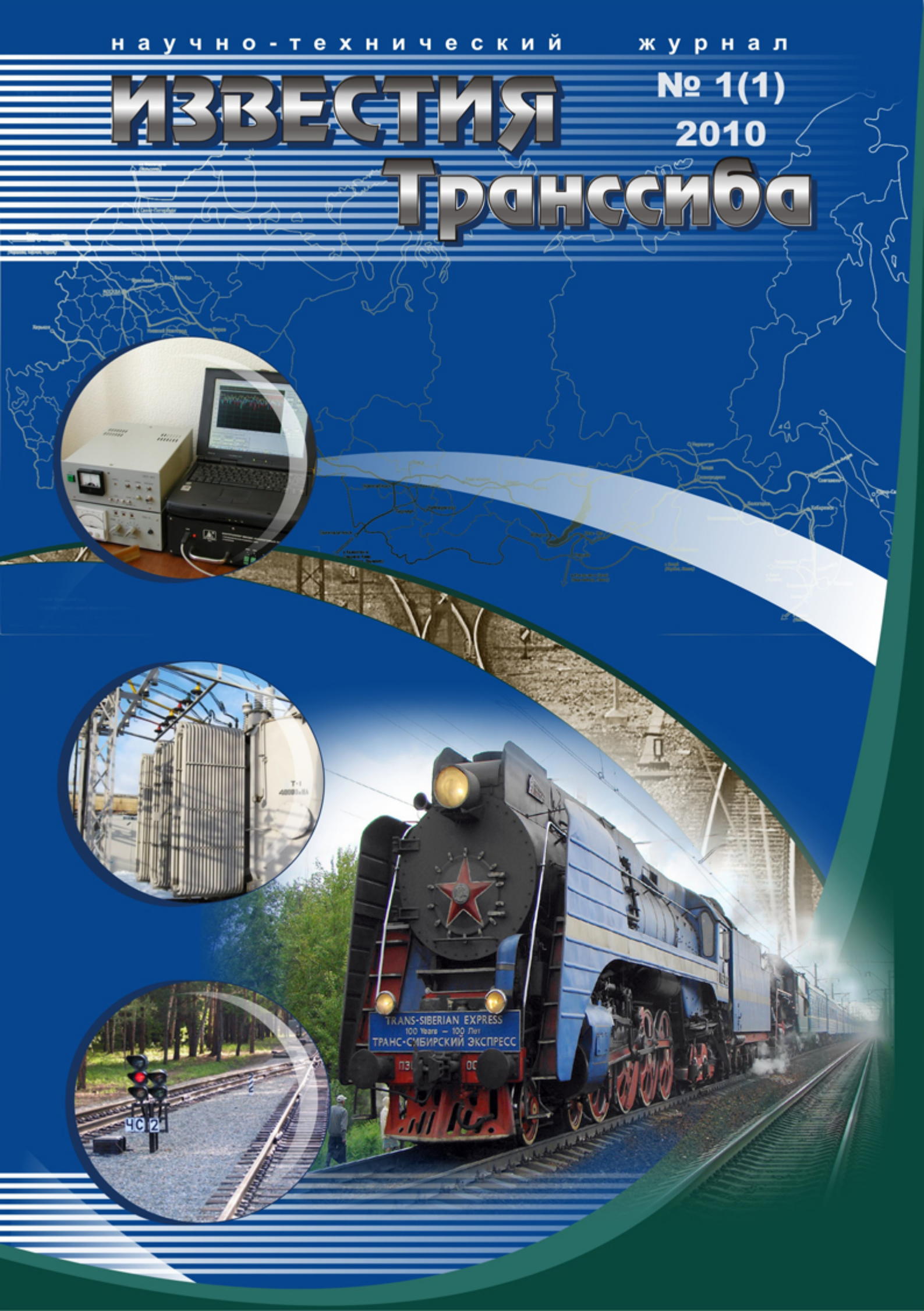
научно-технический журнал

ИЗВЕСТИЯ Транссиба

№ 1(1)
2010



Уважаемые читатели!

Великий Сибирский путь – один из главных перевозчиков в мире – начал строиться 7 июня 1891 года, когда был заложен первый камень в здание вокзала во Владивостоке. Сегодня Сибирская железнодорожная магистраль имеет важнейшее значение для развития экономики России. Столь масштабный участок Транссибирской магистрали обеспечивается специалистами прежде всего за счет вузов железнодорожного транспорта Сибири и Дальнего Востока: Дальневосточного, Иркутского, Сибирского и Омского государственных университетов путей сообщения. Научное сопровождение разработки и внедрения новой техники и технологий осуществляется при участии всех железнодорожных научно-исследовательских институтов и высших учебных заведений России при активной роли Российской академии наук.

Журнал «Известия Транссиба» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 3 июня 2009 г.

Журнал предназначен для знакомства читателей с проблемами и перспективами развития железнодорожного транспорта по следующим основным направлениям: 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.

Мы приглашаем к сотрудничеству ученых и специалистов всех видов транспорта. Наша задача – заинтересовать читателей публикуемым материалом о передовых направлениях исследований в области железнодорожного транспорта.

С уважением, главный редактор журнала, ректор ОмГУПСа, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ И. И. Галиев

ИЗВЕСТИЯ Трансcиба
научно-технический журнал
№ 1(1)
2010
Периодичность - 4 выпуска в год

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

1. Галиев Ильхам Исламович – главный редактор, ректор ОмГУПСа, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ.
2. Черемисин Василий Титович – зам. главного редактора, проректор по научной работе ОмГУПСа, д.т.н., профессор.
3. Володин Александр Иванович – первый проректор ОмГУПСа, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ.
4. Бокарев Сергей Александрович – проректор по научной работе СГУПСа, д.т.н., профессор (Новосибирск).
5. Завьялов Александр Михайлович – проректор по научной работе СибАДИ, д.т.н., профессор (Омск).
6. Каргапольцев Сергей Константинович – проректор по научной работе ИрГУПСа, д.т.н., профессор (Иркутск).
7. Косарев Александр Борисович – зам. генерального директора ОАО «ВНИИЖТ», д.т.н., профессор (Москва).
8. Косых Анатолий Владимирович – проректор по научной работе ОмГТУ, д.т.н., профессор (Омск).
9. Чугуй Юрий Васильевич – зав. лабораторией конструкторско-технологического института научного приборостроения СО РАН, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ (Новосибирск).
10. Шантаренко Сергей Георгиевич – д.т.н., начальник НИЧ ОмГУПСа (Омск).
11. Серенко Андрей Федорович – проректор по научной работе ДВГУПСа, к.т.н., доцент (Хабаровск).
Комякова Ольга Олеговна – ответственный секретарь, к.т.н., ОмГУПС (Омск).

СОДЕРЖАНИЕ

Подвижной состав железных дорог

Анисимов А. С., Михеев В. А., Гришина Ю. Б. Методы исследования взаимовлияния параметров функционирования тепловоза 2
Блинов П. Н., Блинов А. П. Автоматизация стендовых испытаний топливной и регулирующей аппаратуры топливных дизелей 8
Бородин А. В., Рязанцева И. Л. Влияние модификации поверхностей сопряжения на несущую способность соединения с натягом 15
Маслов Г. П., Дятлова М. А. Аэродинамические показатели токоприемников скоростного электрического подвижного состава 20
Овчаренко С. М. Оценка эффективности оснащенности диагностического процесса локомотивов 25
Павлов В. М., Финиченко В. Н. Совершенствование токоприемников электроподвижного состава 32
Петроченко С. В. Восстановление работоспособности тяговых электродвигателей путем совершенствования технологической операции обработки рабочей поверхности коллекторов 39
Сидоров О. А., Ступаков С. А., Филиппов В. М. Исследования износа контактных пар устройств токосъема монорельсового электрического транспорта 44

Транспортная энергетика

Кандаев В. А., Карпова Л. А., Авдеева К. В. Поле точечного источника вблизи системы проводников, расположенных на поверхности однородной земли 50
Парамонов А. М., Черемисин В. Т., Рыжкова Е. Н. К вопросу оптимизации использования теплоты дымовых газов теплотехнологических установок предприятий железнодорожного транспорта 60
Пономарев А. В. Метод априорной оценки расхода электрической энергии на технологические процессы ремонта подвижного состава 66

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

Грицутенко С. С. Введение понятия «дельта-вектор» в пространстве Гильберта для корректного представления данных в информационных системах 73
Краснокуцкий И. Н. Автоматизированная информационно-измерительная система управления освещением железнодорожных станций 79
Лаврухин А. А. Эффективная программная реализация помехоустойчивых блоковых кодов современными микропроцессорными средствами 86

Путь и искусственные сооружения

Бокарев С. А., Цветков Д. Н. Экспресс-оценка технического состояния эксплуатируемых сталежелезобетонных пролетных строений железнодорожных мостов по динамическим параметрам 91

Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

Галиев И. И., Нехаев В. А., Николаев В. А. Безопасность движения, проблемы тяги и динамики поезда и их исследование методом фракционного анализа 98
Псеровская Е. Д., Хорунжин С. Ю. Изучение динамики многоярусного груза и воспринимаемых креплением нагрузок при маневровых соударениях вагонов 106
Сероштанов С. С., Ходкевич А. Г., Дремин И. В. Сокращение времени простоев поездов путем модернизации устройства контроля схода подвижного состава 113

Организация производства на транспорте

Никифоров М. М., Симак Р. С. Энергоэкономическая паспортизация в системе организации производства на железнодорожном транспорте 118

АННОТАЦИИ 123

Научно-технический журнал «Известия Трансcиба»
Учредитель: Омский государственный университет путей сообщения
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35
Тел./факс: (3812) 31-13-44; e-mail: nauka@omgups.ru

УДК 629.424.1

А. С. Анисимов, В. А. Михеев, Ю. Б. Гришина

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОЗА

В статье рассмотрен подход к исследованию взаимовлияния параметров функционирования тепловоза, основанный на использовании аппарата теории графов и алгебры логики. Приведена методика поэтапного построения граф-модели с применением метода обращения функциональных схем и ее обработки с использованием практических алгоритмов минимизации графов применительно к системе охлаждения тепловоза.

Качество функционирования тепловоза в целом в соответствии с принципом декомпозиции определяется техническим состоянием, уровнем регулировки и настройкой основных функциональных блоков [1]: дизеля и его систем; тяговых и вспомогательных электрических машин; аппаратов, силовых цепей и цепей управления; экипажной части; вспомогательного оборудования.

Множество возможных технических состояний тепловоза может быть представлено четырьмя подмножествами: тепловоз исправен ($T_и$), тепловоз неисправен ($T_{ни}$), тепловоз работоспособен ($T_р$), тепловоз неработоспособен ($T_{нр}$).

Между этими подмножествами существуют следующие соотношения: подмножество $T_и$ входит составной частью в подмножество $T_р$, а подмножество $T_{нр}$ входит составной частью в подмножество $T_{ни}$. Подмножества $T_р$ и $T_{ни}$ пересекаются, т.е. имеют общую часть, а подмножества $T_р$ и $T_{нр}$, $T_и$ и $T_{ни}$ не пересекаются, т.е. несовместны.

Следовательно, тепловоз и его функциональные блоки могут находиться в одном из трех основных состояний: исправен и работоспособен; неисправен, но работоспособен; неисправен и неработоспособен. Графическая интерпретация перечисленных выше состояний представлена на рисунке 1.

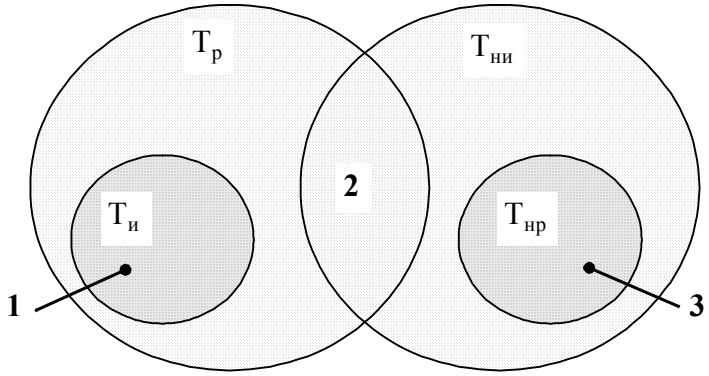


Рисунок 1 – Разбиение множеств технических состояний тепловоза:
1 – тепловоз исправен и работоспособен;
2 – тепловоз неисправен, но работоспособен;
3 – тепловоз неисправен и неработоспособен

В процессе эксплуатации тепловоза, в частности, до и после ремонтных и обслуживающих воздействий возникает задача по идентификации текущего технического состояния тепловоза и его функциональных блоков. Успешное решение обозначенной задачи усложняется тем, что техническое состояние тепловоза может характеризоваться большим количеством выходных параметров различной физической природы. Контроль всех возможных параметров связан со значительными материальными и временными затратами, которые, возможно, не всегда оправдываются.

Трудности, связанные с нахождением оптимального количества параметров, с использованием которых достаточно точно характеризуется техническое состояния тепловоза, могут быть преодолены путем применения графоаналитических методов исследования взаимовлияния входных, внутренних и выходных параметров его функциональных блоков, базирующихся на построении и обработке граф-моделей [2, 3]. В работе [2] предложено два метода, алгоритмизирующих и упорядочивающих процедуру построения граф-модели: формализованная пошаговая процедура инженерно-логического метода и формальный алгоритм на базе обращения функциональных схем.

Рассмотрим основные этапы построения граф-модели с использованием метода обращения функциональных схем применительно к системе охлаждения тепловоза. Система охлаждения тепловоза, принципиальная схема холодного контура которой представлена на рисунке 2, является структурным элементом, в значительной степени обеспечивающим эффективную и надежную работу дизель-генераторной установки тепловоза в процессе эксплуатации.

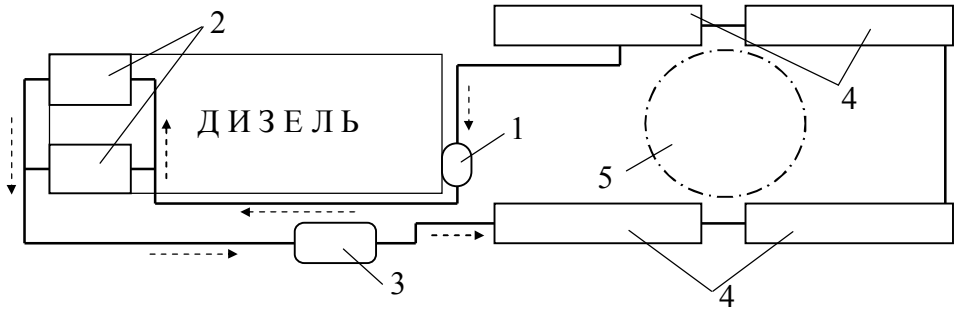


Рисунок 2 – Принципиальная схема системы охлаждения тепловоза

Согласно принципиальной схеме (рисунок 2) циркуляция охлаждающей воды обеспечивается центробежным насосом (1), который нагнетает воду в охладители наддувочного воздуха (2) и далее по двум параллельным трубопроводам, соединяющимся за дизелем, в водомасляный теплообменник (3) на охлаждение дизельного масла; горячая вода охлаждается в секциях холодильника (4) воздухом, расход которого регулируется вентилятором (5) [4].

В соответствии с описанными выше процессами разработана функциональная схема холодного контура системы охлаждения тепловоза (рисунок 3), чем завершен первый этап моделирования.

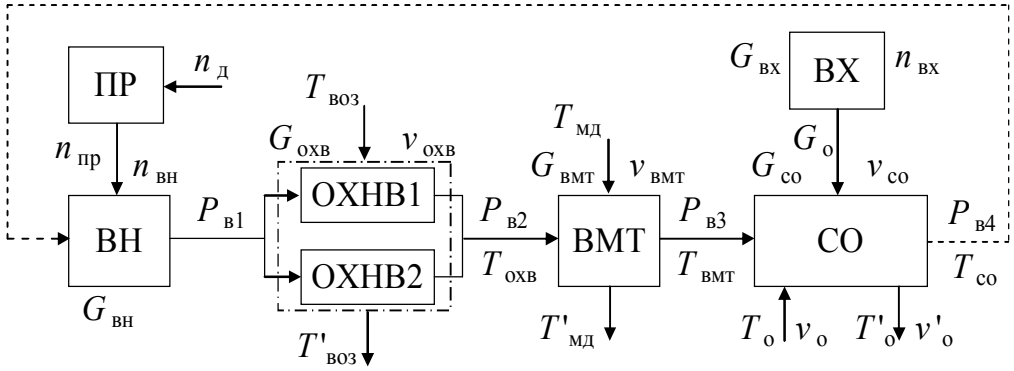


Рисунок 3 – Функциональная схема системы охлаждения тепловоза

Перечень блоков функциональной схемы и соответствующих им параметров приведен в таблице.

Таблица – Перечень блоков функциональной схемы системы охлаждения тепловоза и соответствующих им параметров

Обозначение и наименование блока		Параметр z_i	Наименование параметра
1	2	3	4
ПР	Привод водяного насоса	$n_д$	Частота вращения вала дизеля
		$n_{пр}$	Частота вращения привода ВН
		$D_{пр}$	Структурные параметры ПР
ВН	Водяной насос	$n_{вн}$	Частота вращения ВН
		$G_{вн}$	Производительность ВН
		$P_{в1}$	Давление воды после ВН
		$D_{вн}$	Структурные параметры ВН

Окончание таблицы

1	2	3	4
ОХНВ1 ОХНВ2	Охладители наддувочного воздуха	$T_{воз}$	Температура воздуха перед ОХНВ
		$T'_{воз}$	Температура воздуха после ОХНВ
		$T_{охв}$	Температура воды после ОХНВ
		$G_{охв}$	Количество воды, проходящей через ОХНВ
		$P_{в2}$	Давление воды после ОХНВ
		$v_{охв}$	Скорость воды в ОХНВ
		$D_{охв}$	Структурные параметры ОХНВ
ВМТ	Водомасляный теплообменник	$T_{мд}$	Температура масла перед ВМТ
		$T'_{мд}$	Температура масла после ВМТ
		$G_{вмт}$	Количество воды, проходящей через ВМТ
		$v_{вмт}$	Скорость воды в ВМТ
		$P_{в3}$	Давление воды после ВМТ
		$T_{вмт}$	Температура воды после ВМТ
		$D_{вмт}$	Структурные параметры ВМТ
ВХ	Вентилятор холодильной камеры	$n_{вх}$	Частота вращения ВХ
		$G_{вх}$	Производительность ВХ
		$D_{вх}$	Структурные параметры ВХ
СО	Охлаждающие секции (радиаторы)	$v_{со}$	Скорость воды в СО
		$v'_{о}$	Скорость воздуха на выходе из СО
		$v_{о}$	Скорость воздуха в СО
		$T_{о}$	Температура окружающего воздуха
		$T'_{о}$	Температура воздуха на выходе из СО
		$G_{со}$	Количество воды, проходящей через СО
		$T_{со}$	Температура воды на выходе из СО
		$G_{о}$	Количество воздуха, проходящего через СО
		$P_{в4}$	Давление воды после СО
		$D_{со}$	Структурные параметры СО

На втором этапе исследования составлена граф-модель функционирования системы охлаждения тепловоза в пространстве взаимовлияния параметров (рисунок 4).

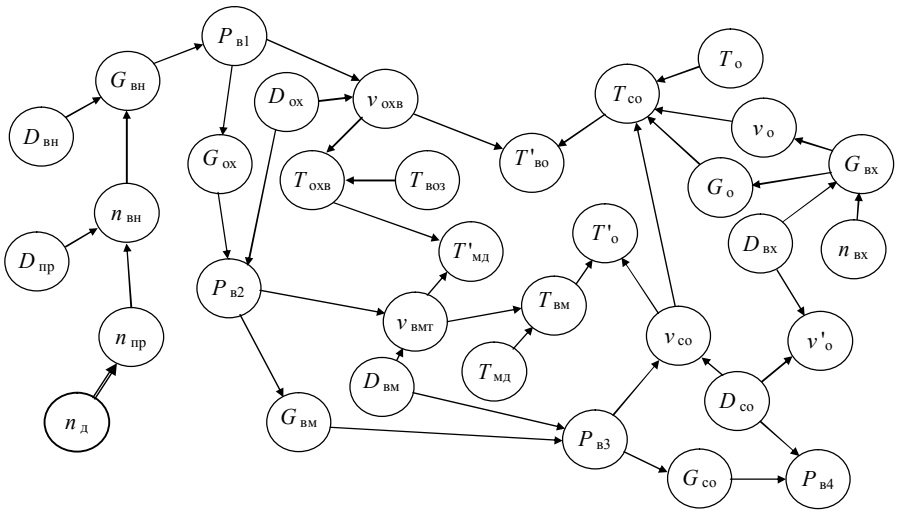


Рисунок 4 – Граф-модель системы охлаждения тепловоза

Для построения граф-модели исследуемой системы параметры z_i, указанные в таблице, приняты как основные функциональные параметры и представлены на модели в виде вершин графа, а причинно-следственные связи между ними, вытекающие из физики функционирования объекта, – дугами. Дуги проводились независимо от того, известна ли связывающая вершины аналитическая (количественная) зависимость или эта связь носит только качественный характер.

