3913-601-64-37.

Email: gitara_91@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Савельев, С. В. Повышение эффективности использования вибрационных катков при строительстве земляного полотна железной дороги [Текст] / С. В. Савельев, В. Б. Пермяков, М. К. Шушубаева // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 4(32). – С. 142 – 151.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Saveliev Sergey Valerievich

Siberian state automobile and road University (SibADI).

PR-t Mira 5, Omsk, 644080, Russian Federation.

Doctor of technical Sciences, docent of the Department «Esmik», SibADI.

Tel: 8-965-980-00-91.

Email: saveliev_sergval@mail.ru

Permyakov Vladislav Borisovich

Siberian state automobile and road University (SibADI).

PR-t Mira 5, Omsk, 644080, Russian Federation.

Doctor of technical Sciences, Professor of the Department «Esmik», SibADI.

Tel: 8-3812-65-98-81.

Email: permyakov_vladislav@mail.ru

Shushubaeva Madina Kairgeldinovna

Siberian state automobile and road University (SibADI).

PR-t Mira 5, Omsk, 644080, Russian Federation.

Postgraduate student of the Department «Esmik», SibADI.

Tel: 8-3913-601-64-37.

Email: gitara_91@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Savel'ev S. V. Increase of efficiency of use of vibrating rollers in the construction of the railway earthlings roads [Text] / S. Savel'ev, V. B. Permyakov, M. Kosubaev // proceedings of the TRANS-Siberian railway / the Omsk state University of Railways. – Omsk, 2017, vol. 32, no 4, pp. 142 – 151 (In Russian).

В. А. Аксенов¹, О. С. Юдаева², Е. А. Сорокина¹

¹ ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», г. Москва, Российская Федерация,

² ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожной гигиены Роспотребнадзора», г. Москва, Российская Федерация

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ТРУДА И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ФАКТОРОВ В АСПЕКТЕ ВЛИЯНИЯ НА ЗДОРОВЬЕ МОЙЩИКОВ-УБОРЩИКОВ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Аннотация. Проведено исследование рабочего места мойщиков-уборщиков подвижного состава с целью определения основных профессиональных заболеваний и причин их возникновения. Рассмотрена теория построения рациональных режимов труда и отдыха для работающих в межсезонный период на открытом воздухе. Приведено уравнение интегрального показателя условий охлаждения. Перечислены риски, возникающие при работе на холоде, описаны основные меры защиты работников, такие как средства индивидуальной защиты, приведены рекомендации по оборудованию комнат отдыха. Рассмотрены технологические этапы ручной мойки пассажирских вагонов и установлен ряд вредных производственных факторов на рабочем месте мойщиков-уборщиков подвижного состава. В процессе анализа условий труда рассматриваемой профессии установлен ряд профессиональных заболеваний, таких как острые интоксикации, дерматиты и дерматозы.

Представлены результаты проведенных испытаний по оценке индекса токсичности и эксплуатационных испытаний образцов моющего средства «Транс-Эко» с целью улучшения условий труда мойщиков пассажирских вагонов.

Ключевые слова: мойщики-уборщики подвижного состава, динамика работоспособности, терморегуляция, патология-интоксикация, дерматиты, дерматозы, режимы труда и отдыха, ручная мойка, профессиональные заболевания, кислотное моющее средство.

Vladimir A. Aksenov¹, Oksana S. Yudaeva², Ekaterina A. Sorokina¹

¹ FGB OU VO Russian University of Transport (MIIT), Moscow, the Russian Federation

² FSUE All-Russian Scientific Research Institute of Railway Hygiene of Rospotrebnadzor, Moscow, the Russian Federation

Abstract. Within the framework of the article, a study was made of the workplace of wheelchair washers for the purpose of determining the main occupational diseases and the causes of their occurrence. The theory of constructing rational modes of work and rest for working in the off-season in the open air is considered. The equation of integral index of cooling conditions is given. The risks associated with working in the cold are listed, as well as basic protection measures for workers, such as personal protective equipment and recommendations for restroom equipment. Within the framework of the article, the technological stages of manual washing of passenger carriages and a number of harmful production factors at the workplace of wheelchair washers are considered. In the process of analyzing the working conditions of the profession in question, a number of prof. diseases such as acute intoxication, dermatitis and dermatosis.

The results of the conducted tests for the evaluation of the toxicity index and operational tests of samples of the detergent «Trans-Eco» with the aim of improving the working conditions of the passenger car wipers are presented.

Keywords: washing-cleaners of rolling stock, dynamics of working capacity, thermoregulation, pathology-intoxication, dermatitis, dermatoses regimes of work and rest, hand washing, occupational diseases, acid detergent.

В процессе трудовой деятельности человек нуждается в периодическом кратковременном отдыхе для поддержания на постоянном уровне своей работоспособности. Потребность в таком отдыхе индивидуальна и зависит от здоровья человека, его психофизиологического состояния, возраста, пола, занимаемой профессии и квалификации.

Научной основой для построения рациональных режимов труда и отдыха является динамика работоспособности, отражающая влияние всего комплекса условий труда на организм работника. В свою очередь работоспособность изучается по психофизиологическим и технико-экономическим показателям групп работников в течение определенного отрезка времени: рабочей смены, недели, месяца. При рассмотрении временного периода, равного стандартной 12-часовой рабочей смене (рисунок 1), наивысший уровень работоспособности отмеча-

ется в утренние и дневные часы – с 8 до 20 часов. Минимальная работоспособность – в ночные часы. Особенно неблагоприятен промежуток от 1 до 3 – 4 часов ночи [6].

Из-за политики сдельной оплаты труда сотрудники стараются обмыть большее количество вагонов, нарушают режим труда и отдыха и режим пребывания на открытом воздухе при выполнении работ в межсезонный период, что влечет за собой не только ухудшение результата работ по обмывке подвижного состава, но и увеличение риска возникновения профессиональных заболеваний.

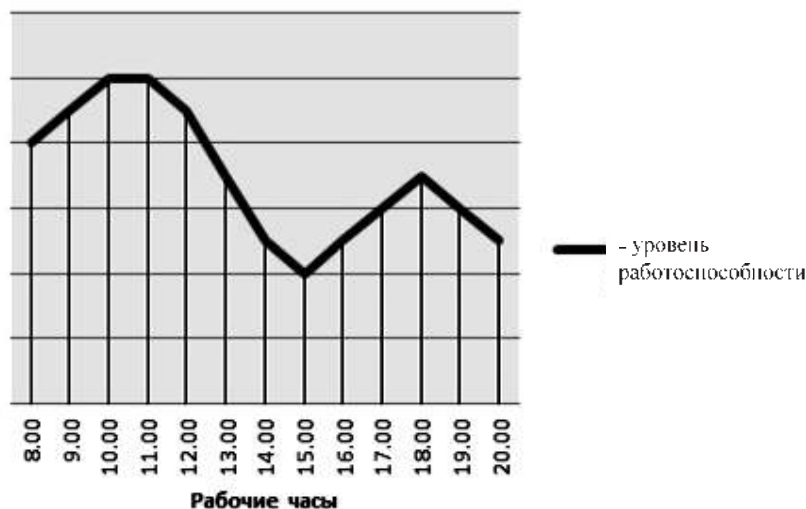


Рисунок 1 – График работоспособности работника

Мойщики-уборщики подвижного состава, работающие на ручной обмывке пассажирских вагонов, осуществляют свою деятельность на открытом воздухе. Для этих работников существует потенциальный риск получения в межсезонный период холодовых травм.

Проблемы работы на открытом воздухе связаны с климатическими и погодными факторами: температурой воздуха, влажностью, ветром, солнечным излучением, осадками.