Составленная граф-модель позволяет минимизировать число точек контроля для интенсификации текущего технического состояния системы охлаждения тепловоза. Математически данную задачу можно свести к отысканию минимальных внешне устойчивых подмножеств (МВУП) графа, что предполагает уменьшение числа вершин модели в пространстве параметров путем их отбрасывания таким образом, чтобы они отображались в отобранных при минимизации вершинах.

С математической точки зрения построенная граф-модель исследуемой системы задана множеством параметров X, образующих множество вершин графа,

$$X = \{ n_{\text{пр}}, D_{\text{пр}}, n_{\text{вн}}, D_{\text{вн}}, G_{\text{вн}}, P_{\text{в1}}, G_{\text{охв}}, P_{\text{в2}}, T_{\text{о}}, v_{\text{о}}, G_{\text{о}}, G_{\text{вх}}, D_{\text{вх}}, n_{\text{вх}}, P_{\text{в3}}, v_{\text{со}}, G_{\text{со}}, v'_{\text{о}}, T_{\text{охв}}, T_{\text{воз}}, G_{\text{вмт}}, D_{\text{вмт}}, v_{\text{вмт}}, T'_{\text{мд}}, T'_{\text{воз}}, T_{\text{со}}, D_{\text{охв}}, T_{\text{мд}}, T_{\text{вмт}}, T'_{\text{о}}, v_{\text{охв}}, D_{\text{со}}, P_{\text{в4}} \},$$

и конечным множеством дуг U таким образом, что они не пересекаются:

$$X \cap U = \varnothing.$$

Рассмотрим логический подход к задаче минимизации числа точек контроля для оценки качества функционирования системы охлаждения тепловоза [2].

Для графа, изображенного на рисунке 4, записывается логическое высказывание, имеющее вид конъюнкции элементарных дизъюнкций, то есть конъюнктивную нормальную форму. Основываясь на законах алгебры логики, полученную конъюнктивную нормальную функцию (КНФ) преобразуем в дизъюнктивную нормальную функцию (ДНФ), т.е. после логического перемножения скобок и приведения подобных получим выражение в виде суммы слагаемых, являющихся простыми импликантами ДНФ. Каждый простой импликант ДНФ и будет представлять собой МВУП. Однако выявление семейства МВУП еще не ликвидирует затруднительное положение, связанное с тем, что из большого числа этих множеств необходимо выбрать одно – наиболее информативное.

Число импликантов в ДНФ:

$$R = \prod_{i=1}^{p} V_i^t, \tag{1}$$

где p – число групп скобок с разным числом вершин в КНФ; V – число вершин в скобке i-й группы; t – число скобок i-й группы.

Для граф-модели системы охлаждения тепловоза число импликантов $R = 1^5 \cdot 2^{17} \cdot 3^{10} \cdot 4^1 = 3,09 \cdot 10^{10}$.

С таким исходным материалом дальнейшая работа по минимизации с использованием только логического подхода представляется затруднительной.

Трудности, связанные с нахождением оптимального МВУП, могут быть преодолены путем применения практических алгоритмов минимизации набора контролируемых параметров, использующих логический и алгебраический подходы [2, 3]. Представленный ниже алгоритм позволяет находить оптимальное подмножество параметров для контроля работоспособности объекта исследования в графе практически любой сложности.

Первое логическое действие – подсчет повторяемости вершин в импликантах, или подсчет голосов. Число голосов i-й вершины

$$S_i = R \sum_{j=1}^{h} \frac{1}{L_j}, \tag{2}$$

где h – число скобок в КНФ, в которой находится i-я вершина; L_j – число вершин в j-й скобке, в которой находится i-я вершина.

Информативность параметра оценивается путем введения относительного показателя информативности:

$$I_{czi} = I\left(z_i\right) + \sum_{i=g}^{l} I\left(z_j / z_i\right), \tag{3}$$

где $I(z_i)$ – количество информации о состоянии параметра z_i; $I(z_j/z_i)$ – количество информации о состоянии параметра z_j, получаемое при контроле z_i.

Ввиду отсутствия количественных данных о вероятностях состояния параметров в соответствии с рекомендациями работы [3] можно ограничиться относительной оценкой количества информации $I(z_i) = 5$ и $I(z_j/z_i) = 1$ для всех вершин в любых случаях.

Для включения параметров в МВУП необходимо оценить доступность всех вершин графа (b_{zi}). Доступность параметров контролю оценивается по пятибалльной системе и рассматривается как относительная эффективность измерения данного параметра [3].

Сводный показатель информативности и доступности

$$\pi_i = S_i b_{zi} I_{czi} . \tag{4}$$

Для определения числа вершин, входящих в МВУП, составляется матрица смежности D (рисунок 5) в соответствии с нумерацией вершин, удовлетворяющая условию отображения отбрасываемых вершин в отобранных при минимизации. Нумерация вершин граф-модели, необходимая для нахождения МВУП, производится в порядке убывания сводного показателя информативности и доступности. Столбцы матрицы D состоят из вершин с меньшими порядковыми номерами, имеющими больший сводный показатель.

$D =$

	$T_{со}$	$T_{охв}$	$T_{вмт}$	$P_{в2}$	$P_{в3}$	$n_{вн}$	$G_{вн}$	$G_{вх}$	$T'_{мд}$	$T'_{воз}$	$T'_{о}$	$P_{в4}$	$P_{в1}$	$T_{мд}$	$v'_{о}$
$T_{воз}$	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$T_{о}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$v_{о}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$G_{о}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$n_{вх}$	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
$V_{вмт}$	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
$V_{охв}$	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
$V_{со}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
$G_{со}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
$G_{охв}$	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$n_{пр}$	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$G_{вмт}$	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$D_{пр}$	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$D_{вн}$	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
$D_{охв}$	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$D_{вмт}$	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$D_{вх}$	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
$D_{со}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1

Рисунок 5 – Матрица смежности D

Условие отображения выполнено: ни одна строка подматрицы D не состоит из нулевого элемента.

Приведенный выше алгоритм позволил найти формализованное решение задачи минимизации количества параметров контроля: для интенсификации текущего технического состояния системы охлаждения тепловоза необходимо контролировать следующую совокупность параметров:

$$z_{\min} = \{ n_{вн}, G_{вн}, P_{в1}, P_{в2}, T_{охв}, T'_{мд}, T'_{воз}, T_{со}; \\ T_{мд}, T_{вмт}, T'_{о}, G_{вх}, P_{в3}, v'_{о}, P_{в4} \}.$$

Основываясь на сопоставлении полученного множества $z_{\min}$ и номенклатуры контролируемых параметров, указываемых в практической технической литературе и нормативно-

технической документации, можно сделать вывод об адекватности как полученных результатов, так и предлагаемого подхода к решению задачи оптимизации количества параметров контроля исследуемой системы тепловоза с помощью графоаналитических методов.

Однако так как конечный результат по выбору минимальной совокупности параметров зависит от характера решаемой задачи, то в условиях эксплуатации с учетом технической возможности измерения число параметров контроля может быть сокращено:

$$z'_{\min} = \{P_{в1}, P_{в2}, T_{охв}, T'_{мд}, T'_{воз}, T_{со}, T_{мд};$$
$$T_{вмт}, T'_{о}, P_{в3}, P_{в4}\}.$$

По изложенной методике были выполнены построение и анализ граф-модели функционирования дизель-генераторной установки тепловоза в целом, в результате чего с учетом технических возможностей измерения и экономической целесообразности сформирован следующий перечень контролируемых параметров (в скобках указана позиция расположения соответствующей контрольной точки на тепловозе типа ТЭ10 (рисунок 6)): ток тягового генератора (2), напряжение тягового генератора (3), позиция контроллера машиниста, датчик уровня топлива в баке (1), частота вращения коленвала дизеля (4), температура и давление наддувочного воздуха после охладителя надувочного воздуха (5), температура выпускных газов перед турбиной (6), частота вращения ротора турбокомпрессора (7), температура воды дизеля (8), температура масла дизеля (9), давление топлива после фильтра тонкой очистки (10), температура воды на входе в охладитель наддувочного воздуха (12), температура масла после теплообменника (13), давление масла после фильтра грубой очистки (14), давление топлива до фильтра тонкой очистки (11), давление выпускных газов перед турбиной (15), температура воды в системе охлаждения (18), частота вращения вентилятора холодильника (16), давление наддува после компрессора (17), уровень масла в картере дизеля (19).

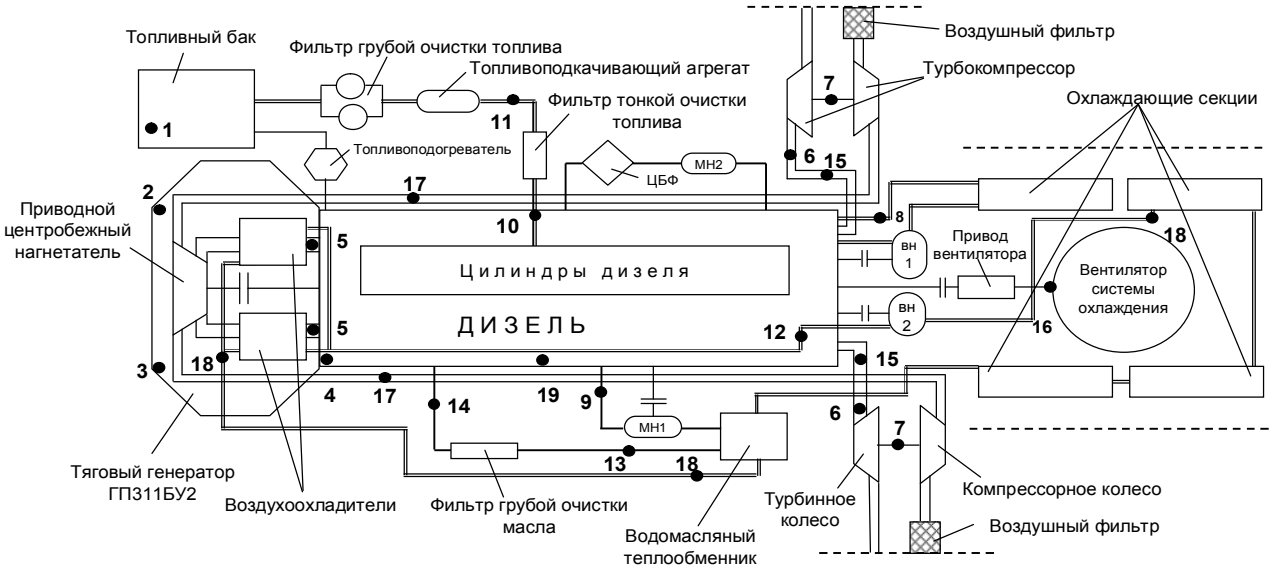


Рисунок 6 – Расположение контрольных точек на тепловозе

Сформированная совокупность параметров контроля используется для дальнейших исследований в направлении создания математической модели для оценки и прогнозирования теплотехнического и экологического состояния дизель-генераторной установки и функциональных свойств тепловоза.

Таким образом, выполненные исследования показали, что процессы функционирования системы охлаждения тепловоза могут быть представлены граф-моделью, построенной в пространстве параметров.

Обработка граф-моделей с использованием практических алгоритмов минимизации позволяет сформировать совокупность параметров контроля для оценки качества работы как отдельных систем, так и тепловоза в целом.

Учитывая возможности и свойства граф-моделей, их можно рекомендовать к использованию в задачах оптимизации количества параметров контроля сложных объектов.

Список литературы

1. Бервинов, В. И. Техническое диагностирование локомотивов [Текст] / В. И. Бервинов / УМК МПС РФ. М, 1998. – 193 с.; 21 см. – Библиогр.: с. 187, 188. – 3000 экз. – ISBN 5-89035-004-8.

2. Осис, Я. Я. Диагностирование на граф-моделях: На примерах авиационной и автомобильной техники [Текст] / Я. Я. Осис, Я. А. Гельфандбейн. – М.: Транспорт, 1991. – 244 с.; 22 см. – Библиогр.: с. 239 – 243. – 3000 экз. – ISBN 5-277-006-49-4.

3. Пушкарев, И. Ф. Контроль и оценка технического состояния тепловозов [Текст] / П. Ф. Пушкарев, Э. А. Пахомов. – М.: Транспорт, 1985. – 162 с.; 22 см. – Библиогр.: с. 161. – 9000 экз.

4. Тепловоз ТЭ10М. Руководство по эксплуатации [Текст] / Под ред. М. П. Сазоновой – М.: Транспорт, 1985. – 421 с.; 24 см. – 40000 экз.

УДК 629.424.3: 621.436.03.001.42

П. Н. Блинов, А. П. Блинов

АВТОМАТИЗАЦИЯ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ТОПЛИВНОЙ И РЕГУЛИРУЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ ТЕПЛОВОЗНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

В статье приводятся теоретические и практические подходы к автоматизации диагностирования на специальном оборудовании некоторых ответственных узлов тепловозных дизелей, таких как топливные насосы высокого давления, форсунки, нагнетательные трубопроводы и регуляторы частоты вращения и мощности. Предлагаемые инновации позволят значительно повысить качество настройки топливной аппаратуры, исключив человеческий фактор, повысить производительность и условия труда работников ремонтных локомотивных депо, создать на стендах условия работы аппаратуры, максимально приближенные к реальным условиям их эксплуатации на тепловозе.

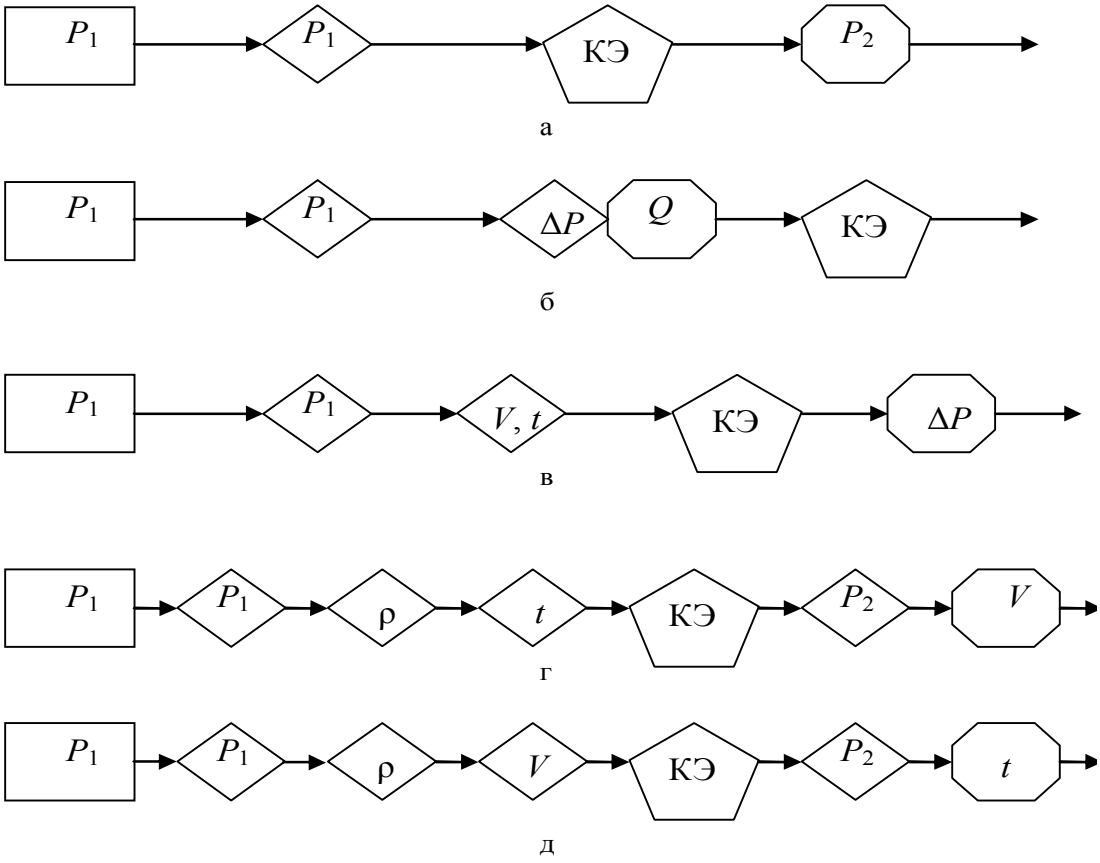
Комплексной программой реорганизации и развития отечественного локомотивостроения, организации ремонта и эксплуатации подвижного состава с целью роста производительности труда, улучшения условий и качества труда в локомотивном хозяйстве предусмотрено всемерное внедрение средств автоматизации технологических процессов ремонта и настройки деталей и узлов локомотивов.

В настоящее время при значительном объеме автоматизации технологических операций ремонта локомотивов «узким местом» остается автоматизация диагностирования на специальном оборудовании некоторых ответственных узлов тепловозных дизелей, к которым следует отнести топливные насосы высокого давления (ТНВД), форсунки, нагнетательные трубопроводы и регуляторы частоты вращения и мощности (РЧО). Автоматизация этих операций позволит значительно повысить качество настройки топливной аппаратуры (ТА), исключив человеческий фактор, повысить производительность и условия труда работников ремонтных локомотивных депо, создать на стендах условия работы аппаратуры максимально приближенные к реальным условиям их эксплуатации на тепловозе.

Известно, что обобщенные гидравлические характеристики (ОГХ) элементов ТА оказывают существенное влияние на показатели топливоподачи [1]. С целью снижения неравномерности подачи топлива по цилиндрам дизеля необходим подбор комплектов ТА с учетом ОГХ элементов. Для этого ремонтные предприятия должны быть обеспечены соответствующими средствами контроля, отвечающими следующим требованиям: достаточная точность (класс точности – не ниже 0,5 – 1,0); воспроизводство условий контроля, близких к реальным

условиям работы ТА; минимальная трудоемкость испытаний; универсальность по отношению к различным элементам ТА; простота обслуживания и надежность в работе.

Для определения эффективного проходного сечения μf деталей линии высокого давления могут использоваться пневматические и гидравлические устройства [2], структурные схемы которых представлены на рисунке 1.



а – пневматический прибор «солекс»; б – пневматический длинномер-ротаметр;
в – гидравлическое устройство перепада давления; г – стенд постоянного напора;
д – автоматизированный стенд постоянного напора.

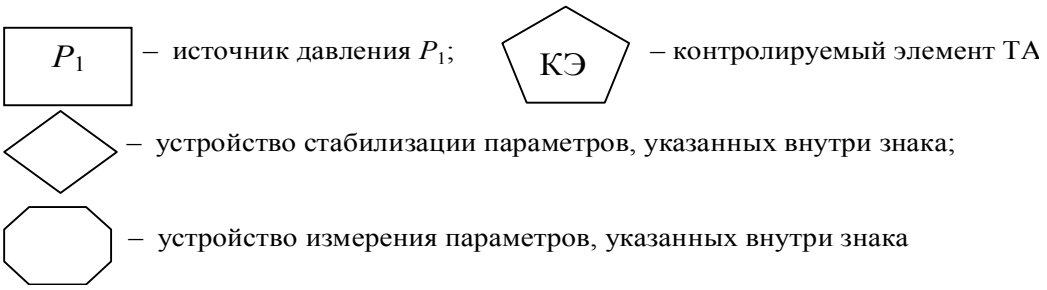


Рисунок 1 – Структурные схемы установок для контроля ОГХ

Принцип действия названных устройств основан на использовании уравнения неразрывности потока:

$$Q = \mu f \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_1 - P_2)}, \qquad (1)$$

где Q – расход жидкости (газа) через контролируемый элемент, м^3/с;
μ – коэффициент расхода жидкости (газа) через элемент;
f – площадь поперечного сечения канала элемента, м^2;
μf – эффективное проходное сечение элемента, м^2;
P_1, P_2 – давление на входе и выходе элемента, Па;
ρ – плотность жидкости (газа), кг/м^3.

Из пневматических устройств наибольшее распространение получили приборы с водяным манометром «солекс» (рисунок 1,а) и длинномеры-ротаметры (рисунок 1,б). Однако они имеют класс точности не выше 2, что ставит под сомнение эффективность их применения.