Общее и локальное охлаждение человека способствует изменению его двигательной активности, нарушает координацию движения и способность выполнять точные операции, вызывает тормозные процессы в коре головного мозга [5].

Основная роль в защите работника от холода зависит от поведенческой терморегуляции, которая заключается в активном, целенаправленном регулировании термической нагрузки на организм. В связи с необходимостью проведения работ на открытой территории в межсезонный период большое значение имеют средства индивидуальной защиты (СИЗ). Однако возможности должной защиты работника от охлаждения с помощью одной лишь одежды ограничены по причине малой эффективности утепления стоп и кистей, а также в связи с охлаждением лица и органов дыхания. В связи с этим возникает необходимость регламентирования временных периодов пребывания на холоде и времени, необходимого на обогрев, применительно к различным метеоусловиям, физической активности и теплоизоляции СИЗ [2].

Согласно Методическим рекомендациям МР 2.2.7.2129-06 об общих гигиенических требованиях к режиму работ в охлаждающей среде к работе на холоде допускаются лица, прошедшие медосмотры в соответствии с действующими приказами Минздравсоцразвития России и не имеющие противопоказаний по здоровью. Работы на открытом воздухе в межсезонный период рекомендуется проводить при соблюдении требований к мерам защиты работников от охлаждения. Лиц, приступающих к работе на холоде, следует проинформировать о его влиянии на организм и мерах предупреждения охлаждения. Работающие на открытой территории в межсезонный период года должны быть обеспечены комплектом СИЗ от холода,

имеющим теплоизоляцию, величина которой соответствует значениям для различных климатических регионов (поясов). При разработке режима работы на период рабочей смены следует ориентироваться на допустимую степень охлаждения работающих, регламентируемую временем непрерывного пребывания на холоде и временем обогрева. При определении продолжительности однократного за рабочую смену пребывания на холоде можно ориентироваться на предельно допустимую степень охлаждения человека [1].

В соответствии с конкретными величинами температуры воздуха и скорости ветра может быть определен риск получения холодовых травм открытых областей тела человека, определяющий степень безопасности работ в охлаждающей среде с учетом времени холодового воздействия (таблица 1) [4].

Таблица 1 – Зависимость риска получения холодовых травм от интегрального показателя условий охлаждения (ИПУОО, балл)

ИПУОО, балл	Риск получения холодовых травм	Продолжительность безопасного пребывания на холоде, не более, мин
≤ 34	Игнорируемый (отсутствие холодовых травм)	Длительное
$34 < \text{ИПУОО} \leq 47$	Умеренный	60
$47 < \text{ИПУОО} \leq 57$	Критический	1
> 57	Катастрофический	0,5

Интегральный показатель условий охлаждения (обморожения) – ИПУОО – следует определять согласно уравнению:

$$\text{ИПУОО} = 34,654 - 0,4664t_v + 0,6337V,$$

где t_v – температура воздуха, °C; V – скорость ветра, м/с.

Перерывы на обогрев могут сочетаться с перерывами на восстановление функционального состояния работника после выполнения физической работы. В обеденный перерыв работник должен быть обеспечен горячим питанием. Начинать работу на холоде следует не ранее чем через 10 мин после приема горячей пищи (чая и др.).

В целях нормализации теплового состояния температура воздуха в местах обогрева должна поддерживаться на уровне от 21 до 25°C. Помещение следует оборудовать устройствами для обогрева кистей и стоп, температура которых должна быть в диапазоне от 35 до 40°C [3].

В целях более быстрой нормализации теплового состояния организма и меньшей скорости охлаждения в последующий период пребывания на холоде в помещении для обогрева следует снимать верхнюю утепленную одежду, в связи с чем оно должно быть соответствующим образом оборудовано. Рассматриваемая нами технология мойки вагонов ручным способом состоит из шести технологических этапов (рисунок 2 и таблица 2).



Рисунок 2 – Ручная мойка пассажирских вагонов

Таблица 2 – Технологические этапы ручной мойки вагонов

Номер и наименование технологического этапа ручной мойки	Время выдержки, мин.
1. Предварительное ополаскивание кузова и крыши	2
2. Нанесение кислотного моющего раствора с выдержкой интервала времени	3 – 5
3. Дополнительное увлажнение стенок кузова распыленной водой для предотвращения высыхания нанесенного кислотного раствора	2
4. Ополаскивание стенок кузова вагона водой с одновременной обработкой щетками	3
5. Нанесение щелочного моющего раствора с выдержкой на омываемой поверхности	3 – 5
6. Промывка кузова вагона водопроводной водой для удаления остаточных загрязнений	2

В процессе изучения условий труда мойщиков-уборщиков подвижного состава авторами был установлен ряд вредных факторов на их рабочих местах (таблица 3).

Таблица 3 – Вредные факторы на рабочем месте мойщиков подвижного состава

№ п/п	Наименование производственного фактора	Нормативное значение	Фактическое значение	Класс условий труда по ФЗ № 426 от 28.12.2013
1	Химические вещества в воздушной среде ПДК, р. з. мг/м ³ :			3
	4 – аминокислотосульфоновая кислота	2	1,32	
	2 – гидроксипропан 1, 2, 3 – трикарбоновая кислота	2	1,7	
	натрий хлорид	2	0,6	
	сульфат натрия	10	0,3	
	ПАВ	–	0,15	
2	Микроклимат (работа на открытом воздухе): холодный период года; теплый период года	Зависит от климатической зоны	–	2 – 3.4 2 – 3.1
3	Освещенность (работа на открытом воздухе в светлое время суток)	–	–	2
Итоговый класс условий труда				3

Нами установлено, что основными профессиональными заболеваниями мойщиков подвижного состава, работающих ручным способом, является патология-интоксикация, причем резко преобладают острые ее формы, что говорит о нарушениях техники безопасности. На втором месте – профессиональные дерматиты, которые возникают при работе с моющими химическими веществами (кислотные и щелочные моющие средства).

Основные вредные факторы производственной среды и их последствия приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Профессиональные заболевания мойщиков подвижного состава

Профессия	Основные хозяйства и службы	Наиболее вредные факторы производственной среды	Профессиональные заболевания	
			по материалам клиники профцентра ОАО «РЖД»	дополнительно возможные, исходя из профессиональных вредностей
Мойщики вагонов	Вагонное Грузовые и коммерческие работы	Химические вещества	Интоксикации острые	Дерматозы Дерматиты
		Физические перегрузки	Заболевания опорно-двигательного аппарата и периферической нервной системы, дыхательной системы	
		Неблагоприятные климатические факторы		
		Патогенные микроорганизмы		

В целях улучшения условий труда и снижения заболеваемости рассматриваемой группы работников нами разработано экологически безопасное кислотное моющее средство «Транс-Эко» производства ООО «ЭПЦ «ЭкоСтройРесурс»» (ТУ 5637-002-77518113-2015).

Средство «Транс-Эко» удаляет загрязнения наружной поверхности пассажирских вагонов, образующиеся из атмосферной и дорожной пыли, копоти, маслянистых веществ и металлических частиц от истирания деталей ходовых частей, рельсов проводов контактной сети и токоприемников локомотивов [6].

Рабочие концентрации 4-го класса опасности (вещества малоопасные) по ГОСТ 12.1.007-76.

Биоразлагаемость средства в готовом виде – более 95 %.