Разработаны гидравлические устройства перепада давления [3] для определения пропускной способности распылителей форсунок путем создания в объеме начального давления топлива, сообщения этого объема с распылителем в течение заданного промежутка времени, измерения остаточного давления и сравнения результата с эталоном (рисунок 1,в).

Точность измерения этим устройством в большой степени зависит от плотности топлива в системе устройства. Стенды же, которые оборудуются приставками-измерителями μf, не имеют устройств стабилизации температуры, а значит, и плотности рабочей жидкости. Кроме того, гидравлическое устройство перепада давления не может быть использовано для проверки ОГХ других элементов ТА, имеющих эффективное проходное сечение, значительно большее, чем у много дырчатых распылителей. Поэтому очевидна необходимость в другом способе определения ОГХ элементов ТА, свободном от перечисленных выше недостатков, позволяющем повысить точность измерений и применимым для различных деталей линии высокого давления.

Если стабилизировать значения P_1, P_2, ρ во времени независимо от состояния контролируемого элемента, то выражение (1) примет вид:

$$Q = \frac{V}{t} = C_1 \mu f, \tag{2}$$

где C_1 – постоянная, зависящая от конструкции прибора.

Гидравлические стенды постоянного напора, основанные на использовании условия (2) могут применяться без переделок для измерения μf различных деталей и узлов ТА. Принцип их действия основан на измерении объема жидкости, протекающей через контролируемый элемент при стабилизированных P_1, P_2, ρ и t (рисунок 1,г).

Применяя метод малых отклонений [4], преобразуем уравнение (1):

$$\ln Q = \ln \mu f + \ln \left[\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2) \right]^{\frac{1}{2}};$$

$$\frac{\mathrm{d}Q}{Q} = \frac{\mathrm{d}(\mu f)}{\mu f} + \frac{1}{2} \frac{\mathrm{d}\left[\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2) \right]}{\left[\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2) \right]};$$

$$\mathrm{d}Q = \delta \mu f + \frac{P_1}{2(P_1 - P_2)} \delta P_1 - \frac{P_2}{2(P_1 - P_2)} \delta P_2 - \frac{2}{\rho_2} \delta \rho;$$

$$\mathrm{d}Q = \delta \mu f + k_1 \delta P_1 - k_2 \delta P_2 - k_3 \delta P,$$

где k_1, k_2, k_3 – коэффициенты влияния P_1, P_2 и ρ на расход Q, определяемые из выражений:

$$k_1 = \frac{P_1}{2(P_1 - P_2)}, \; k_2 = \frac{P_2}{2(P_1 - P_2)}, \; k_3 = \frac{2}{\rho^2}.$$

Приняв за исходное состояние параметров их средние значения и вычислив k_1, k_2 и k_3, получим метрологическую модель измерения ОГХ элементов ТА с помощью стенда постоянного напора:

$$\delta V = \delta \mu f + 0,556 \delta P_1 - 0,056 \delta P_2 - 2,7 \cdot 10^{-6} \delta \rho + \delta t. \tag{3}$$

Анализируя модель (3), убеждаемся в том, что точность измерения при ее использовании высока. Нестабильность параметров оказывает незначительное влияние на точность.

Так, устройства контроля и стабилизации давлений P_1 и P_2 и времени перепуска топлива t позволяют поддерживать их значения с точностью до 1 %. Следовательно, погрешность, вносимая нестабильностью P_1, составит около 0,5 %, нестабильностью P_2 – около 0,05 %, а нестабильностью t – 1,0 %. Стенды оборудованы устройствами стабилизации температуры рабочей жидкости, что практически устраняет погрешность от нестабильности плотности ρ. Однако стенды постоянного напора имеют визуальный отсчет накопленной жидкости и не позволяют автоматизировать процесс испытаний.

На основании изложенного следует, что ни одно из существующих устройств не отвечает в полной мере предъявляемым к ним требованиям по точности измерений, универсальности по отношению к различным элементам ТА, условиям и трудоемкости испытаний.

С целью устранения указанных недостатков разработан автоматизированный стенд для контроля ОГХ составляющих элементов комплекта ТА [5, 6].

В основу определения ОГХ элементов положено измерение времени заполнения заданного объема жидкостью через контролируемый элемент при постоянном перепаде давления жидкости на входе и выходе элемента (рисунок 1,д).

Перепишем условие (2) в виде:

$$t = \frac{V}{C_1 \mu f} = \frac{C_2}{\mu f}, \qquad (4)$$

где V – постоянный объем измерительной емкости, м^3;

C_2 – постоянная устройства;

t – время заполнения объема V, с.

Стенд, работающий на основе условия (4), позволяет автоматизировать процесс испытаний и документирования их результатов, универсален по отношению к различным элементам ТА, дает возможность максимально приблизить условия испытаний к реальным условиям работы ТА на дизеле.

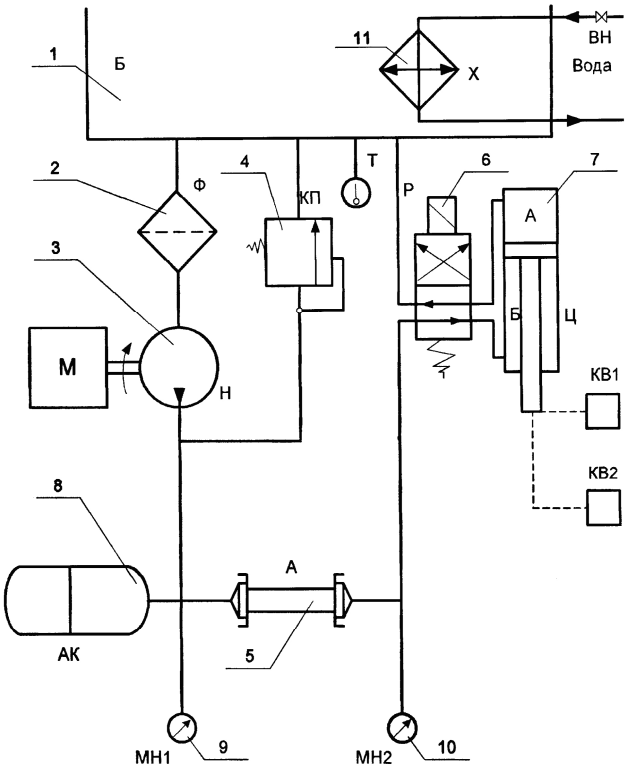


Рисунок 2 – Гидравлическая схема стенда для контроля ОГХ

Процесс измерения ОГХ элементов ТА с помощью автоматизированного стенда описывается метрологической моделью вида:

$$\delta t = \delta\mu f + \delta V + 0,556\delta P_1 - 0,056\delta P_2 - 2,7\cdot 10^{-6}\delta\rho.$$

Таким образом, точность определения ОГХ элементов на данном стенде соответствует предъявляемым требованиям и, учитывая автоматизацию процесса испытаний, получение высокой достоверности результатов и возможность применения современной цифровой измерительной аппаратуры, предпочтение следует отдать этому стенду.

Гидравлическая схема стенда для контроля ОГХ приведена на рисунке 2.

Стенд содержит бак дизельного топлива 1, фильтр тонкой очистки 2, аксиальнопоршневой насос 3 с электродвигателем, переливной клапан 4, зажимы для подсоединения контролируемых элементов 5, электроуправляемый гидропереключатель 6, гидроцилиндр 7, аккумулятор 8 для сглаживания

пульсаций, манометры 9 и 10, устройство стабилизации температуры топлива 11, датчик и указатель температуры топлива, систему управления и считывания.

Система управления и считывания состоит из двух бесконтактных электронных конечных выключателей КВ1 и КВ2, ограничивающих перемещение штока гидроцилиндра и определяющих его рабочий объем, схемы управления и усилителя мощности сигнала включения электромагнита электроуправляемого гидропереключателя и схемы считывания времени заполнения измерительной полости А гидроцилиндра топливом.

Стенд работает в автоматическом режиме следующим образом. Топливо под действием силы тяжести заполняет приемную полость аксиально-поршневого насоса 3. Рабочее давление в нагнетательной полости насоса поддерживается за счет переливного клапана 4, отрегулированного на давление 2 МПа. Топливо под действием этого давления протекает через контролируемый элемент и заполняет либо полость А, либо полость Б гидроцилиндра. Полость А заполняется при включенном электромагните гидропереключателя 6 за счет срабатывания КВ1, а полость Б – при отключенном электромагните за счет срабатывания КВ2. Полость, смежная с заполняемой, сообщается через гидропереключатель 6 с баком и топливо из нее вытесняется, преодолевая давление столба жидкости в баке.

Окончание заполнения одной из полостей сопровождается переключением распределителя с помощью схемы управления на заполнение смежной полости. Время заполнения измерительной полости А фиксируется счетчиком, высвечивается на цифровом индикаторе и может быть задокументировано. Погрешность измерения составляет не более 0,5 %.

Отличительными особенностями описываемой конструкции стенда являются заполнение и вытеснение топлива в бак под действием силы тяжести столба жидкости, исключающей наличие воздуха в системе и имитирующей реальную работу контролируемых элементов; простота и достаточная точность измерения, сочетающая с автоматической работой стенда.

С помощью применения аналогичных мерных гидроцилиндров и электроуправляемых гидропереключателей (см. рисунок 2, поз. 6 и 7) разработан способ автоматизации процесса измерения производительности ТНВД на стенде. Гидравлическая схема топливной системы стенда, реализующего этот способ автоматизированного измерения производительности ТНВД, показана на рисунке 3, имеющем следующие обозначения: Б – бак для топлива; НА – насосный агрегат; Ф1 – фильтр приемный; Ф2,Ф3,Ф4 – фильтры топливные; КЛ1,КЛ2 – коллекторы; КП1 – клапан предохранительный; КП2 – клапан перепускной; АК – аккумулятор; МН – манометр; Т – термометр; ПГ – пеногаситель; Л – лоток с воронками; Ж – желоб; СВ – секция водяного радиатора; ГП – гидроцилиндр с гидропереключателем.

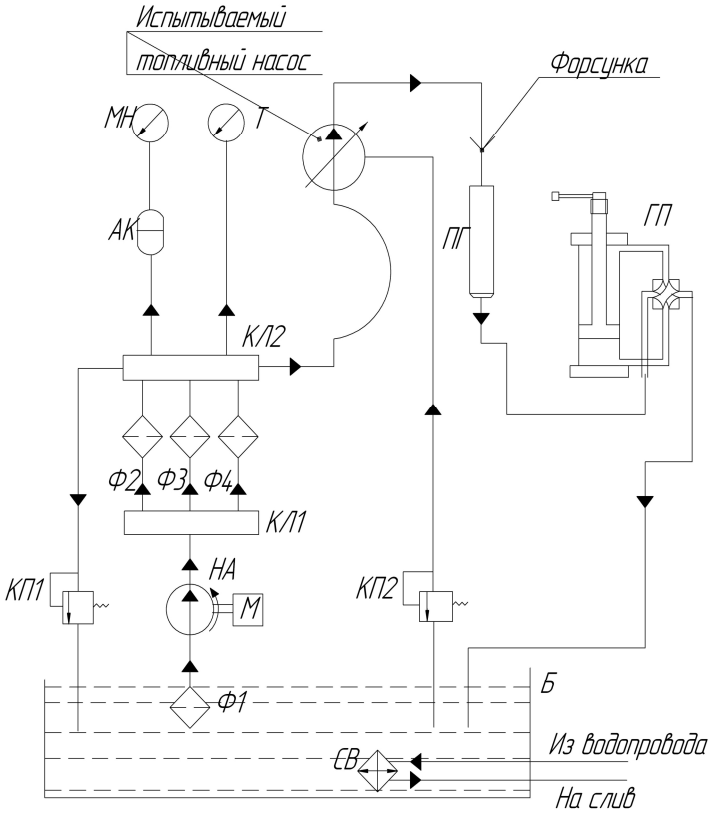


Рисунок 3 – Гидравлическая схема стенда для обкатки ТНВД

На несущей плоскости стола стенда установлена стойка, на которой закреплены мерные гидроцилиндры с бесконтактными датчиками крайних положений их штоков и электроуправляемые гидропереключатели ГП, обеспечивающие изменение направления потоков топлива при работе ТНВД.

Из каждой секции ТНВД топливо по трубке высокого давления поступает в форсунку и далее – в пеногаситель. Затем топливо поступает в электроуправляемый гидропереключатель, а из него – в нижний рабочий объем мерного гидроцилиндра, из верхнего нерабочего объема гидроцилиндра топливо вытесняется в бак.

Отсчитав и зафиксировав время заполнения рабочего объема гидроцилиндра на соответствующем режиме работы ТНВД (частота вращения кулачкового вала, положение рейки), счетчик переключает питание гидропереключателя, и топливо из рабочего объема вытесняется на слив в бак.

Использование предложенного способа позволяет измерить производительность топливного насоса, выполнить автоматическое документирование результатов испытаний, а также сократить трудозатраты и продолжительность технологического процесса обкатки и настройки ТНВД на стенде.

Разработан способ автоматизации процесса обкатки и настройки на стенде регуляторов частоты вращения и мощности дизелей.

В типовых стендах, используемых в локомотивных депо, обратная связь регулятора с электродвигателем привода осуществляется через дополнительный индуктивный датчик, связанный со штоком силового сервомотора регулятора. Настройка регулятора при этом выполняется оператором по выходу штока, который оценивается оператором визуально с присущей такому способу большой погрешностью.

Предлагается модернизировать систему контроля выхода штока силового сервомотора регулятора на стенде путем замены индуктивного датчика преобразователем линейных перемещений, например, типа ЛИР-7, имеющего пределы допустимого значения погрешности перемещений не более 10 мкм (рисунок 4).

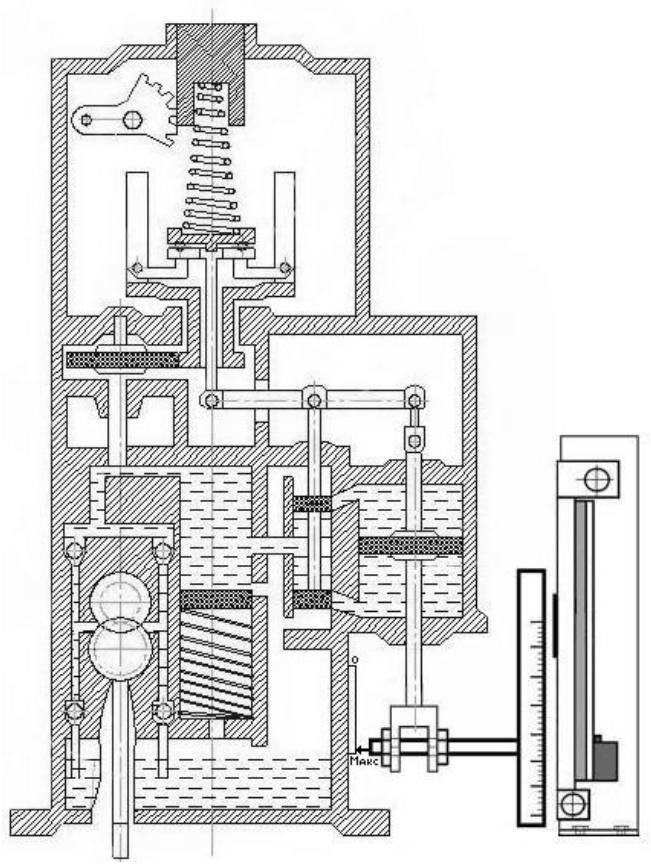


Рисунок 4 – Схема стенда для настройки регулятора дизеля ПД1М с датчиком линейного перемещения ЛИР-7

На вилку штока силового сервомотора регулятора закрепляется планка с нанесенной на ней измерительной шкалой. Преобразователь линейных перемещений закрепляется на металлическую пластину, которая в свою очередь крепится на корпус стенда.

Предлагаемая замена на стенде индуктивного датчика преобразователем линейных перемещений позволяет контролировать выход штока силового сервомотора регулятора по позициям контроллера машиниста и точно установить шток в нижнее или верхнее исходное штатное положение.

Под нижним исходным штатным положением штока понимается крайнее нижнее положение (максимальный выход штока), при котором он сохраняет подвижность и чувствительность к изменению режима работы (колеблется с амплитудой 1 – 3 мм).

В верхнем штатном положении (минимальный выход штока) шток также сохраняет подвижность и чувствительность к изменению режима работы и имеет запас хода вверх не менее 5 мм.

Исходное штатное положение штока фиксируется датчиком перемещений, используется схемой для автоматической настройки обратной связи стенда и может контролироваться оператором с помощью цифрового индикатора на пульте управления стендом.

Из представленного анализа методов и средств контроля ОГХ элементов ТА вытекают следующие выводы.

Применяемые в производстве пневматические приборы в силу своих конструктивных особенностей не позволяют приблизить условия испытаний к условиям работы ТА на дизеле, имеют низкую точность измерений вследствие работы на низком давлении воздуха и зависимости коэффициента расхода μ каналов от давления продувки. При повышении давления воздуха увеличивается погрешность измерений от сжатия и нагрева воздуха в объеме контролируемого элемента.

Конструкция данных приборов не позволяет повысить давление продувки до значений, обеспечивающих турбулентный режим движения в канале, при котором величина коэффициента расхода μ стабилизируется и точность измерений повышается.

Таким образом, пневматические приборы не отвечают требованиям, предъявляемым к подобным устройствам, и не могут быть использованы при ремонте и настройке ТА дизелей.

У гидравлических устройств перепада давления нет некоторых недостатков, присущих пневматическим приборам, но вследствие недостаточной точности измерений, необходимости специальных эталонов и возможности использования для контроля ОГХ элементов с большим проходным сечением они не могут быть использованы для контроля μf элементов ТА дизелей.

Гидравлические стенды постоянного напора в большей мере пригодны для измерения μf элементов и разбивки их на группы. Однако они не позволяют автоматизировать процесс измерений, громоздки по своему исполнению, дорогостоящи и трудоемки при использовании.

В наибольшей степени предъявляемым к таким устройствам требованиям по точности измерений, универсальности по отношению к различным элементам ТА, условиям и трудоемкости испытаний отвечает автоматизированный стенд [5, 6], в основу работы которого положено измерение времени заполнения гидроцилиндра рабочей жидкостью через контролируемый элемент при постоянном перепаде давления жидкости на входе и выходе элемента.

Использование гидроцилиндра в качестве мерной емкости на стенде для обкатки и настройки ТНВД позволяет измерять производительность топливного насоса в автоматическом режиме, выполнять автоматическое документирование результатов испытаний, а также сокращает трудозатраты и продолжительность технологического процесса обкатки и настройки ТНВД на стенде.

Предлагаемая модернизация системы контроля выхода штока силового сервомотора регулятора частоты вращения коленвала дизеля на стенде заменой индуктивного датчика преобразователем линейных перемещений позволяет автоматизировать процесс обкатки и документировать результаты настройки регуляторов на стенде.

Список литературы

1. Володин, А. И. Методы оценки технического состояния, эксплуатационной экономичности и экологической безопасности дизельных локомотивов [Текст] : Монография / А. И. Володин, Е. И. Сковородников, А. К. Белоглазов; под общ. ред. А. И. Володина. – М. : Желдориздат, 2007. – 264 с. : ил.

2. Денисов, А. А. Пневматические и гидравлические устройства автоматики [Текст] : учеб. пособие для втузов / А. А. Денисов, В. С. Нагорный. – М. : Высшая школа, 1978. – 214 с. : ил. – Библиогр.: с. 210 – 213.

3. А. с. 1011891 СССР, МКИ F 02 M 65/00. Способ определения пропускной способности распылителя форсунки [Текст] / Р. К. Гизатуллин, Б. А. Чмыхов, Г. Б. Федотов, Г. В. Никонов, П. В. Кулаев (СССР). – № 3259363/25–06; заявл. 11.03.81 ; опубл. 15.04.83, Бюл. № 14. – 2 с.

4. Черкез, А. Я. Инженерные расчеты газотурбинных двигателей методом малых отклонений [Текст] : научное издание / А. Я. Черкез. – 3-е изд., испр. и доп. – М. : Машиностроение, 1975. – 380 с.: граф., табл., рис. – Библиогр.: с. 376.

5. А. с. 879002 СССР, МКИ F 02 M 65/00. Стенд для испытания топливной аппаратуры дизеля [Текст] / В. А. Четвергов, А. И. Володин, А. М. Сапелин, Я. Ю. Гельфонд (СССР). – № 2863142/ 25–06; заявл. 03.04.80 ; опубл. 07.11.81, Бюл. № 41. – 2 с. : ил.