Физико-химические характеристики моющего средства «Транс-Эко» представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Характеристики кислотного моющего средства «Транс-Эко»

№ п/п	Наименование показателя	Норма	Результаты испытаний
1	Внешний вид и цвет	Порошок (таблетка) светло-оранжевого цвета	Соответствует
2	Запах	Зависит от применяемой отдушки	Отсутствуют
3	Водородный показатель (рН) 1%-го водного раствора	Не более 2,0	1,9
4	Плотность, г/см ³ , при 20 °С	Не более 1,08	1,04
5	Массовая доля поверхностно-активных веществ, %	Не менее 7,0 %	7,9
6	Очищающая способность, %, не менее	80,0	97,0 %

Проведенные авторами исследования образцов моющего средства «Транс-Эко» показали, что величина индекса токсичности раствора в соответствии с МР № 01.018-07 «Методика определения токсичности химических веществ, полимеров, материалов и изделий с помощью биотеста «Эколюм» составляет 18,3 % при норме до 20 % .

Эксплуатационные испытания (таблица 6) показали, что ярко выраженные грязепылевые и слабые железистые загрязнения удаляются полностью, не воздействуя на лакокрасочное покрытие.

Таблица 6 – Эксплуатационные испытания моющих средств

Вагон №	Тип загрязнений	Наименование образца ТМС	Концентрация раствора, %	Результат обмывки	Пенообразование	Воздействие на лакокрасочное покрытие (ЛКП)
017 11191 с полиуретановым ЛКП	Ярко выраженные грязепылевые, слабые железистые	Образец № 1 Кислотное моющее средство «Транс-Эко» (ТУ 5637-002-77518113-2015)	(3 %) 90 г средства на 3 л воды	Загрязнения удалены полностью	Практически отсутствует	Не отмечено
		Используемое в настоящее время «Рейс»	20 %	Загрязнения удалены практически полностью	Среднее	

На основании проведенных исследований сделаны следующие выводы.

1. Условия труда мойщиков-уборщиков подвижного состава в летний период соответствуют 3-му классу вредности.

Условия труда включают в себя такие вредные факторы производственной среды, как химические вещества, физические перегрузки, неблагоприятные климатические факторы и патогенные микроорганизмы.

2. Основные профессиональные заболевания мойщиков-уборщиков – острые интоксикации от токсичных моющих средств, заболевания опорно-двигательного аппарата и периферической нервной системы.

3. Разработано экологически безопасное кислотное средство для ручной мойки вагонов «Транс-Эко» с целью улучшения условий труда мойщиков-уборщиков подвижного состава, отвечающее современным требованиям гигиены труда и экологической безопасности.

Список литературы

1. ГОСТ 12.4.103-83. Система стандартов безопасности труда. Одежда специальная защитная, средства индивидуальной защиты ног и рук. Классификация [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 6 с.
2. ГОСТ Р ССБТ 12.4.185-99. Средства индивидуальной защиты от пониженных температур. Методы определения теплоизоляции комплекта [Текст]. – М.: Госстандарт России, 1999. – 14 с.
3. СП 2.2.1.1312-03. Гигиенические требования к проектированию вновь строящихся и реконструируемых промышленных предприятий [Текст] / Минздрав России. – М., 2003. – 42 с.
4. МР 2.2.7.2129-06. Режимы труда и отдыха работающих в холодное время на открытой территории или в неотапливаемых помещениях [Текст] / Научно-исследовательский институт медицины труда «РАМН». – М., 2006. – 32 с.
5. Афанасьева, Р. Ф. Охлаждающая среда и ее влияние на организм [Текст] // Профессиональный риск для здоровья работников / Р. Ф. Афанасьева, О. В. Бурмистрова; Под. ред. Н. Ф. Измерова, Э. И. Денисова. – М.: Травант, 2003. – С. 142 – 149.
6. Юдаева, О. С. Химико-аналитические исследования стеклопакетов, тонированных в массе, предназначенных для использования в конструкции пассажирских вагонов габарита RIC [Текст] / О. С. Юдаева, Е. А. Сорокина / ВНИИЖГ Роспотребнадзора. – М., 2015. – С. 58 – 68.
7. Аксенов, В. А. Анализ вредных производственных факторов на рабочем месте обслуживающего персонала подвижного состава [Текст] / В. А. Аксенов, О. С. Юдаева, Е. А. Сорокина: Материалы VIII всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов Роспотребнадзора / ФБУН НИИ дезинфектологии Роспотребнадзора. – М., 2016. – С. 17, 18.