6. Володин, А. И. Стенд для измерения гидравлического сопротивления узлов и деталей топливной аппаратуры [Текст] / А. И. Володин, П. Н. Блинов, В. П. Шаповал // Исследование надежности и экономичности дизельного подвижного состава: Межвуз. темат. сб. науч. тр./ Омский ин-т инж. ж.-д. трансп. – Омск, 1981. – С. 27 – 29.

УДК 621.815

А. В. Бородин, И. Л. Рязанцева

ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ СОПРЯЖЕНИЯ НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ СОЕДИНЕНИЯ С НАТЯГОМ

Показано влияние параметров модификации на величину контактного давления, несущую способность деформационной волны и соединения. Приведены данные, свидетельствующие об эффективности предлагаемого решения.

Соединения с гарантированным натягом (напряженные соединения) определяют работоспособность многих технических конструкций. Ярким примером таких конструкций могут служить ходовые узлы транспортных машин: соединение «бандаж колеса – колесный центр локомотива», «шестерня тягового двигателя – вал двигателя», «колесо грузового вагона – колесная ось» и др. Нередко возникает необходимость в разборке соединения с натягом для проведения ремонтных работ. Так, при ремонте колесных пар локомотивов бандаж снимают с колесного центра, его рабочую поверхность обтачивают, затем производят повторную сборку. Уменьшение толщины бандажа приводит к снижению величины контактного давления в соединении, к снижению несущей способности посадки.

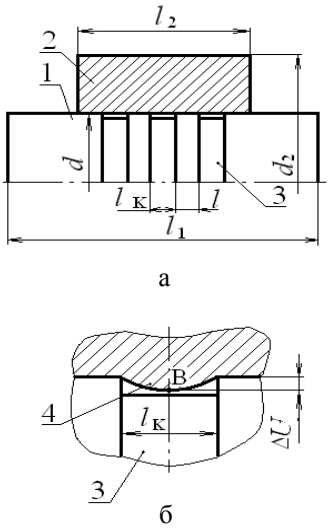


Рисунок 1 – Соединение с натягом и модифицированной поверхностью сопряжения: 1, 2 – соединяемые детали; 3 – кольцевые канавки; 4 – упругая деформационная волна

Данная публикация посвящена решению актуальной, имеющей практическое значение задачи восстановления несущей способности соединений с натягом. Для ее решения предлагается на поверхности сопряжения одной из соединяемых деталей, имеющей большую твердость, изготавливать канавки малой глубины, соразмерной натягу [1 – 4]. Так, в конструкции на рисунке 1,а для увеличения несущей способности соединения по осевой сдвигающей силе на поверхности сопряжения вала 1 предусмотрены кольцевые канавки 3, имеющие постоянную ширину l_k и равномерно распределенные на поверхности сопряжения.

Канавки изменяют напряженно-деформированное состояние материала деталей и условия их контакта. После температурной сборки материал детали 2 на разных участках сопряжения деформируется по-разному. На участках контакта с валом точки ее посадочной поверхности перемещаются в радиальном направлении на некоторую величину U_2, зависящую от размеров и конструктивных особенностей соединяемых деталей, натяга, механических характеристик материалов и т.д. В пределах же канавок из-за отсутствия контакта с

валом материал деформируется в меньшей степени, образуя деформационную волну (рисунок 1,б), находящуюся в канавке и препятствующую относительному смешению деталей.

Геометрия деформационной волны зависит от многих факторов, в частности, от вида деформации материала детали 2, размеров, формы и положения канавки. Исследования, проведенные методом конечных элементов (МКЭ), показали, что при цилиндрической форме охватывающей детали и упругой деформации ее материала волна в сечении, проходящем через ось соединения (рисунок 1,б), имеет симметричную форму, близкую к дуге окружности.

При действии на соединение внешней осевой сдвигающей силы она несколько деформируется. Сечение волны становится асимметричным со смещением центра масс в сторону той стенки канавки, в которую она упирается. На рисунке 1,б деформационная волна показана условно без соблюдения ее действительных размеров. Высота ΔU_2 деформационной волны зависит от ширины l_k канавки в нормальном ее сечении [4]. При большой ширине канавки величина ΔU_2 соразмерна U_2.

Несущая способность (прочность) гладкого цилиндрического соединения с натягом оценивается величиной суммарной силы трения (сцепления), возникающей между сопрягаемыми поверхностями после сборки. В инженерных расчетах ее величину, как правило, определяют по формуле [4 – 7]:

$$F=\pi d L f q, \qquad (1)$$

где d, L – габаритные размеры номинальной поверхности сопряжения, мм; f – коэффициент трения; q – средняя величина контактного давления, МПа. При равной длине соединяемых посадкой деталей q имеет значение q_0, вычисляемое по формуле Ляме.

Прочность же соединения с модифицированной поверхностью сопряжения определяется величиной суммарной силы трения F_D между сопрягаемыми поверхностями в пределах площадок контакта и способностью каждой деформационной волны сопротивляться относительному смещению деталей. В связи с этим возникает вопрос о влиянии канавок на величину контактного давления.

По сравнению с гладким соединением канавки уменьшают номинальную площадь S_D контакта. Средняя же величина контактного давления при этом возрастает.

Рассмотрим в качестве примера соединение стальных втулки и вала с одной кольцевой канавкой на его посадочной поверхности (рисунок 2,а).

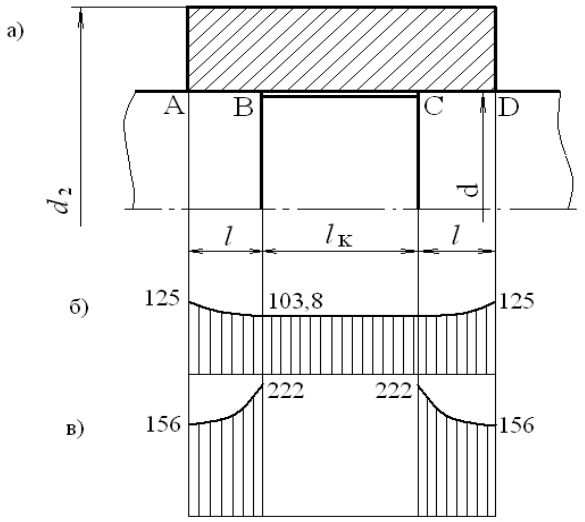


Рисунок 2 – Распределение контактного давления в соединении: а – общий вид соединения; б – график распределения контактного давления в гладком цилиндрическом соединении; в – график распределения контактного давления в соединении с модифицированной поверхностью сопряжения

Основные размеры соединения: d = 40 мм; d_2 = 70 мм; l_1 = 80 мм; l_2 = 40 мм; натяг δ – 0,06 мм.

Канавка шириной 20 мм расположена симметрично по отношению к торцам охватывающей детали, она играет роль концентратора контактного давления. Это подтверждается приведенными на рисунке 2 б,в графиками его распределения соответственно в гладком соединении и соединении с модифицированной поверхностью сопряжения.

Графики построены по данным, полученным МКЭ. Детально условия создания конечно-элементных моделей этих соединений и определения с их использованием контактного давления описаны в работе [4].

Как показали результаты расчета, в гладком цилиндрическом соединении в средней части стыка контактное давление постоянно и имеет значение, равное q_0. Выступающие концы вала препятствуют его деформации, вызывая у границ A и D стыка концентрацию контактно-

го давления. В результате среднее значение q в гладком соединении возросло до 108,625 МПа. Для сравнения – q_0 = 103,8 МПа.

Канавка стала причиной роста общего уровня контактного давления и его концентрации. Минимальное значение контактного давления в сечениях A и D возросло до 156 МПа, максимальное в сечениях B и C – до 222 МПа, а среднее – до 172,2 МПа. Таким образом, на границах с канавкой (в сечениях B и C) контактное давление увеличилось кратно.

В соединениях, модифицированных предлагаемым способом, средняя величина q_D контактного давления зависит как от размера l_k канавки, так и от ширины l площадок контакта. Контактное давление тем больше, чем шире канавки и уже площадки контакта. Некоторые данные, свидетельствующие о влиянии параметров модификации на его величину, приведены в таблице 1, где указаны предельные (q_{max}, q_{min}) и среднее значения контактного давления в соединениях, составленных из стальных цилиндрических деталей с более длинной охватываемой деталью и одной кольцевой канавкой на ее посадочной поверхности. Для сравнения указаны также средние значения (q) контактного давления в соответствующих гладких соединениях. В таблице 1 приняты следующие обозначения: S, S_D – номинальная площадь контакта в гладком цилиндрическом соединении и соединении с модифицированной поверхностью сопряжения; F, F_D – суммарная сила трения в гладком и модифицированном соединениях соответственно.

Таблица 1 – Влияние параметров модификации на величину контактного давления

d	d_2	l_2	l_1	l_k	l	q	q_{max}	q_{min}	q_D	S/S_D	q/q_D	F/F_D
мм						МПа						
40	70	32	52	12	10	109,3	184	143	154	1,6	1,41	1,135
		28	48	8		110,1	163,2	136	143,2	1,4	1,30	1,076
		24	44	4		111,2	136,4	124,4	128	1,2	1,15	1,043
		24	44	8	8	111,2	172	146,9	153,6	1,5	1,38	1,087
		16	36		4	115,1	222,8	199,3	205,6	2,0	1,79	1,119
		40	80	10	15	108,6	170	125	137,2	1,33	1,26	1,056
		40	80	20	10	108,6	222	155	172,2	2,0	1,59	1,27

Следует отметить, что при расчете сил трения коэффициент трения оставался постоянным и равным 0,14, хотя условия контакта в гладком и модифицированном соединениях различны, что может сказаться на величине f.

Для оценки несущей способности упругой деформационной волны кольцевой формы использовалась следующая расчетная модель. Элемент деформационной волны длиной dl и шириной l_k (рисунок 3,а) удерживается в канавке радиальной силой q_Σ (рисунок 3,б), равной $d_\Sigma \cdot dl \cdot l_k$. Чтобы демонтировать соединение, надо вытолкнуть этот элемент волны из канавки. При осевом смещении вала 1 его кромка 3 оказывает на волну 4 силовое воздействие dN_i, направленное по нормали $N - N$.

Сила трения, возникающая между кромкой и поверхностью волны при относительном их смещении, поворачивает этот вектор на угол $\varphi_т$ трения. Осевая составляющая dT_i силы нормального давления dN_i препятствует осевому смещению вала.

Условие выхода деформационной волны из канавки:

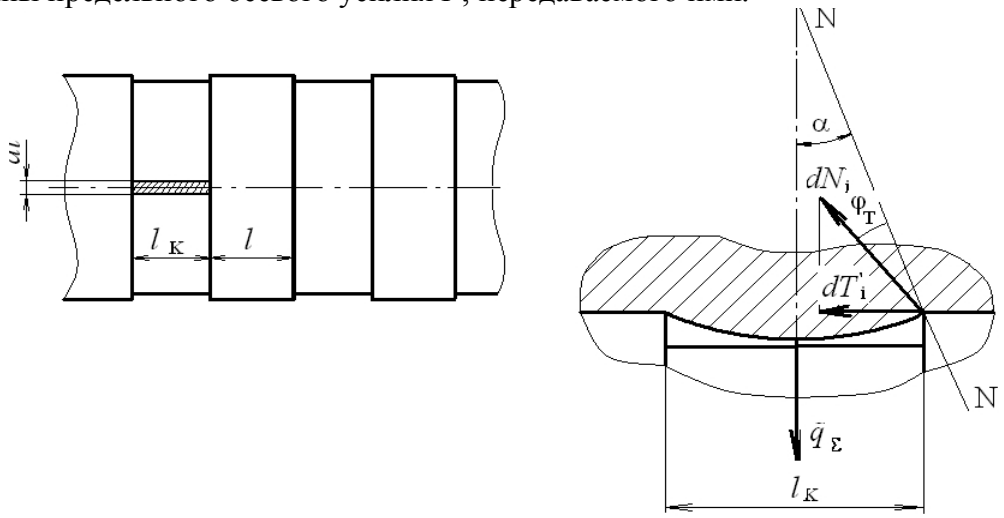
$$T_i \geq q_k \cdot l_k \cdot \pi \cdot d \cdot \mathrm{tg}(\varphi_т + \alpha), \qquad (2)$$

где $\varphi_т = \mathrm{arctg}(f)$, $\alpha = \dfrac{4\Delta U_2}{l_k}$, $\Delta U_2 = \dfrac{q_0 d d_2 l_k}{E_2(d_2^2 - d_2)}$, $q_k = q_0(1 - 0,67\dfrac{\Delta U_2}{U_2})$,

$$\frac{\Delta U_2}{U_2} = \frac{2 d_2 l_k}{(1-\mu_2)d^2 + (1+\mu_2)d_2^2}.$$

Формула (2) использовалась для оценки несущей способности (T_i) деформационной волны при ширине канавок 10 и 20 мм. Результаты представлены в таблице 2, где приведены

также значения суммарной силы трения в гладком и модифицированном соединениях, а также величины предельного осевого усилия P, передаваемого ими.



а б

Рисунок 3 – Соединение с кольцевыми канавками: а – охватываемая деталь, общий вид; б – схема нагружения деформационной волны

Таблица 2 – Результаты расчета несущей способности, суммарной силы трения, предельного осевого усилия

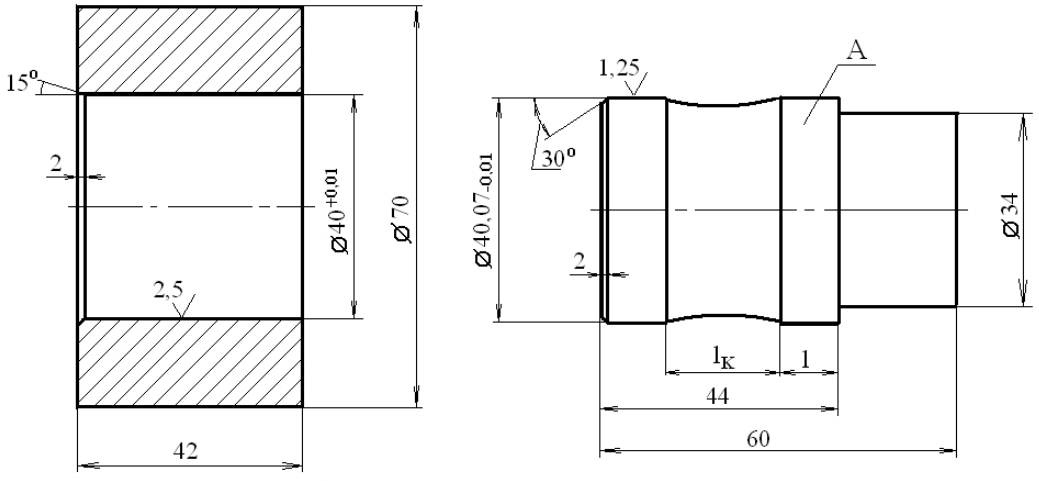
l_k, мм	F	T_i	P
	Н		
Нет канавки	76402,5	0	76402,5
10	72375,7	15773,7	88149,4
20	60559,3	26985,8	87545,1

Данные, приведенные в таблице 2, получены аналитически и свидетельствуют о том, что канавка шириной 10 мм позволила увеличить несущую способность соединения с натягом на 15,4 %, а шириной 20 мм – на 14,6 % по сравнению с гладким соединением при прочих равных условиях. Следует отметить, что рассматриваемая геометрия сопрягаемых поверхностей не является оптимальной. Оптимизацией параметров модификации по условию увеличения передаваемого соединением осевого усилия можно значительно увеличить его прочность.

Для проверки эффективности предлагаемого технического решения были проведены испытания [4], в ходе которых оценивалось влияние макрогеометрии стыка (ширины и количества канавок) на несущую способность цилиндрических соединений с натягом. Основные размеры соединяемых деталей показаны на рисунке 4. Несущая способность соединений оценивалась величиной P_P максимального усилия распрессовки, соответствующего началу взаимного смещения деталей 1 и 2. Распрессовка соединения производилась на гидравлическом прессе 2ПК-50. Испытывались соединения с одной и несколькими канавками. Во всех соединениях твердость вала превышала твердость охватывающей детали на (38 – 100)НВ.

Результаты испытаний показали, что несущая способность соединений с одной канавкой возрастает с увеличением размера l_k. В исследованных вариантах она в среднем возросла на 25, 58 и 80 % при ширине канавок 5, 10 и 20 мм соответственно. Несущая способность соединений с несколькими канавками на посадочной поверхности вала зависит не только от размера, но и от ширины l площадок контакта (или количества n_k канавок). При малой ширине площадок контакта (при большом n_k) контактное давление может быть столь велико, что в материале деталей возникнут опасные пластические деформации, снижающие прочность соединения. Так, несущая способность соединений с 16 канавками шириной 1,44 мм увеличилась в среднем на 7,8 % по сравнению с такими же гладкими соединениями. Две канавки

шириной 10 мм позволили увеличить P_P в среднем на 23 %, а 4 канавки шириной 5 мм и 8 канавок шириной 2,26 мм – на 55 и 50 % соответственно.

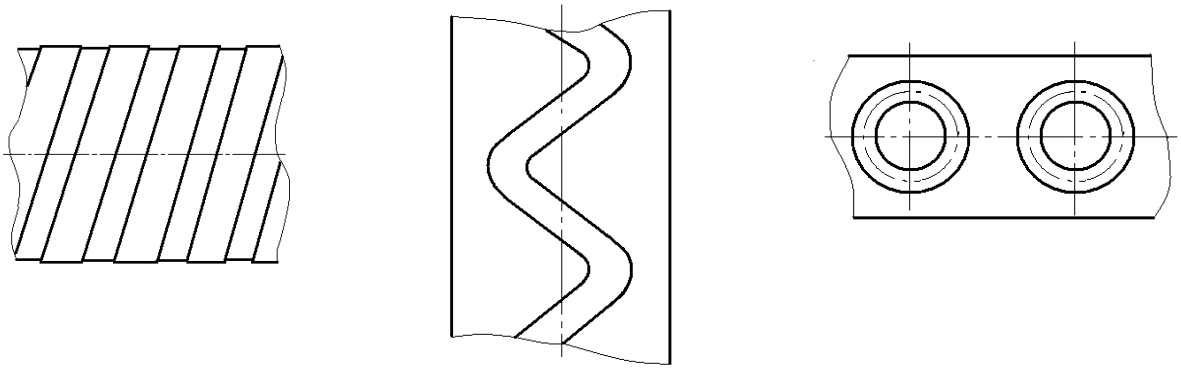


а б

Рисунок 4 – Общий вид соединяемых деталей: а – охватывающая деталь; б – вал

Следует отметить еще одно важное обстоятельство. После распрессовки на поверхности вала (рисунок 4) появились царапины, задиры, неровности, что подтверждает наличие деформационной волны и ее фиксирующего эффекта. Чем шире была канавка, тем хуже было состояние поверхности вала.

Кольцевые канавки (см. рисунок 1,а) позволяют увеличить передаваемое соединением осевое усилие. Для увеличения несущей способности соединения по окружной силе (крутящему моменту) надо изменить ориентацию канавок или их форму. Некоторые из вариантов модификации поверхности сопряжения приведены на рисунке 5. Следует отметить, что винтовые канавки (рисунок 5,а) обеспечивают большую несущую способность по осевой силе, зигзагообразные (рисунок 5,б) – по окружной, а кольцевые несоосные с валом (рисунок 5,в) в равной степени влияют на величину осевой и окружной сил, передаваемых соединением.



а б в

Рисунок 5 – Варианты геометрии канавок: а – винтовые; б – зигзагообразные; в – кольцевые несоосные с валом

Канавки могут иметь и другую геометрию, например, переменную ширину и глубину. Форма, размеры, ориентация канавок и их количество должны подбираться с учетом условий работы проектируемого соединения, предъявляемых к нему требований, конструкции соединяемых деталей и их размеров.

Полученные результаты подтверждают целесообразность и эффективность предлагаемого технического решения. Положительный эффект получен при ремонте колесных пар тепловозов – статическая осевая сила и крутящий момент увеличены на 10 – 13 %.

Модификация одной из сопрягаемых поверхностей канавками малой глубины – реальный способ восстановления и повышения несущей способности соединений с натягом при проведении ремонтных работ.

Список литературы

1. Пат. 2106544 Российская Федерация, МКИ 6 F 164/00. Соединение с натягом [Текст] / Бородин А. В., Волков В. М.; заявитель и патентообладатель Омская гос. академия путей сообщения. – № 596746; заявл. 21.02.95; опубл. 10.03.1998, Бюл. № 7. – 2с.: ил.