References

1. *Sistema standartov bezopasnosti truda. Odezhda special'naya zashchitnaya, sredstva individual'noj zashchity nog i ruk. Klassifikaciya, GOST 12.4.103-83* (Occupational safety standards system. Special protective clothes, personal protective equipment for feet and hands. Classification). Moscow, Standarty, 1983, 6 p.
2. *Sredstva individual'noj zashchity ot ponizhennyh temperatur. Metody opredeleniya teploizolyacii komplekta, GOST R SSBT 12.4.185-99.* (Individual protection against low temperatures. Methods for determining the thermal insulation of the kit. Moscow, Standarty, 1999, 14 p.
3. *Gigienicheskie trebovaniya k proektirovaniyu vnov' stroyashchihsya i rekonstruiруемых промышленных предприятий, SP 2.2.1.1312-03* (Hygienic requirements for the design of newly constructed and reconstructed industrial enterprises). Moscow: Ministry of Health of Russia, 2003. 42 p.
4. *Rezhimy truda i otdyha rabotayushchih v holodnoe vremya na otkrytoj territorii ili v neotaplivayemyh pomeshcheniyah, MP 2.2.7.2129-06* (Modes of work and rest working in cold weather in the open territory or in unheated rooms). Moscow, 2006. 32 p.

5. Afanasyeva R. F., Burmistrova O. V. The cooling medium and its effect on the organism [Ohlazhdayushchaya sreda i ee vliyanie na organizm]. *Professional risk for the health of workers*. Moscow: Travant, 2003. P. 142 – 149.

6. Yudaeva O. S., Sorokina E. A. Chemical-analytical studies of insulating glass units of the RIC dimensions designed for use in the construction of passenger cars [Himiko-analiticheskie issledovaniya steklopaketov tonirovannykh v masse prednaznachennykh dlya ispol'zovaniya v konstrukcii passazhirskih vagonov gabarita RIC]. *Collection of FSUE VNIIZhG Rospotrebnadzor*. Moscow. 2015. P. 58 – 68.

7. Aksenov V. A., Yudaeva O. S., Sorokina E. A. Analysis of harmful production factors at the workplace of rolling stock personnel [Analiz vrednykh proizvodstvennykh faktorov na rabochem meshte obsluzhivayushchego personala podvizhnogo sostava]. *VIII All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Specialists of Rospotrebnadzor*. 2016. P. 17 – 18.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Аксенов Владимир Алексеевич

Российский университет транспорта (МИИТ).

Часовая ул., д. 22/2, г. Москва, 125190, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техносферная безопасность» Российской открытой академии транспорта РУТ (МИИТ).

Тел.: +7(495)649-19-59.

E-mail: vl.aksenov@yandex.ru

Юдаева Оксана Сергеевна

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожной гигиены Роспотребнадзора (ВНИИЖГ)».

Пакгаузное шоссе, д. 1, корп. 1, г. Москва, 125438, Российская Федерация.

Доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории Коммунальной гигиены и эпидемиологии, руководитель ЭЦ «Экологическая сертификация» ФГУП «ВНИИЖГ» Роспотребнадзора.

Тел.: +7(499)153-77-59.

E-mail: vniihg@yandex.ru

Сорокина Екатерина Александровна

Российский университет транспорта (МИИТ).

Часовая ул., д. 22/2, г. Москва, 125190, Российская Федерация.

Ассистент кафедры «Техносферная безопасность» Российской открытой академии транспорта РУТ (МИИТ).

Тел.: +7(495)649-19-59.