2. Бородин, А. В. Моделирование цилиндрического прессового соединения с дискретной поверхностью в контакте [Текст] / А. В. Бородин, И. Л. Рязанцева, В. М. Волков: информ.-аналит. журн. // Вестник ВНИИЖТа. – 1999. – № 6. – С. 29 – 34.

3. Бородин, А. В. Несущая способность прессового соединения с криволинейными канавками в стыке [Текст] / А. В. Бородин, И. Л. Рязанцева: информ.-аналит. журн. / Вестник машиностроения. – 2000. – № 5. – С. 3 – 7.

4. Бородин, А. В. Соединения с натягом повышенной несущей способности [Текст] / А. В. Бородин, И. Л. Рязанцева. / Омский гос. техн. ун-т – Омск, 2006. – С. 152.

5. Балацкий, Л. Т. Прочность прессовых соединений [Текст] / Л. Т. Балацкий. – Киев: Техника. – 1982. – С. 152.

6. Гречищев, Е. С. Соединения с натягом [Текст] / Е. С. Гречищев, А. А. Ильяшенко. – М.: Машиностроение. – 1981. – С. 240.

7. Иванов, А. С. Расчет соединений с натягом на несдвигаемость с учетом контактной жесткости сопрягаемых поверхностей [Текст] / А. С. Иванов, А. В. Воронцов, С. А. Терехин: информ.-аналит. журн / Вестник машиностроения. – 2003. – № 2. – С. 19 – 22.

УДК 621.336

Г. П. Маслов, М. А. Дятлова

АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ТОКОПРИЕМНИКОВ СКОРОСТНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

В статье рассматриваются аэродинамические свойства токоприемников 17РР, ТП-250, ТАсС-11, Сп-6М, предназначенных для скоростного движения электрического подвижного состава. Приводятся их спектры обтекания. Определены аэродинамические коэффициенты, необходимые для расчета аэродинамических характеристик. Построены аэродинамические характеристики токоприемников.

Аэродинамические свойства токоприемников принято оценивать по его аэродинамическим характеристикам [1, 2], которые представляются в виде зависимостей аэродинамических сил лобового сопротивления и подъемной силы от скорости встречного воздушного потока воздуха [3]. Эти характеристики можно получить при продувке токоприемника в аэродинамической трубе или на натурном эксперименте на участке электрической железной дороги, а также путем расчета аэродинамических сил по классическим формулам.

Аэродинамическое лобовое сопротивление

$$P_{\text{втх}} = C_x S_x \rho \frac{V_{\text{в}}^2}{2}, \qquad (1)$$

где C_x – аэродинамический коэффициент лобового сопротивления токоприемника;

S_x – площадь миделевого сечения токоприемника, м^2;

ρ – массовая плотность воздуха, кг/м^3;

$V_{\text{в}}$ – скорость воздушного потока, м/с.

Аэродинамическая подъемная сила

$$P_{\text{вт}} = C_y S_x \rho \frac{V_{\text{в}}^2}{2}, \qquad (2)$$

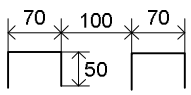
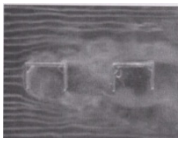
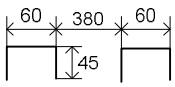
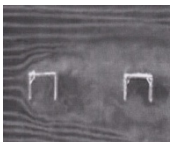
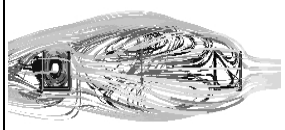
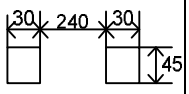
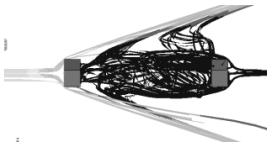
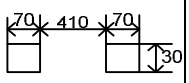
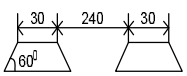
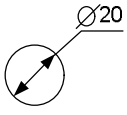
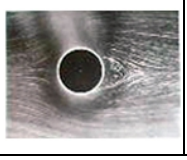
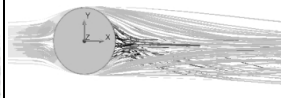
где C_y – аэродинамический коэффициент подъемной силы токоприемника.

Из формул (1), (2) видно, что аэродинамические силы токоприемника зависят наряду с другими показателями и от аэродинамических коэффициентов. На их величину влияют формы элементов, из которых состоит конкретная конструкция. Варьируя формами отдельных элементов, можно влиять на аэродинамическую характеристику токоприемника, что особенно важно на стадии проектирования.

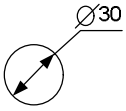
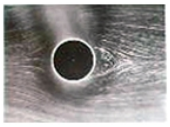
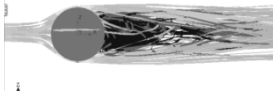
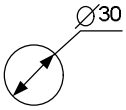
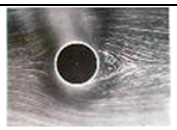
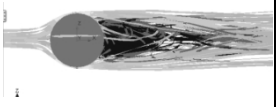
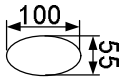
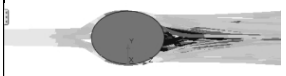
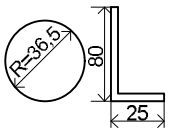
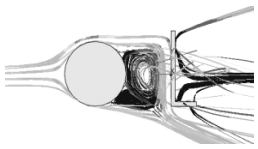
Аэродинамические коэффициенты элементов токоприемника можно получить, используя либо экспериментальные данные, либо спектры обтекания токоприемника потоком воздуха. Существуют различные методы визуализации обтекания физических тел воздушными потоками [4]: оптический, теневой, шлирный, интерферометрический, голографический, дымовой, виртуальный. При проведении исследований использовался виртуальный метод.

В таблице 1 приводятся спектры обтекания и другие сведения об отдельных элементах токоприемника, которые могут быть использованы для расчета аэродинамических сил.

Таблица 1 – Спектры обтекания и аэродинамические коэффициенты элементов токоприемников

Наименование элемента токоприемника	Форма сечения и размеры элемента токоприемника, мм	Миделевое сечение, м^2	Спектры обтекания		Аэродинамические коэффициенты	
			дымовой	виртуальный	подъемной силы C_y	лобового сопротивления C_x
1	2	3	4	5	6	7
Полоз		0,080			0,156	1,046
		0,075			0,064	0,940
		0,074	–		0,018	0,846
		0,062	–		0,104	1,119
		0,074	–		0,014	0,800
Горизонтальные связи		0,005			0,084	0,560*

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7
Верхние связи		0,015			–	0,310*
Диагональные связи		0,013			–	0,244*
Нижние связи		0,021	–		–	0,200*
Основание		0,095	–		–	0,430*

*Примечание. Аэродинамические коэффициенты приведены для угла атаки $\alpha = 0^{\circ}$.

Рассмотрим приведенные спектры обтекания элементов (см. таблицу 1).

Полоз. В верхней части полоза, на его передней кромке, создается пограничный слой, который постепенно уменьшается. В концевой части поток стекает, создавая за вертикальной стенкой вихревую зону. На определенном расстоянии от вертикальной стенки турбулентность снижается и переходит в общие ламинарное течение. В нижней части полоза вихревая зона также создается за передней стенкой, и во всем пространстве между передней и задней стенками имеет место турбулентный поток.

Горизонтальные связи представляют собой цилиндр диаметром 20 мм, расположенный под углом 90° к линии тока. В этом случае наблюдается симметричное обтекание. На спектре видно (см. таблицу 1), что за обтекаемым элементом создается зона турбулентности («мертвая зона»), а сорвавшиеся линии тока присоединяются к общему течению на некотором удалении.

Верхние связи имеют цилиндрическую форму. Они изменяют свое положение по отношению к направлению потока при изменении рабочей высоты токоприемника. В связи с этим картина их обтекания зависит от того, под каким углом направлены воздушный поток. Основное отличие заключается в протяженности «мертвых зон». При этом характер течения соответствует обтеканию цилиндра.

Диагональные связи имеют аналогичный спектр обтекания.

Нижние связи отличаются большим разнообразием форм: двутавр, конус, цилиндр, эллипс и др. Более плавный характер течения наблюдается при обтекании элемента в виде эллипса. В этом случае вихри вытягиваются по направлению потока, увеличивается длина «мертвой зоны» (см. таблицу 1).

Неподвижное основание. В таблице приведено основание, передняя и задняя часть которого представляет собой уголок, расположенный за валом подвижной рамы. В этом случае набегающий ламинарный поток при встрече с лобовой частью основания переходит в турбулентный, обтекающий заднюю часть. Подъемно-опускающий механизм в данном случае не показан.

Аэродинамические силы всего токоприемника можно получить также при расчете его спектра обтекания. Ниже приведены спектры обтекания токоприемников Сп-6М, ТАсС-11, ТП-250, предназначенных для скоростного движения, а также 17РР (10РР), установленного на электровозах, обеспечивающих пассажирские перевозки на электрифицированных участках железных дорог постоянного тока.

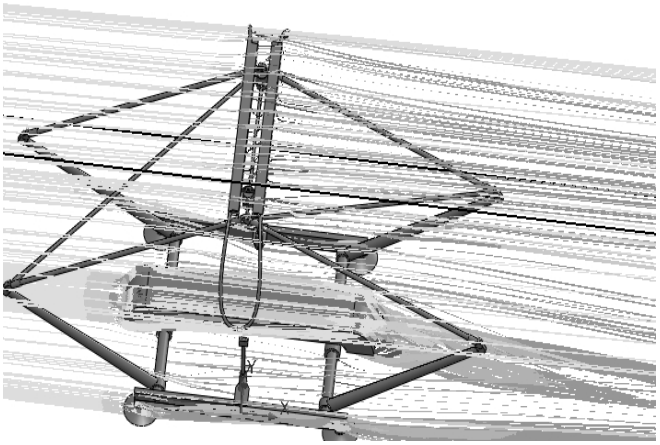


Рисунок 1 – Спектр обтекания токоприемника 17РР

На рисунке 1 показан спектр обтекания токоприемника 17РР (10РР). Расчеты проведены для скорости 160 км/ч (44,3 м/с) при встречном ветре 20 м/с.

Характер течения воздушного потока различен при обтекании полоза, подвижной рамы, неподвижного основания и обтекателя подъемно-опускающего механизма.

В общем случае картина обтекания токоприемника может быть представлена разными зонами. Турбулентные потоки стекают с полоза, элементов подвижных рам, неподвижного основания и обтекателя подъемно-опускающего механизма. В створе между элементами подвижной рамы характер течения набегающего потока не меняется и определяется для переднего токоприемника лобовой частью локомотива, а для заднего – расположением крышевого оборудования.

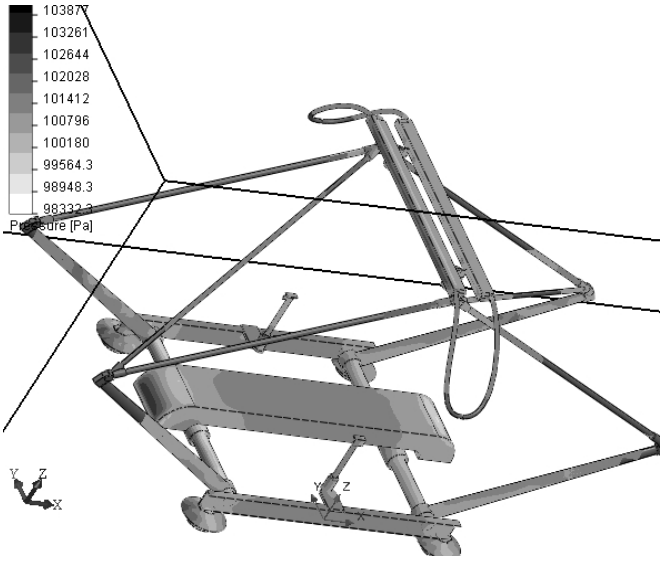


Рисунок 2 – Распределение давления при обтекании токоприемника воздушным потоком

Картина распределения давления по поверхности токоприемника приведена на рисунке 2. Наибольшее давление в горизонтальной плоскости создается на передней стенке полоза и составляет 103021 Па, а наименьшее – за полозом и обтекателем подъемно-опускающего механизма, которое равно 97948 Па.

Давление на полоз вызывает положительную аэродинамическую подъемную силу. В элементах подвижной рамы эта сила создается при их расположении встречно воздушному потоку, а отрицательная – по направлению его течения.

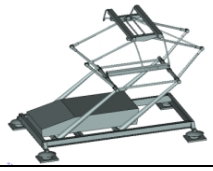
На основании полученных спектров обтекания и картин распределения давления всех указанных выше токоприемников определены их аэродинамические силы и коэффициенты (таблица 2).

На основании приведенных в таблице 2 аэродинамических коэффициентов определены аэродинамические характеристики лобового сопротивления и подъемной силы рассматриваемых токоприемников.

Таблица 2 – Сведение о токоприемниках скоростного электрического подвижного состава

Тип токоприемника	Общий вид	Миделевое сечение, м^2	Аэродинамические коэффициенты	
			подъемной силы C_y	лобового сопротивления C_x
1	2	3	4	5
17РР		0,690	0,095	0,367

Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5
Сп-6М		1,149	0,112	0,470
ТАсС-11		0,410	0,037	0,509
ТП-250		0,435	0,092	0,637

Аэродинамическое лобовое сопротивление (рисунок 3,а) каждого токоприемника возрастает с увеличением скорости воздушного потока, например, у токоприемника Сп-6М при скорости 33,3 м/с (120 км/ч) она составляет 235 Н, при 44,3 м/с (160 км/ч) ее величина достигает 520 Н, а при 55,3 м/с (200 км/ч) – 856 Н. Однако величина этой силы у каждого токоприемника различна при одинаковой скорости потока воздуха. Так, у токоприемника ТП-250 при скорости 55,3 м/с сила составит 535 Н, 17РР – 464 Н, ТАсС-11 – 385 Н.

Аэродинамическая подъемная сила (рисунок 3,б) также возрастает с ростом скорости воздушного потока. Так, у токоприемника Сп-6М при скорости 33,3 м/с она составляет 15 Н, при 44,3 м/с достигает 45 Н, а при 55,3 м/с – превышает 100 Н. При одинаковой скорости, например, 55,3 м/с, эта сила составит у 17РР – 115 Н, ТП-250 – 79 Н, ТАсС-11 – 28 Н.

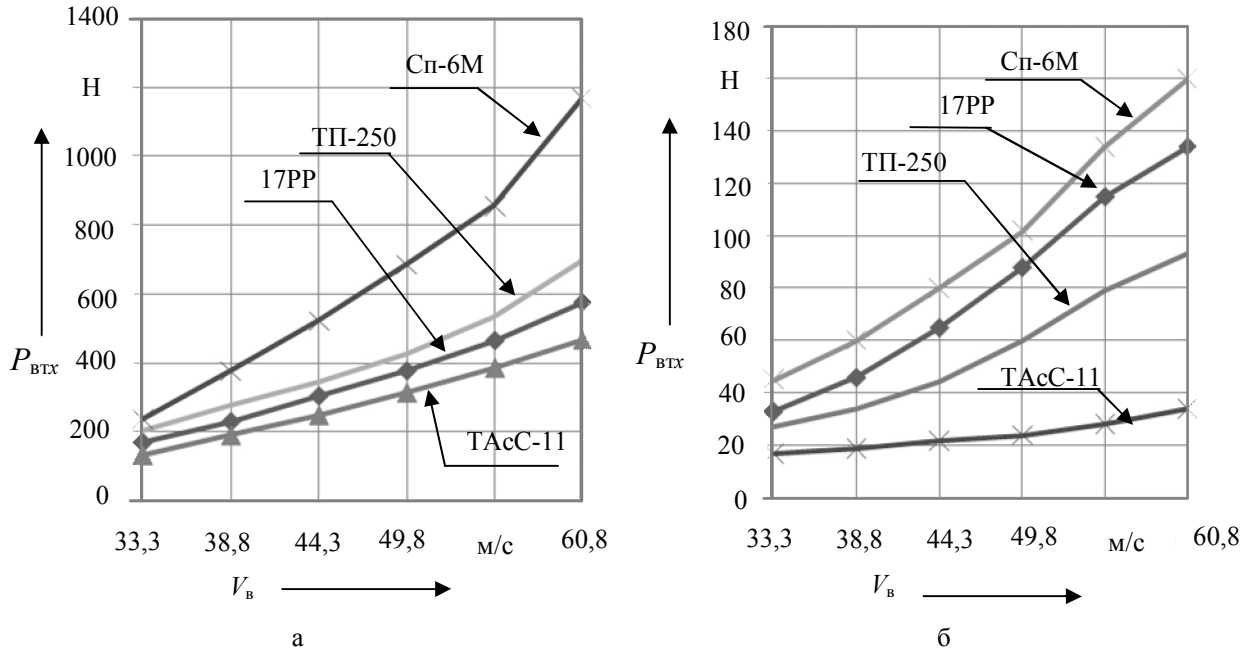


Рисунок 3 – Аэродинамические характеристики токоприемников:
а – лобового сопротивления; б – подъемной силы

Из приведенных данных видно, что аэродинамическая подъемная сила при скорости свыше 55,3 м/с (200 км/ч) превышает статическое нажатие подвижных рам токоприемников. Следовательно, при расчете взаимодействия токоприемника и контактной подвески необходимо учитывать возникающие аэродинамические силы. Величину этих сил можно принимать согласно приведенным аэродинамическим характеристикам.

Приведенные спектры (см. таблицу 1) дают возможность получить картину распределения давления по поверхности элементов. По классическим формулам производится расчет аэродинамических коэффициентов, которые даны в таблицах 1 и 2. Полученные аэродинамические коэффициенты позволяют определить аэродинамическую характеристику любого элемента токоприемника.

Таким образом, аэродинамические свойства токоприемника зависят от аэродинамических показателей отдельных элементов, что необходимо учитывать при его разработке для скоростного движения. Численные значения аэродинамических коэффициентов элементов токоприемников могут быть получены путем расчета их спектров обтекания. Аэродинамические характеристики токоприемника можно определить по классическим формулам, используя приведенные аэродинамические коэффициенты.

Список литературы

1. Маслов, Г. П. Влияние аэродинамической подъемной силы токоприемника на качество токосъема [Текст] / Г. П. Маслов, Е. Н. Панзо // Совершенствование схем устройств электроснабжения транспорта и проектирование их конструкций: Сб. науч. тр. / Уральский гос. ун-т путей сообщения. Екатеринбург, 2006. – Вып. 48 (131). – С. 168 – 174.

2. Маслов, Г. П. О выборе рациональный аэродинамической характеристики токоприемника [Текст] / Г. П. Маслов, О. И. Поздняков, Е. Н. Панзо // Исследования и разработка ресурсосберегающих технологий на железнодорожном транспорте: Межвуз. сб. науч. тр. с междунар. участием / Самарский ин-т инж. ж-д. трансп. Самара, 2002. – Вып. 23. – С. 70, 71.

3. Маслов, Г. П. О методах определения аэродинамических показателей полоза токоприемника [Текст] / Г. П. Маслов, О. И. Поздняков, А. В. Широкова, А. П. Стариков // Повышение надежности работы устройств электроснабжения железных дорог: Сб. науч. тр. / Уральская гос. акад. путей сообщения. Екатеринбург, 2000. – Вып. 13(95). – С. 53 – 57.

4. Кузнецов, А. К. Аэродинамические показатели элементов для высокоскоростного движения [Текст] / А. К. Кузнецов // Повышение качества токоснимания при высоких скоростях движения и в условиях БАМа: Межвуз. сб. науч. тр. / Омский ин-т инж. ж-д. трансп. Омск, 1980. – С. 28 – 31.

УДК 629.001.1

С. М. Овчаренко

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОСНАЩЕННОСТИ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЛОКОМОТИВОВ

На основе анализа составляющих затрат на поддержание работоспособного состояния локомотивного парка предложен критерий оценки эффективности оснащенности диагностического процесса. Критерий может быть использован для оптимизации параметров системы диагностирования локомотивов.

Одной из основных перспективных задач локомотивного хозяйства является задача снижения энергоемкости перевозочного процесса и повышения эффективности использования локомотивов. В современных условиях невозможно представить эксплуатацию и ремонт локомотивного парка без диагностического сопровождения [1 – 3].

Развитие теории диагностики, расширение фундаментальных исследований и разработка на этой основе широкого спектра диагностических методов и средств усложняет задачу выбора наиболее оптимального комплекса диагностического обеспечения содержания локомотивов. Поэтому для объективной оценки принятия решений по оснащенности диагностического процесса необходима разработка критерия, позволяющего комплексно оценить правильность принятия решения и эффективность использования диагностических методов и средств. При решении задачи диагностирования узлов локомотивов, связанных с безопасностью движения, в качестве основного критерия вполне может быть принята достоверность диагностирования. Для этих узлов совокупные последствия отказа, представленные в денежном выражении, могут исчисляться десятками, а иногда и сотнями миллионов рублей. Последствия с человеческими жертвами вообще не поддаются денежному выражению, и любые затраты можно считать оправданными. Тем не менее большинство узлов локомотива не связаны с безопасностью движения и для оценки их диагностического обеспечения наиболее приемлем экономический критерий эффективности. Для разработки критерия, позволяющего оценить эффективность работы комплекса диагностических средств, рассмотрим схему взаимодействия системы диагностирования с диагностируемой системой и системой технического обслуживания и ремонта (рисунок 1).

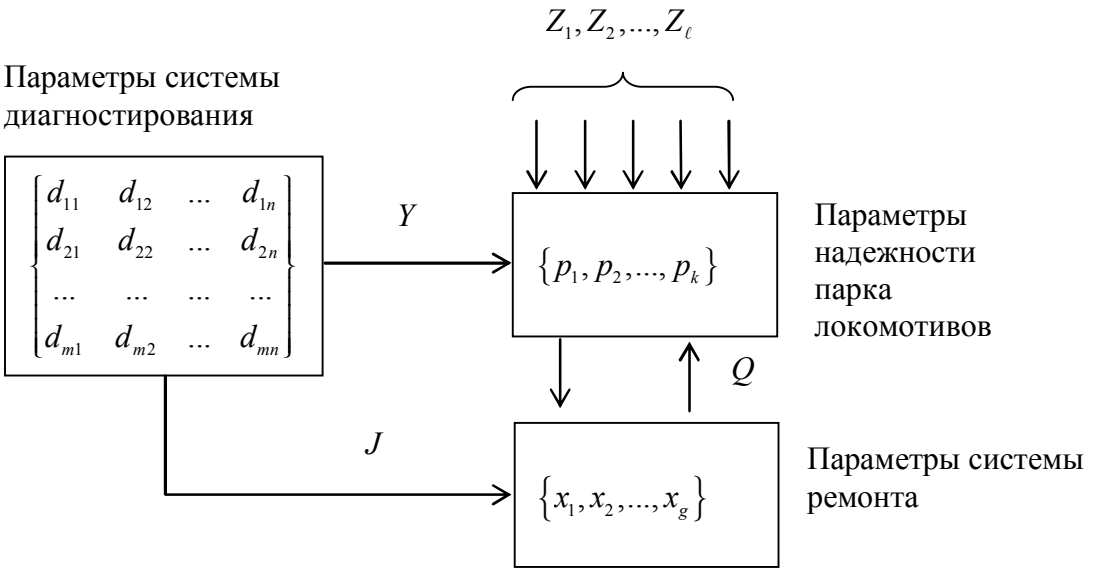


Рисунок 1 – Схема воздействия системы диагностирования на надежность и параметры системы ремонта тепловозов

Принимаем, что конечной целью применения системы технического диагностирования к конкретной технической системе (парк тепловозов) является организация ремонта по фактическому состоянию, т.е. применение системы ремонта и обслуживания, позволяющей эксплуатировать тепловозы с максимальной эффективностью (полной выработкой ресурса до ремонта). На рисунке 1 приняты обозначения: d_{mn} – параметры диагностических средств, где m – количество применяемых диагностических средств, n – число параметров, характеризующих диагностическое средство; p_k – параметры надежности работы тепловозного парка; Z_1 – случайные воздействия, приводящие к изменению параметров надежности работы тепловозов; x_g – параметры системы ремонта, устанавливаемые в зависимости от параметров надежности работы локомотивов и зависящие от стратегии применения диагностических средств; Y – управляющее воздействие системы диагностирования на параметры надежности работы тепловозов; J – управляющее воздействие системы диагностирования на формиро-

вание параметров системы технического обслуживания и ремонта тепловозов; Q – взаимное воздействие параметров надежности парка тепловозов и параметров системы ремонта.

В зависимости от комплекса параметров системы диагностирования формируются управляющие воздействия Y и J. Задача формирования параметров системы диагностирования заключается в том, чтобы в результате ее функционирования воздействия Y и J приводили к достижению оптимального сочетания уровня надежности работы тепловозов и затрат на поддержание этого уровня надежности с учетом диагностирования.

Решение задачи оптимизации параметров системы диагностирования может осуществляться при одном из двух вариантов: первый вариант – система технического диагностирования (СТД) функционирует в рамках планово-предупредительной системы ремонта; второй вариант – система технического диагностирования функционирует в рамках системы ремонта локомотивов по фактическому состоянию. В первом случае параметры СТД должны быть максимально адаптированы к параметрам системы технического обслуживания и ремонта локомотивов, во втором случае параметры СТД должны формировать параметры системы технического обслуживания и ремонта.

В первом случае периодичность проведения диагностических операций «привязывается» к периодичности проведения технических обслуживаний и ремонтов, тем самым сокращается суммарное время простоя локомотива на техническом обслуживании или ремонте и диагностировании. Во втором случае периодичность диагностирования устанавливается для каждого диагностируемого узла исходя из параметров надежности работы этого узла и целесообразности проведения диагностических операций. По результатам диагностирования и решения задачи прогнозирования остаточного ресурса устанавливаются сроки очередного технического обслуживания или ремонта или формируется объем ремонта.

В качестве вывода можно отметить, что оценка эффективности функционирования системы диагностирования может быть получена при использовании критерия, характеризующего весь комплекс параметров.

На рисунке 2 в формализованном виде представлена модель процесса поддержания требуемого уровня надежности работы тепловозного парка.

Тепловоз представляется в виде ограниченного перечня узлов, подвергаемых в процессе эксплуатации техническому обслуживанию, ремонту и диагностированию. В целом затраты, связанные с поддержанием необходимого уровня надежности работы тепловозов, будут характеризоваться векторами $\vec{k}_i$, $\vec{k}_i'$ и $\vec{k}_i''$ (i – диагностируемый узел тепловоза). Примем, что вектор затрат $\vec{k}_i$ формируется при условии, что узлы и системы тепловоза максимально вырабатывают свой ресурс и, как следствие, затраты будут минимальными. Вектор $\vec{k}_i'$ характеризует затраты на поддержание требуемого уровня надежности работы локомотивов при существующей системе технического обслуживания и ремонта без применения средств диагностирования. Затраты при таком подходе будут значительно выше. Вектор $\vec{k}_i''$ характеризует снижение затрат при применении сложившейся системы технического диагностирования.

Применение методов и средств диагностирования узлов и систем тепловоза своей конечной целью имеет стремление снизить затраты. В условиях реального применения средств диагностирования снижение затрат происходит до значения $\left|\vec{k}_i'+\vec{k}_i''\right|$. Это уменьшение затрат характеризует эффективность применения диагностических средств. В действительности эта эффективность может быть нулевой ($\vec{k}'_{i=5}+\vec{k}''_{i=5}=\vec{k}'_{i=5}$) или отрицательной, приводящей к увеличению затрат ($\vec{k}''_{i=4}$). Причем направление и значение вектора $\vec{k}_i''$ определяется параметрами применения и характеристиками используемых диагностических средств. Конечной целью задачи поиска наилучшего варианта оснащенности диагностического процесса является выполнение условия достижения максимального значения критерия оценки эффективности диагностического процесса $K_d \to \max$.

В процессе эксплуатации в результате возникающих неисправностей нарушается работоспособность локомотива, что приводит к неплановым ремонтам, на которых устраняются неисправности и возникающие последствия. Из опыта: стоимость устранения неисправности на неплановом ремонте может на порядок превышать затраты на устранение этой же неисправности на плановом ремонте. В результате проведения диагностических операций предполагается, что достигается снижение количества неплановых ремонтов.

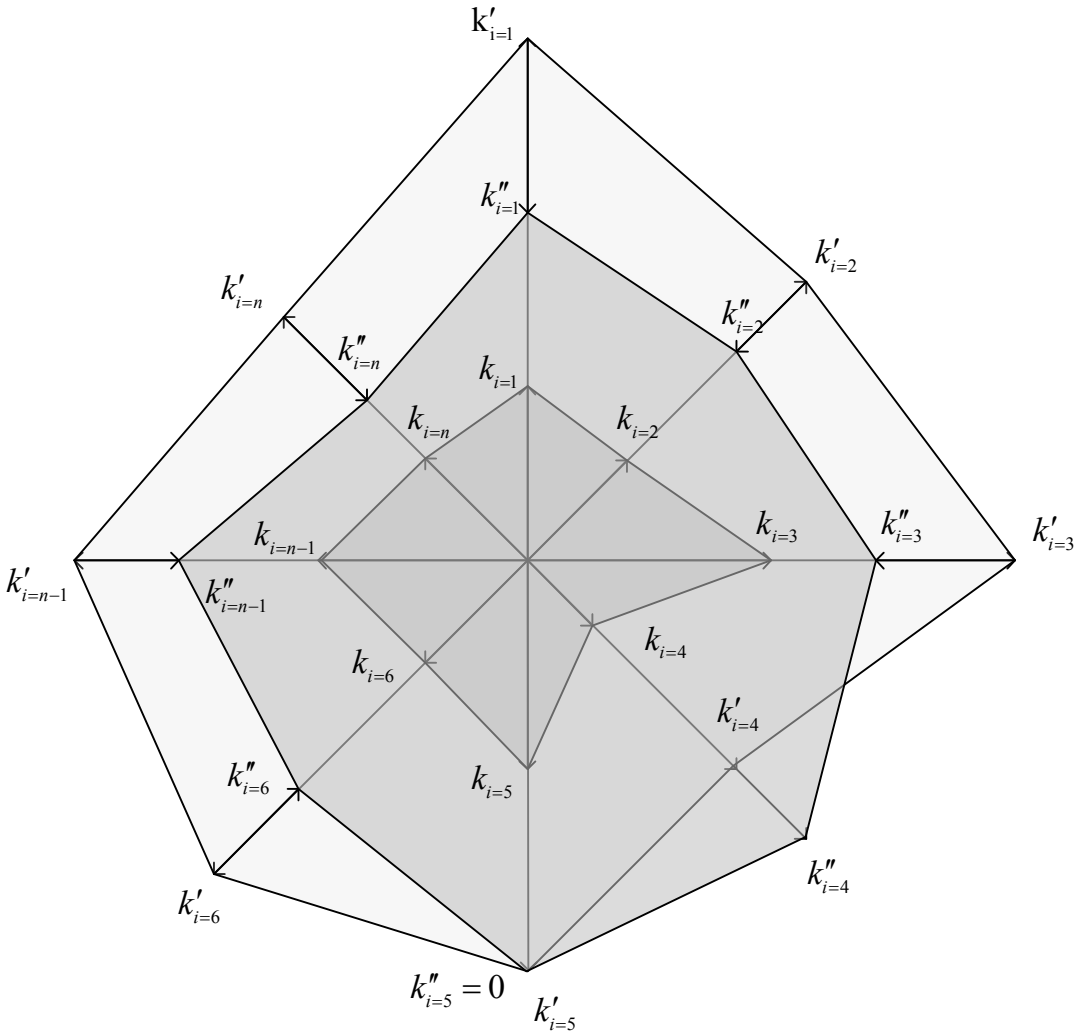


Рисунок 2 – Векторно-графическая модель оснащенности диагностического процесса

Обозначим через K_n количество неплановых ремонтов локомотивов при условии, что к ним не применяется система диагностирования, тогда количество неплановых ремонтов при применении системы диагностирования определится по формуле:

$$K_{nd} = K_n \left(1 - \mu_1 \sum_{j=1}^{K} m_j\right)\left[1 - \mu_2 \prod_{j=1}^{K} \left(D1_j \cdot D2_j\right)\right], \qquad (1)$$

где μ_1 – коэффициент влияния количества диагностирований на количество неплановых ремонтов;

μ_2 – коэффициент влияния достоверности диагностирования на количество неплановых ремонтов;

m_j – количество диагностирований j-м средством за расчетный период;

K – количество диагностических средств;

$D1_j$ и $D2_j$ – достоверность диагностирования j-го средства с учетом ошибок первого и второго рода;

K_n – количество неплановых ремонтов без диагностирования.

При снижении достоверности $D2_j$ вероятность наступления неплановых ремонтов возрастает и, соответственно, возрастает время устранения неисправностей. С учетом этого замечания время простоя на ремонте, ч,

$$T_{nd} = T_n \left(1 - \mu_3 \prod_{j=1}^{K} D2_j\right), \tag{2}$$

где μ_3 – коэффициент влияния $D2_j$ на простой на неплановом ремонте;

T_n – время простоя на неплановом ремонте без диагностирования, ч.

Применение системы диагностирования направлено не только на сокращение количества неплановых ремонтов, но и на сокращение количества плановых ремонтов:

$$K_{pd_i} = K_{p_i} \left(1 - \mu_4 \sum_{j=1}^{K} m_j\right)\left[1 - \mu_5 \prod_{j=1}^{K} \left(D1_j \cdot D2_j\right)\right], \tag{3}$$

где K_p – количество плановых ремонтов без диагностирования;

μ_4 и μ_5 – коэффициенты влияния количества и достоверности диагностирования на количество плановых ремонтов;

i – вид ремонта.

В результате сокращения трудоемкости ремонта сокращается время простоя локомотива на соответствующем виде ремонта, ч:

$$T_{pd_i} = T_{p_i} \left(1 - \mu_6 \prod_{j=1}^{K} D1_j + \mu_7 \prod_{j=1}^{K} D2_j\right), \tag{4}$$

где μ_6 и μ_7 – коэффициент влияния $D1_j$ и $D2_j$ на простой на плановом ремонте;

T_{p_i} – время простоя на плановом ремонте без диагностирования, ч.

Если можно принять, что применение диагностирования не влияет на стоимость планового ремонта, то сокращение времени поиска неисправностей, трудоемкости и времени простоя в конечном итоге приводит к снижению стоимости планового ремонта с диагностированием, р.:

$$S_{pd_i} = S_{p_i} \left(1 - \mu_8 \prod_{j=1}^{K} D1_j + \mu_9 \prod_{j=1}^{K} D2_j\right), \tag{5}$$

где S_{p_i} – стоимость планового ремонта без диагностирования, р.

μ_8 и μ_9 – коэффициенты влияния $D1_j$ и $D2_j$ на стоимость *i*-го планового ремонта.

Коэффициенты влияния $\mu_1 - \mu_9$ определяются статистически по результатам анализа надежностных характеристик узлов и систем локомотива и фактических реализаций параметров системы ремонта. Поддержание локомотивного парка в работоспособном состоянии и обеспечение заданного уровня надежности требует определенных затрат. Значения составляющих затрат зависят от технического состояния локомотивного парка, интенсивности эксплуатации, технологии ремонта и уровня диагностического обеспечения.

Суммарные затраты из-за простоя на плановых ремонтах без применения диагностирования, р.,

$$Z_{pr} = \sum_{i=1}^{N} \left(S_{pr} \cdot T_{pr_i} \cdot K_{p_i}\right), \tag{6}$$

где N – количество плановых видов ремонта;

S_{pr} – стоимость одного часа простоя локомотива, р./ч;

T_{pr_i} – время простоя на i-м виде ремонта, ч.

Следует отметить, что если парк локомотивов состоит из нескольких серий локомотивов, то расчеты следует проводить по каждой серии. Суммарная стоимость всех видов плановых ремонтов, р.,

$$Z_p = \sum_{i=1}^{N} S_{p_i} \cdot K_{p_i}. \tag{7}$$

Затраты на неплановые ремонты без применения системы диагностирования

$$Z_n = S_n \cdot K_n, \tag{8}$$

где S_n – средняя стоимость непланового ремонта, р.;

K_n – количество неплановых ремонтов.

Суммарные потери от простоя локомотивов на неплановых ремонтах

$$Z_{nr} = T_n \cdot K_n \cdot S_{pr}. \tag{9}$$

Для удобства расчетов и сравнения суммарные затраты на поддержания локомотивного парка в работоспособном состоянии без использования диагностических средств необходимо представить в виде удельных затрат, например, на единицу пробега или выполненной работы:

$$Z_{\Sigma} = \frac{Z_n + Z_p + Z_{nr} + Z_{pr}}{L}, \tag{10}$$

где L – суммарный пробег всех локомотивов за расчетный период, км.

Применение диагностических средств связано с затратами. Суммарные затраты на содержание диагностических средств, р.:

$$Z_d = \sum_{j=1}^{K} S_{p_j} T_r, \tag{11}$$

где S_{p_j} – затраты на обслуживание и поддержание в исправном состоянии j-го средства диагностирования, р./ч;

T_r – продолжительность расчетного периода, ч.

Суммарные затраты на диагностические операции, р.:

$$Z_{d\text{o}} = \sum_{j=1}^{K} m_j \cdot S_{dt_j} \cdot T_j, \tag{12}$$

где T_j – продолжительность диагностирования j-м диагностическим средством, ч;

S_{dt_j} – стоимость одного часа диагностирования j-м диагностическим средством, р./ч;

m_j – количество диагностирований j-м диагностическим средством за расчетный период.

Суммарные затраты от простоя на диагностировании, р.:

$$Z_{pr} = \sum_{j=1}^{K} m_j \cdot T_j \cdot S_{pr_j}. \tag{13}$$

При включении в систему ремонта диагностических средств сокращается количество неплановых ремонтов, при этом суммарные затраты на неплановые ремонты также сокращаются, р.:

$$Z_{nd} = S_{nd} \cdot K_{nd}\,, \tag{14}$$

где S_{nd} – стоимость непланового ремонта при использовании диагностических средств, р.;

K_{nd} – количество неплановых ремонтов при использовании диагностических средств.

Затраты от простоя на неплановых ремонтов с диагностированием, р.,

$$Z_{nrd} = \left(K_{nd} \prod_{j=1}^{K} \frac{1}{D2_j} \right) T_{nd} \cdot S_{pr}\,. \tag{15}$$

Суммарные затраты на плановых ремонтах при применении диагностических средств, р.,

$$Z_{pd} = \sum_{i=1}^{N} \left(S_{pr} \cdot T_{pd_i} \cdot K_{pd_i} \right). \tag{16}$$

Суммарные затраты от простоев на плановых ремонтах, р.,

$$Z_{prd} = \sum_{i=1}^{N} \left(S_{pd_i} \cdot K_{pd_i} \right). \tag{17}$$

Суммарная стоимость средств диагностирования, р.,

$$Z_{ps} = \sum_{j=1}^{K} \left(\gamma \cdot S_{d_j} \right), \tag{18}$$

где γ – коэффициент отнесения стоимости диагностических средств к расчетному периоду.

В относительных единицах суммарные затраты на поддержание работоспособности локомотивного парка при применении диагностических средств рассчитываются по формуле, р./км:

$$Zd_{\Sigma} = \frac{Z_d + Z_{do} + Z_{pr} + Z_{nd} + Z_{nrd} + Z_{pd} + Z_{prd} + Z_{ds}}{L}. \tag{19}$$

Оценка эффективности оснащенности диагностического процесса может осуществляться по коэффициенту

$$K_d = \frac{Z_{\Sigma}}{Zd_{\Sigma}}. \tag{20}$$

Изменение составляющих диагностической системы будет оказывать влияние на значение коэффициента K_d, которое должно быть больше единицы при условии, что применение средств диагностирования эффективно.

Предложенный критерий позволяет оценить эффективность применения комплекса диагностических средств и соответствие текущему уровню надежности локомотивного парка.

Список литературы

1. Горский, А. В. Ремонт – только по результатам диагностирования / А. В. Горский, А. А. Воробъев, Б. М. Куанышев // Локомотив.– 1998.– № 12. – С. 37 – 39.

2. Подшивалов, А. Б. Диагностирование локомотивов/ А. Б. Подшивалов // Локомотив. – 1977. – № 6. – С. 27 – 29.

3. Исаев, И. П. Система ремонта локомотивов с учетом их фактического состояния на основе технического диагностирования/ И. П. Исаев, А. В. Горский, А. Т. Осяев // Вестник ВНИИЖТа. – 1991. – № 6. – С. 31 – 34.

УДК 621.336

В. М. Павлов, В. Н. Финиченко

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТОКОПРИЕМНИКОВ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

В статье рассмотрена усовершенствованная методика расчета взаимодействия токоприемников с контактной подвеской с учетом различного исполнения верхнего узла токоприемника, предложены виды конструкции верхних узлов токоприемников и приведены результаты их экспериментальных исследований.

Важнейшую роль в техническом перевооружении железнодорожного транспорта играет электрификация железных дорог, позволяющая повысить скорость движения поездов, а следовательно, сократить время доставки грузов и пассажиров.