E-mail: sorokina.caterina2018@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Аксенов, В. А. Анализ условий труда и производственных факторов в аспекте влияния на здоровье мойщиков-уборщиков подвижного состава [Текст] / В. А. Аксенов, О. С. Юдаева Е. А. Сорокина // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 4(32). – С. 151 – 158.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Aksenov Vladimir Alekseevich

Russian University of Transport (MIIT).

Chasovaya street, 22/2, Moscow, 125190, Russian Federation.

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department «Technospheric Security» of the Russian Open Academy of Transport RTH (MIIT).

Phone: +7 (495) 649-19-59.

E-mail: vl.aksenov@yandex.ru

Yudaeva Oksana Sergeevna

FSUE All-Russian Scientific Research Institute of Railway Hygiene of Rospotrebnadzor (VNIIZhG).

Pakgauznoe shosse d. 1, building. 1, Moscow, 125438, Russian Federation.

Doctor of Technical Sciences, Leading researcher of the Laboratory of Communal Hygiene and Epidemiology, Head of EC «Environmental Certification» FSUE «VNIIZhG» Rospotrebnadzor.

Phone: +7 (499) 153-77-59.

E-mail: vniihg@yandex.ru

Sorokina Ekaterina Alexandrovna

Russian University of Transport (MIIT).

Chasovaya street, 22/2, Moscow, 125190, Russian Federation.

Assistant of the department «Technospheric Security» of the Russian Open Academy of Transport RUT (MIIT).

Phone: +7 (495) 649-19-59.

E-mail: sorokina.caterina2018@yandex.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Aksenov V. A., Yudaeva O. S., Sorokina E. A. Analysis of working conditions and production factors in the aspect of impact on the health of wheelchair washers-cleaners. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2017, vol. 32, no 4, pp. 151 – 158 (In Russian).

Уважаемые коллеги!

Редакция научно-технического журнала «Известия Транссиба» приглашает Вас публиковать результаты научных исследований по тематическим направлениям журнала:

- подвижной состав железных дорог;
- транспортная энергетика;
- информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации;
- путь и искусственные сооружения;
- управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов;
- организация производства на транспорте.

Материалы просим высылать ответственному секретарю редакционной коллегии журнала Захаренко Елене Игоревне по электронной почте: izvestia_transsiba@mail.ru.

Правила представления рукописей научных статей в научно-технический журнал «Известия Транссиба»

В редакцию журнала представляется:

рукопись статьи на белой бумаге формата А4 в двух экземплярах, а также в электронном виде (на любом носителе или по e-mail), имя файла определяется по фамилии первого автора: фамилия.doc;

экспертное заключение о возможности опубликования статьи в открытой печати.

Рукопись статьи включает в себя УДК, ФИО авторов, affiliation (место работы или учебы) авторов, название статьи, аннотацию, ключевые слова (5 – 10 слов) на русском и английском языках, текст статьи, список литературы (более 10 наименований), транслитерацию списка литературы в романском алфавите, сведения об авторах и библиографическое описание статьи на русском и английском языках.

Рукопись статьи оформляется в соответствии с образцом.

Сведения об авторах включают в себя фамилию, имя, отчество, ученую степень и звание, место работы с указанием почтового адреса, должность, контактные телефоны, e-mail для обратной связи.

Один экземпляр текста статьи должен быть подписан всеми авторами на оборотной стороне каждой страницы.

Требования к аннотации статьи:

аннотация должна быть кратким точным изложением содержания статьи, включающим в себя основные фактические сведения и выводы описываемой работы;

текст аннотации должен быть лаконичным и четким, свободным от второстепенной информации, должен отличаться убедительностью формулировок;

сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте аннотации;

объем аннотации на русском и английском языках должен содержать от 200 до 250 слов;

аннотация на русском и английском языках должна включать в себя следующие аспекты содержания статьи: предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы;

дополнительно англоязычная аннотация должна быть оригинальной (не быть калькой русскоязычной аннотации); содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье); англоязычной (написанной качественным английским языком); необходимо использовать активный, а не пассивный залог.