Транспортная стратегия России, принятая 03.12.2003 на всероссийском совещании в Кремле, наметила направления развития транспортной системы страны, в том числе создание международных транспортных коридоров «Европа – Азия» и «Север – Юг», в которых основную роль будут играть электрические железные дороги.

Согласно стратегическим направлениям научно-технического развития ОАО «Российские железные дороги» на период до 2015 г. («Белая книга» ОАО «РЖД») одним из важнейших направлений является создание подвижного состава и инфраструктуры для высокоскоростного движения.

Спецификой электрического транспорта является подвод энергии через скользящий контакт между токоприемником и контактной подвеской, поэтому с повышением скоростей движения увеличивается мощность подвижного состава, а число токоприемников уменьшается до двух, при этом значение снимаемых полозом токов возрастает (особенно при постоянном токе), что требует совершенствования существующих элементов и узлов токоприемников. Это оставляет проблему обеспечения надежного и экономичного токосъема особенно актуальной.

На основании проведенного анализа конструкций известных скоростных токоприемников электроподвижного состава выявлены следующие пути повышения их нагрузочной способности:

– подрессоривание отдельных рядов контактных элементов;

– увеличение числа контактных элементов на полозах;

– улучшение электрических и динамических свойств контактных элементов токоприемников;

– улучшение условий отвода снимаемого тока с контактных элементов и каркасов полозов и охлаждение контактных элементов.

В связи со значительной стоимостью испытаний на эксплуатируемых участках железных дорог и необходимостью организации «окон» в регулярном движении подвижного состава, обуславливающих снижение провозной способности участка при линейных испытаниях, в настоящее время при проектировании устройств токосъема перспективных транспортных средств востребованы теоретические методы, учитывающие все многообразие действующих в реальных условиях факторов, т. е. методы, адекватно отражающие физику процесса токосъема и использующие математический аппарат, обеспечивающий приемлемую точность и достоверность результатов исследований [1].

Исследования по моделированию взаимодействия «токоприемник – контактная подвеска» проводили И. И. Власов, Г. Г. Марквардт, К. Г. Марквардт, А. В. Фрайфельд, В. П. Михеев, А. В. Плакс, С. Н. Ковалев, Т. А. Тибилов, П. Д. Титаренко, А. В. Ефимов, А. Г. Галкин, В. М. Павлов, В. А. Ан, М. М. Ерофеева, В. Т. Жарков, В. И. Себелев, А. Н. Горбань, Р. Ниблер, С. Фуджии, Н. Сибата, И. Кумезава и др.

Расчет взаимодействия токоприемника с контактной подвеской сводится к определению характеристики контактного нажатия с учетом детерминированного воздействия со стороны контактного провода и основания токоприемника.

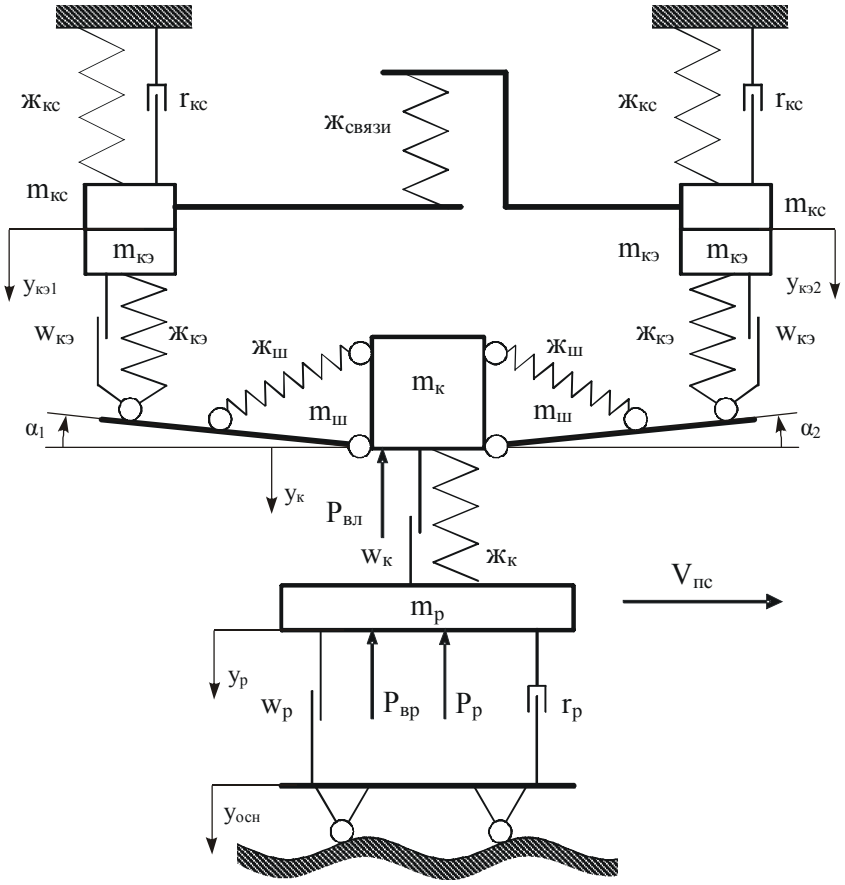


Рисунок 1– Кинематическая схема взаимодействия токоприемника с контактной подвеской

На расчетной схеме (рисунок 1) и в формулах приняты следующие обозначения: $ж_{кс}$ – жесткость контактной подвески в точке контакта; $r_{кс}$ – коэффициент вязкого трения в контактной подвеске; $ж_{связи}$ – жесткость, имитирующая упругие связи в контактной подвеске; $m_{кс}$ – масса контактной подвески, сосредоточенная над одним полозом; $m_{кэ}$ – масса полоза токоприемника; $w_{кэ}$ – сила сухого трения контактного элемента; $ж_{кэ}$ – жесткость пружины контактного элемента; $ж_{ш}$ – жесткость пружины штанги; $m_{ш}$ – масса штанги каретки; $m_{к}$ – масса каретки; $w_{к}$ – сила сухого трения каретки; $ж_{к}$ – жесткость пружины каретки; $m_{р}$ – масса системы подвижных рам токоприемника; $w_{р}$ – сила сухого трения в системе подвижных рам; $r_{р}$ – коэффициент вязкого трения в системе подвижных рам; $P_{р}$ – статическое нажатие токоприемника; $P_{вр}$ и $P_{вл}$ – аэродинамические силы, воздействующие на систему подвижных рам и на полоз токоприемника; $V_{п.с}$ – скорость движения подвижного состава; $y_{осн}$ – отклонение основания токоприемника в вертикальном направлении от положения статического равновесия; $y_{р}$ – высотное положение рамы токоприемника; $y_{к}$ – высотное положение каретки; $y_{кэ1}$ и $y_{кэ2}$ – расстояние в вертикальном направлении от первого и от второго по ходу движения полозов до положения статического равновесия; $y_{кс0}$ – высотное положение контактного провода при отсутствии под ним токоприемника; α_1 и α_2 – угол поворота штанги первого и второго по ходу движения полоза токоприемника.

В расчетах приняты следующие допущения [1, 2]:

рамы, штанги токоприемника и его необрессоренные части являются абсолютно твердыми, в связи с чем отсутствует необходимость учета упругих деформаций штанг и рам токоприемника, которые имеют незначительную величину и слабо влияют на процесс токосъема;

контактные элементы движутся по контактному проводу безотрывно, что позволяет не рассчитывать траектории движения контактного провода и контактных элементов в отдельности, а также не учитывать ударный процесс при соприкосновении контактного элемента с контактным проводом;

контактная подвеска принята упругой и представляется дискретной моделью;

контактные элементы перемещаются только вертикально (незначительное перемещение в горизонтальном направлении принимается равным нулю, так как оно вызывается упругими деформациями в рамах и штангах токоприемника, которые не учитываются согласно первому допущению).

Влияние на контактное нажатие со стороны стрелы провеса контактного провода заключается в изменяющихся по длине пролета жесткости контактной подвески и высотном положении контактного провода при отсутствии под ним токоприемника. Значения высотного

положения контактной подвески КС-200-06 в пролете и ее жесткости получены экспериментально с использованием оборудования вагона-лаборатории для испытания контактной сети на перегоне Лихославль – Калашниково Октябрьской железной дороги. Для учета изменяющейся жесткости контактной подвески использовано ее разложение в ряд Фурье:

$$ж_{кс} = ж_{кс0}\left(1+\sum_{k=1}^{n}\mu_k \cos k\omega_0 t\right),$$

где k – номер гармонической составляющей в жесткости контактной подвески; $\mu_k = \dfrac{a_k}{ж_{кс0}}$ – коэффициент параметрического возбуждения k-й гармоники; a_k – амплитуда косинусоидальной составляющей k-й гармоники; $\omega_0 = 2\pi V_{п.с}/l_{пр}$ – частота основной составляющей неравноупругости подвески; $l_{пр}$ – длина пролета контактной подвески.

Кроме того, на токоприемник будет воздействовать переносное движение, возникающее при изменении высотного положения полоза токоприемника из-за переменной жесткости контактной подвески. На процесс токосъема влияют также колебания основания токоприемника.

Аэродинамическое воздействие в расчетах взаимодействия токоприемника и контактной подвески учитывается с помощью экспериментально полученных в ходе линейных испытаний зависимостей аэродинамической подъемной силы, действующей на токоприемник (рисунок 2).

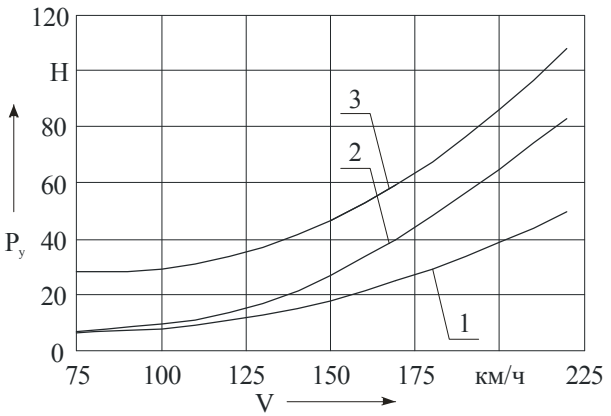


Рисунок 2 – Аэродинамическая подъемная сила токоприемника (линия 1 – высота подъема токоприемника 5,4 м; 2 – 5,6 м; 3 – 5,8 м)

Для расчета взаимодействия токоприемника с контактной подвеской использованы уравнения Лагранжа второго рода, которые подразумевают расчет кинетической и потенциальной энергии, диссипативной функции и обобщенных сил системы. Так как конструкция токоприемника имеет шесть степеней свободы, то необходимо составить шесть уравнений движения. Введенные обобщенные координаты отсчитываются от положения статического равновесия, чтобы потенциальная энергия в этом положении была нулевой, т. е. имела в положении равновесия минимум. В связи с тем, что подвижной состав совершает колебания, положение равновесия перемещается вместе с основанием токоприемника. Таким образом, система отсчета, в которой описывается движение токоприемника, учитывает переносное движение со скоростью $\dot{y}_{осн}$ в каждый момент времени.

Дифференциальное уравнение движения рамы токоприемника имеет вид:

$$\begin{aligned} &m_р\left(\ddot{y}_р + \ddot{y}_{осн} + \ddot{f}_{ст.кс}\right) + ж_к\left(y_р - y_к + l_{к0}\right) + \\ &+r_р\left(\dot{y}_р - \dot{y}_{осн} + \dot{f}_{ст.кс}\right) - r_к\left(\dot{y}_к - \dot{y}_р + \dot{f}_{ст.кс}\right) = P_р + P_у\frac{S_р}{S}; \end{aligned} \quad (1)$$

уравнение движения каретки токоприемника –

$$\begin{aligned} &m_к\left(\ddot{y}_к + \ddot{y}_{осн} + \ddot{f}_{ст.кс}\right) + m_ш\left(2\ddot{y}_к + 2\left(\ddot{y}_{осн} + \ddot{f}_{ст.кс}\right) + 0{,}5l_ш\left(\ddot{\alpha}_1 + \ddot{\alpha}_2\right)\right) + \\ &+ж_к\left(y_к - y_р - l_{к0}\right) + ж_{кэ}\left(2\left(l_{кэ0} + y_к\right) - y_{кэ1} - y_{кэ2} + l_2\left(\sin\alpha_1 + \sin\alpha_2\right)\right) + \\ &+r_к\left(\dot{y}_к - \dot{y}_р + \dot{f}_{ст.кс}\right) + r_{кэ}\left(2\dot{y}_к - \dot{f}_{ст.кс} - \dot{y}_{кэ1} - \dot{y}_{кэ2} + l_2\left(\dot{\alpha}_1 + \dot{\alpha}_2\right)\right) = P_у\frac{S_к}{S}; \end{aligned} \quad (2)$$

дифференциальные уравнения движения первого и второго по ходу движения подвижного состава полозов –

$$\begin{cases} \left(m_{\text{кс}}+m_{\text{кэ}}\right)\left(\ddot{y}_{\text{кэ1}}+\ddot{y}_{\text{осн}}+\ddot{f}_{\text{ст.кс}}\right)+\text{ж}_{\text{кэ}}\left(y_{\text{кэ1}}-y_{\text{к}}-l_{\text{кэ0}}-l_2\sin\alpha_1\right)+ \\ +\text{ж}_{\text{кс}}\left(y_{\text{кэ1}}-y_{\text{кс0}}\right)+\text{ж}_{\text{связи}}\left(y_{\text{кэ1}}-y_{\text{кэ2}}\right)+r_{\text{кэ}}\left(\dot{y}_{\text{кэ1}}-\dot{\alpha}_1 l_2-\dot{y}_{\text{к}}+\right. \\ \left.+\dot{f}_{\text{ст.кс}}\right)+r_{\text{кс}}\left(\dot{y}_{\text{кэ1}}+\dot{f}_{\text{ст.кс}}\right)=P_{\text{у}}\frac{S_{\text{кэ1}}}{S}-m_{\text{кс}}\frac{P_{\text{р}}}{\text{ж}_{\text{кс0}}}\sum_{k=1}^{n}a_k k^2\varpi_0\cos\left(k\varpi_0 t\right); \\ \left(m_{\text{кс}}+m_{\text{кэ}}\right)\left(\ddot{y}_{\text{кэ2}}+\ddot{y}_{\text{осн}}+\ddot{f}_{\text{ст.кс}}\right)+\text{ж}_{\text{кэ}}\left(y_{\text{кэ2}}-y_{\text{к}}-l_{\text{кэ0}}-l_2\sin\alpha_2\right)+ \\ +\text{ж}_{\text{кс}}\left(y_{\text{кэ2}}-y_{\text{кс0}}\right)+\text{ж}_{\text{связи}}\left(y_{\text{кэ2}}-y_{\text{кэ1}}\right)+r_{\text{кэ}}\left(\dot{y}_{\text{кэ2}}-\dot{\alpha}_2 l_2-\dot{y}_{\text{к}}+\right. \\ \left.+\dot{f}_{\text{ст.кс}}\right)+r_{\text{кс}}\left(\dot{y}_{\text{кэ2}}+\dot{f}_{\text{ст.кс}}\right)=P_{\text{у}}\frac{S_{\text{кэ2}}}{S}-m_{\text{кс}}\frac{P_{\text{р}}}{\text{ж}_{\text{кс0}}}\sum_{k=1}^{n}a_k k^2\varpi_0\cos\left(k\varpi_0 t\right); \end{cases} \tag{3}$$

уравнения движения штанг каретки токоприемника –

$$\begin{cases} J_{\text{ш}}\ddot{\alpha}_1+0,5m_{\text{ш}}l_{\text{ш}}\left(\ddot{y}_{\text{к}}+\ddot{y}_{\text{осн}}+\ddot{f}_{\text{ст.кс}}+\ddot{\alpha}_1\frac{l_{\text{ш}}^2}{2}\right)+\text{ж}_{\text{ш}}l_1 l_3\cos\alpha_1\left(l_{\text{ш0}}/\sqrt{l_1^2+l_3^2-2l_1 l_3\sin\alpha_1}-\right. \\ \left.-1\right)+\text{ж}_{\text{кэ}}\left(\left(l_{\text{кэ0}}-y_{\text{кэ1}}+y_{\text{к}}\right)l_2\cos\alpha_1+0,5l_2^2\sin 2\alpha_1\right)+r_{\text{кэ}}\left(\dot{\alpha}_1 l_2^2-\dot{y}_{\text{кэ1}}l_2+\dot{y}_{\text{к}}l_2-\dot{f}_{\text{ст.кс}}l_2\right)= \\ =P_{\text{кт1}}\mu\left(y_{\text{кэ1}}-y_{\text{к}}\right)+P_{\text{х}}\frac{S_{\text{кэ1}}}{S}\left(y_{\text{кэ1}}-y_{\text{к}}\right)+P_{\text{у}}\frac{S_{\text{кэ1}}}{S}l_2\cos\alpha_1; \\ J_{\text{ш}}\ddot{\alpha}_2+0,5m_{\text{ш}}l_{\text{ш}}\left(\ddot{y}_{\text{к}}+\ddot{y}_{\text{осн}}+\ddot{f}_{\text{ст.кс}}+\ddot{\alpha}_2\frac{l_{\text{ш}}^2}{2}\right)+\text{ж}_{\text{ш}}l_1 l_3\cos\alpha_2\left(l_{\text{ш0}}/\sqrt{l_1^2+l_3^2-2l_1 l_3\sin\alpha_2}-\right. \\ \left.-1\right)+\text{ж}_{\text{кэ}}\left(\left(l_{\text{кэ0}}-y_{\text{кэ2}}+y_{\text{к}}\right)l_2\cos\alpha_2+0,5l_2^2\sin 2\alpha_2\right)+r_{\text{кэ}}\left(\dot{\alpha}_2 l_2^2-\dot{y}_{\text{кэ2}}l_2+\dot{y}_{\text{к}}l_2-\dot{f}_{\text{ст.кс}}l_2\right)= \\ =-P_{\text{кт2}}\mu\left(y_{\text{кэ2}}-y_{\text{к}}\right)-P_{\text{х}}\frac{S_{\text{кэ2}}}{S}\left(y_{\text{кэ2}}-y_{\text{к}}\right)+P_{\text{у}}\frac{S_{\text{кэ2}}}{S}l_2\cos\alpha_2. \end{cases} \tag{4}$$

Решение систем (1) – (4) выполнено с помощью универсальной математической программы MathCAD, для этого система уравнений была преобразована к виду:

$$\begin{cases} \ddot{y}_{\text{р}}=f\left(y_{\text{р}},\dot{y}_{\text{р}},y_{\text{к}},\dot{y}_{\text{к}},y_{\text{осн}},\dot{y}_{\text{осн}},\ddot{y}_{\text{осн}},\ddot{f}_{\text{ст.кс}}\right); \\ \ddot{y}_{\text{к}}=f\left(y_{\text{р}},\dot{y}_{\text{р}},y_{\text{к}},\dot{y}_{\text{к}},\ddot{y}_{\text{осн}},\alpha_1,\dot{\alpha}_1,\ddot{\alpha}_1,\alpha_2,\dot{\alpha}_2,\ddot{\alpha}_2,y_{\text{кэ1}},\dot{y}_{\text{кэ1}},y_{\text{кэ2}},\dot{y}_{\text{кэ2}},\dot{f}_{\text{ст.кс}}\right); \\ \ddot{\alpha}_1=f\left(y_{\text{к}},\dot{y}_{\text{к}},\ddot{y}_{\text{к}},\ddot{y}_{\text{осн}},\alpha_1,\dot{\alpha}_1,\ddot{\alpha}_1,y_{\text{кэ1}},\dot{y}_{\text{кэ1}},\dot{f}_{\text{ст.кс}}\right); \\ \ddot{\alpha}_2=f\left(y_{\text{к}},\dot{y}_{\text{к}},\ddot{y}_{\text{к}},\ddot{y}_{\text{осн}},\alpha_2,\dot{\alpha}_2,\ddot{\alpha}_2,y_{\text{кэ2}},\dot{y}_{\text{кэ2}},\dot{f}_{\text{ст.кс}}\right); \\ \ddot{y}_{\text{кэ1}}=f\left(y_{\text{к}},\dot{y}_{\text{к}},\ddot{y}_{\text{осн}},\alpha_1,\dot{\alpha}_1,y_{\text{кэ1}},\dot{y}_{\text{кэ1}},\ddot{y}_{\text{кэ1}},y_{\text{кэ2}},\dot{f}_{\text{ст.кс}}\right); \\ \ddot{y}_{\text{кэ2}}=f\left(y_{\text{к}},\dot{y}_{\text{к}},\ddot{y}_{\text{осн}},\alpha_2,\dot{\alpha}_2,y_{\text{кэ1}},y_{\text{кэ2}},\dot{y}_{\text{кэ2}},\ddot{y}_{\text{кэ2}},\dot{f}_{\text{ст.кс}}\right). \end{cases} \tag{5}$$

В результате решения системы уравнений (5) получены графики зависимости перемещений и скоростей движения элементов токоприемников от времени. Силы контактного нажатия определяются по формулам:

$$\begin{cases} P_{\text{кт}1} = \text{ж}_{\text{кс}}\left(y_{\text{кэ}1} - y_{\text{кс}0}\right) + r_{\text{кс}}\left(\dot{y}_{\text{кэ}1} + \dot{f}_{\text{ст.кс}}\right) + m_{\text{кс}}\ddot{y}_{\text{кэ}1} + \text{ж}_{\text{связи}}\left(y_{\text{кэ}1} - y_{\text{кэ}2}\right); \\ P_{\text{кт}2} = \text{ж}_{\text{кс}}\left(y_{\text{кэ}2} - y_{\text{кс}0}\right) + r_{\text{кс}}\left(\dot{y}_{\text{кэ}2} + \dot{f}_{\text{ст.кс}}\right) + m_{\text{кс}}\ddot{y}_{\text{кэ}2} + \text{ж}_{\text{связи}}\left(y_{\text{кэ}2} - y_{\text{кэ}1}\right). \end{cases} \quad (6)$$

Разработанная модель для расчета взаимодействия токоприемника с контактной сетью позволила добиться приемлемой сходимости расчетных и экспериментальных данных, полученных в ходе линейных испытаний на участке Лихославль – Калашниково Октябрьской железной дороги (токоприемник фирмы Siemens, контактная подвеска – КС-200-06; расхождение результатов – не более 6,5 %).