Требования к рукописи статьи:

рукопись статьи должна содержать УДК (в левом верхнем углу, обычный, 12 пт), инициалы и фамилию на русском языке (по центру, 12 пт), affiliation авторов на русском языке (по центру, 10 пт), название статьи на русском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), инициалы и фамилию на английском языке (по центру, 12 пт), affiliation авторов на английском языке (по центру, 10 пт), название статьи на английском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт);

текст статьи должен быть набран в редакторе Word, размер страницы: формат А4 (210 × 297 мм);

размер полей: 20 мм (все четыре поля), размер и тип шрифта основного текста: Times New Roman, 12 пт;

размеры символов в формулах (Equation): обычный – 12 пт, крупный индекс – 7, мелкий – 5, крупный символ – 15, мелкий – 12 пт;

буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавитов, математические символы такие, например, как cos, sin, max, min, – прямым шрифтом;

текст в таблицах, подписанные подписи и названия таблиц набираются шрифтом Times New Roman, 10 пт;

межстрочный интервал одинарный, абзацный отступ – 0,75 см;

каждый рисунок дополнительно должен быть представлен в оригинальном файле (формат JPEG или TIFF, разрешение – не ниже 300 пикс/дюйм);

рисунки, выполненные в редакторе Word, должны быть вставлены как объект;

после текста статьи следует список литературы на русском языке и в романском алфавите (латинице) с переводом названий литературных источников на английский язык;

ссылки на литературу в тексте статьи указываются в квадратных скобках, список литературы имеет заголовок *Список литературы* (более 10 наименований), библиографическое описание источников на русском языке оформляется по требованиям ГОСТ 7.1-2003;

в романском алфавите (латинице) список литературы имеет заголовок *References* и оформляется по следующему образцу: Author1 A.A., Author2 A.A., Author3 A.A., Author4 A.A., Author5 A.A. Title of article [Nazvanie stat'i v romanskom alfavite]. Nazvanie zhurnala v romanskom alfavite – Title of Journal, 2014, no. 1, pp. 54 – 57.

Рукописи статей, опубликованных ранее или переданных в другие издания, не принимаются.

Число соавторов не должно превышать трех человек. Рекомендуемый объем статьи – не менее пяти и не более 10 страниц. В ином случае вопрос по объему статьи необходимо согласовать с редакцией журнала. Иллюстрации, схемы, таблицы, включаемые в текст статьи, учитываются в общем объеме текста.

Авторы должны избегать повторения одних и тех же данных в таблицах, на графиках и в тексте статьи.

В случае представления двух или более статей одновременно необходимо указывать желательную очередность их публикации.

В случае возвращения статьи автору для устранения замечаний или для ее сокращения датой представления статьи считается день получения редакцией журнала окончательного текста.

Принятые к публикации рукописи статей не возвращаются авторам.

Материалы, оформленные не в соответствии с указанными выше требованиями, не принимаются к публикации и не возвращаются.

Редакционный совет оставляет за собой право литературного редактирования статьи без согласования с авторами.

Научное издание

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

№ 4 (32) 2017

Научно-технический журнал «Известия Транссиба» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 3 июня 2009 г., свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77- 71514 от 01 ноября 2017 г.

Номер ISSN – 2220-4245.

Подписной индекс в общероссийском каталоге НТИ агентства «Роспечать» – 66087.

Издание обрабатывается в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦа).

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Издание выходит с периодичностью 4 номера в год.

Цена свободная.

Редактор – Майорова Н. А.

Компьютерная верстка – Захаренко Е. И.

Адрес редакции (издательства) и типографии: 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35;
тел.: (3812) 31-05-54; e-mail: izvestia_transsiba@mail.ru

Подписано в печать 26.12.2017.

Тираж 500 экз.

Дата выпуска: 27.12.2017.