С использованием предложенной математической модели расчета получены зависимости среднеквадратического отклонения (СКО) контактного нажатия токоприемника фирмы Siemens от скорости движения при различной жесткости кареток полоза (рисунок 3), совпадающие с результатами линейных испытаний (рисунок 4) на участке Лихославль – Калашниково.

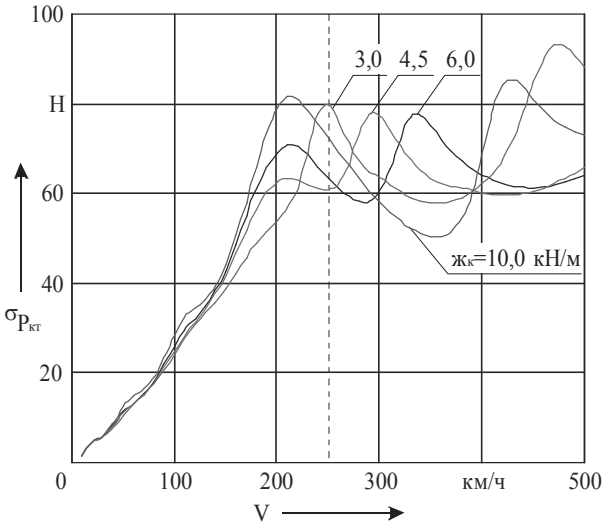


Рисунок 3 – Зависимость СКО контактного нажатия токоприемника от скорости движения при различной жесткости кареток полоза

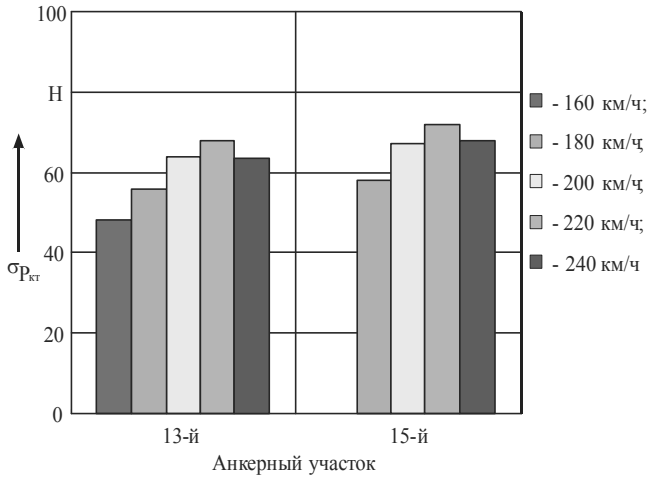


Рисунок 4 – Зависимость СКО контактного нажатия при различных скоростях движения электроподвижного состава (Лихославль – Калашниково)

Из графиков рисунка 3 видно, что на скорости 220 км/ч наблюдается резонанс, приводящий к увеличению СКО контактного нажатия; снижения влияния резонанса можно добиться уменьшением жесткости верхнего узла до 4,5 кН/м, при этом необходимо учитывать, что чрезмерное уменьшение жесткости приведет к сдвигу резонанса в сторону меньших скоростей и увеличению амплитуды СКО контактного нажатия.

Введение в верхний узел токоприемника элементов вторичного подрессоривания контактных элементов позволяет для скоростей до 250 км/ч в два раза уменьшить значение СКО контактного нажатия и практически убрать резонанс на скорости 220 км/ч (рисунок 5), при этом наименьшее СКО контактного нажатия соответствует жесткости каретки и элементов вторичного подрессоривания, равной 3,0 и 3,0 кН/м соответственно (рисунок 6).

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод о том, что предложенная методика расчета взаимодействия токоприемника электроподвижного состава с контактной подвеской позволяет рассчитать ряд известных и новых конструкций токоприемников и определить их параметры для обеспечения надежного и качественного токосъема.

В ОмГУПСе на основании проведенных расчетов предложены и разработаны две конструкции верхних узлов, повышающие нагрузочную способность токоприемников [3]:

полоз токоприемника с неоднородными по ширине контактными элементами, который

позволяет снимать большие тяговые токи за счет исключения переходного сопротивления между коробом и контактными накладками, а также улучшает динамические свойства полоза за счет снижения массы контактных накладок и введения элементов вторичного подрессоривания;

полоз токоприемника, который позволяет стабилизировать нажатие токоприемника на контактный провод за счет изменения его ширины, обеспечивая равномерный износ контактных элементов, и снимать большие тяговые токи за счет улучшенных динамических свойств полоза.

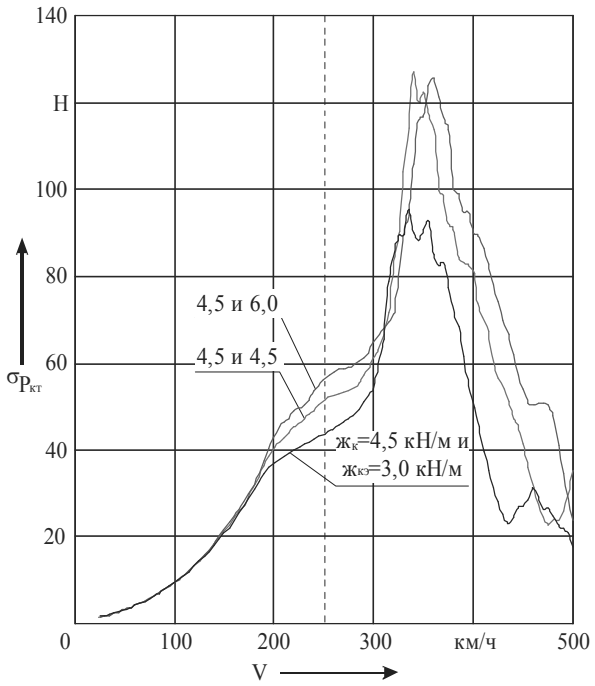


Рисунок 5 – Зависимость СКО контактного нажатия от скорости движения при различной жесткости пружин подрессоривания контактных элементов

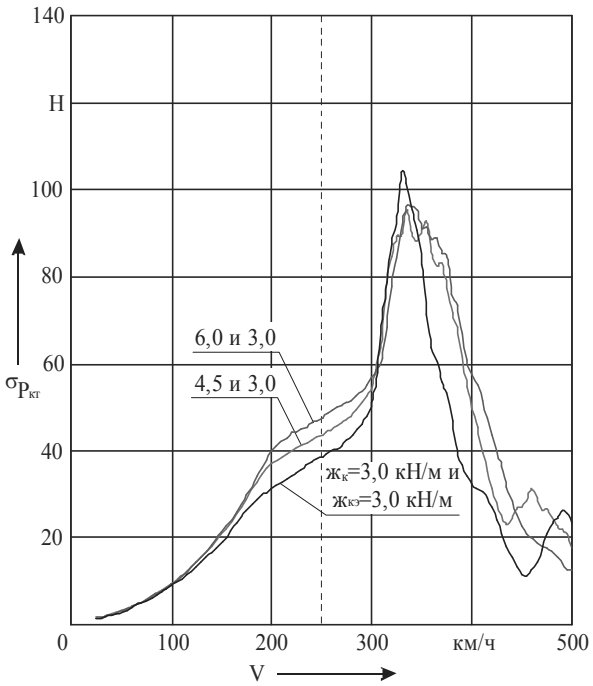


Рисунок 6 – Зависимость СКО контактного нажатия от скорости движения при различной жесткости пружин кареток

На основании результатов расчета предложена схема верхнего узла токоприемника (рисунок 7), позволяющая стабилизировать контактное нажатие токоприемника и увеличить его нагрузочную способность при увеличении скорости движения электроподвижного состава, определены технические параметры верхнего узла.

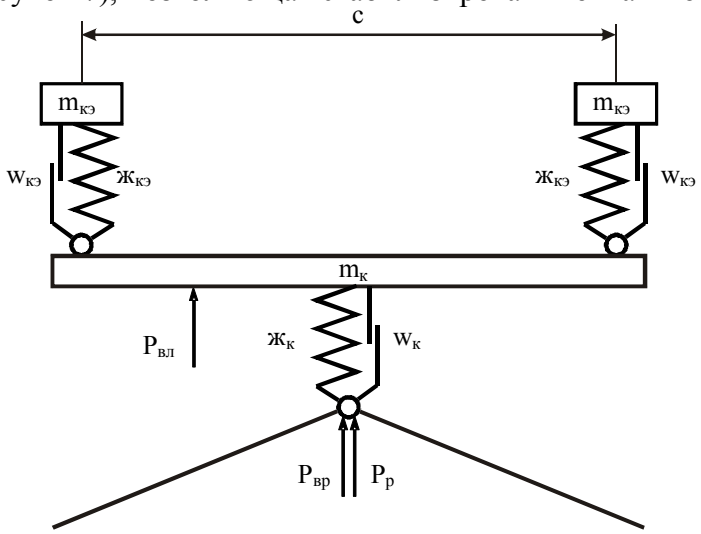


Рисунок 7 – Схема предлагаемого верхнего узла токоприемника

Анализ данных экспериментальных исследований предложенных конструктивных решений верхнего узла токоприемников [4] позволяет судить о параметрах и характеристиках предложенных конструкций верхних узлов токоприемников, современных контактных элементов, а также прогнозировать их работу в условиях эксплуатации и технико-экономическую эффективность применения данных конструкций на электрическом транспорте.

В ходе проведения нагрузочных испытаний получены зависимости разни-

цы температуры нагрева набегающего и сбегающего рядов контактных элементов полоза при изменении его ширины для различных скоростей движения и снимаемых токов (рисунки 8, 9).

Из полученных графиков (см. рисунки 8, 9) видно, что чем уже полоз, тем больше разница температуры нагрева набегающего и сбегающего рядов вставок. Кроме того, при увеличении ширины полоза на 500 мм и более разница в значениях температуры рядов вставок уменьшается незначительно, что подтверждают расчетные кривые.

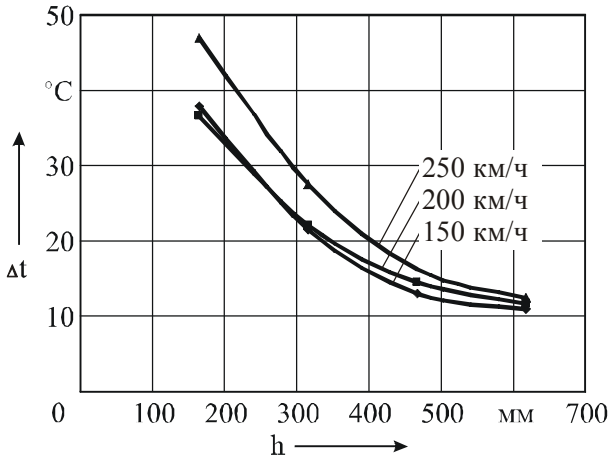


Рисунок 8 – Разница температуры нагрева набегающего и сбегающего рядов контактных элементов полоза при изменении его ширины для различных скоростей движения ($P_р$ = 100 Н; I = 350 А)

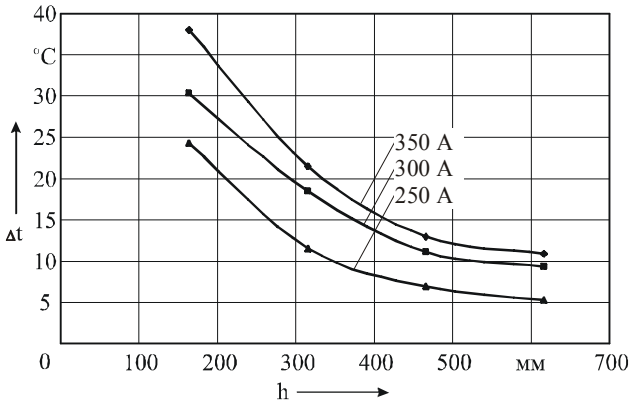


Рисунок 9 – Разница температуры нагрева набегающего и сбегающего рядов контактных элементов полоза при изменении его ширины для различных снимаемых токов ($P_р$ = 100 Н; $V_{дв}$ = 200 км/ч)

Применение предлагаемых конструкций верхних узлов токоприемников электроподвижного состава позволяет обеспечить надежную передачу рабочего тока при эксплуатации скоростных и тяжеловесных поездов, уменьшить капитальные затраты и эксплуатационные расходы за счет снижения затрат на их обслуживание.

Список литературы

1. Михеев, В. П. Контактные сети и линии электропередачи [Текст] / В. П. Михеев. – М.: Маршрут, 2003. – 421 с.

2. Вологин, В. А. Взаимодействие токоприемников и контактной сети [Текст] / В. А. Вологин. – М.: Интекст, 2006. – 256 с.

3. Финиченко, В. Н. Пути повышения нагрузочной способности токоприемников электроподвижного состава [Текст] / В. Н. Финиченко // Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте: Материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. Красноярск: Гротеск, 2005. – Т. 1. – С. 457 – 462.

4. Условия и предпосылки получения фактических параметров и характеристик контактных подвесок в ходе проведения линейных испытаний [Текст] / В. М. Павлов, А. Г. Галкин, В. Н. Финиченко и др. // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. Екатеринбург, 2007. – № 3. – С. 51 – 53.

УДК 621.313

С. В. Петроченко

ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПУТЕМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИИ ОБРАБОТКИ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КОЛЛЕКТОРОВ

В статье дан краткий анализ основных неисправностей коллекторов тяговых электродвигателей, обозначены проблемы, связанные с операцией по обточке рабочей поверхности коллекторов, выявлены факторы, в значительной степени влияющие на качество обработанной поверхности, дана оценка влияния этих факторов на качество рабочей поверхности коллектора. Получена математическая модель, описывающая влияние режимов резания на шероховатость рабочей поверхности коллекторов.

Тяговые электродвигатели (ТЭД) локомотивов предназначены для преобразования электрической энергии в механическую работу, затрачиваемую на движение локомотива. В процессе эксплуатации ТЭД происходит потеря его работоспособности за счет износа основных его узлов – моторно-осевых подшипников, подшипникового узла якоря, полюсов, обмоток, коллекторно-щеточного узла и т. д. Коллекторно-щеточный узел состоит из коллектора и щеток. В процессе ремонта изношенные сверх допустимой нормы щетки заменяют, поверхность коллектора восстанавливают обточкой. От качества ремонта коллектора зависит работоспособность всего ТЭД.

Коллекторы ТЭД (рисунок 1) состоят из медных пластин 3, имеющих в поперечном сечении клиновидную форму [1]. Со стороны, обращенной к валу двигателя, коллекторные пластины конструктивно выполнены в форме «ласточкина хвоста». Между собой коллекторные пластины изолированы миканитовыми прокладками 7 толщиной 1,3 мм. От корпуса пластины коллектора изолируют миканитовыми манжетами 5, а также миканитовым цилиндром 4. Нажимной конус 2 коллектора напрессовывают на переднюю нажимную шайбу 6 якоря и с помощью болтов 1 стягивают с ней.

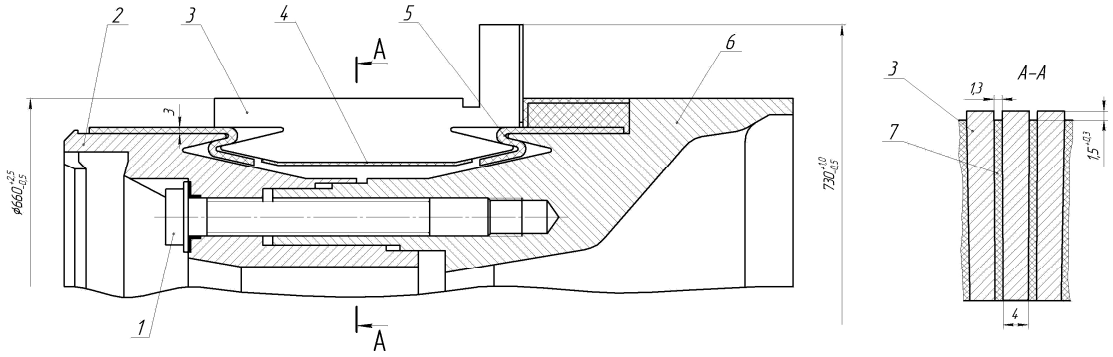


Рисунок 1 – Коллектор ТЭД ТЛ-2К1

Статистические данные, полученные из локомотивного ремонтного депо Тайга (таблица 1), показывают, что более 30 % от общего числа всех повреждений ТЭД связаны с повреждениями коллектора [2]. Так, за двенадцать месяцев 2008 г. в локомотивном депо Тайга при проведении ремонтов СР, ТР-3, ТР-2, ТР-1 и при заходе электровозов на неплановый ремонт было выявлено 256 случаев неисправности ТЭД (рисунок 2), причем 26 случаев из них связаны с выплавлением «петушков» коллекторных пластин, выявлен 51 случай биения коллектора, отмечено семь случаев задира коллектора.

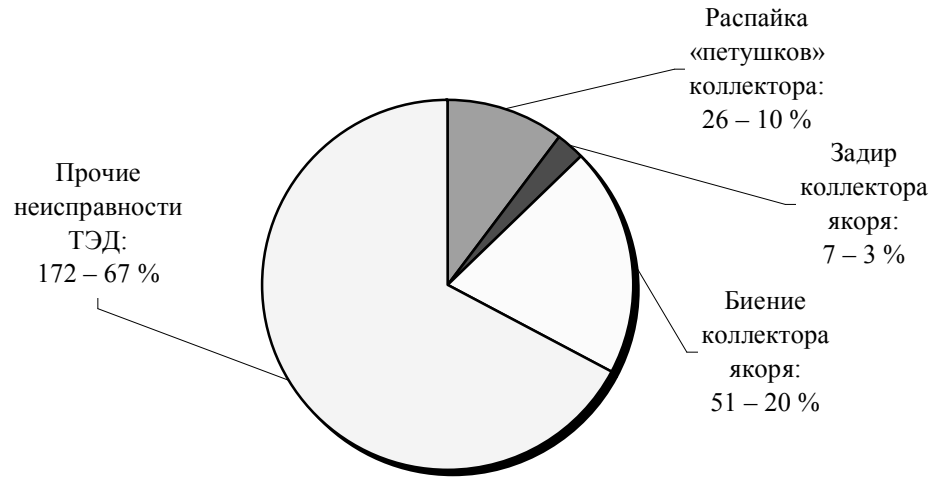
Таблица 1 – Неисправности ТЭД ТЛ-2К1

Наименование повреждения	Двенадцать месяцев (год)	
	2007	2008
Распайка «петушков» коллектора	22	26
Задир коллектора якоря	2	7
Биение коллектора якоря	54	51
Прочие неисправности *	149	172
Итого	227 (11,09)**	256 (12,69)

* – (размотка бандажа якоря, межвитковое замыкание обмотки якоря, пробой изоляции якоря, смазка в остове, пробой межкатушечных соединений, пробои изоляции обмотки главных полюсов, дополнительных полюсов и их выводов, неисправность якорных подшипников, повреждение выводных проводов, ослабление подшипниковых щитов);

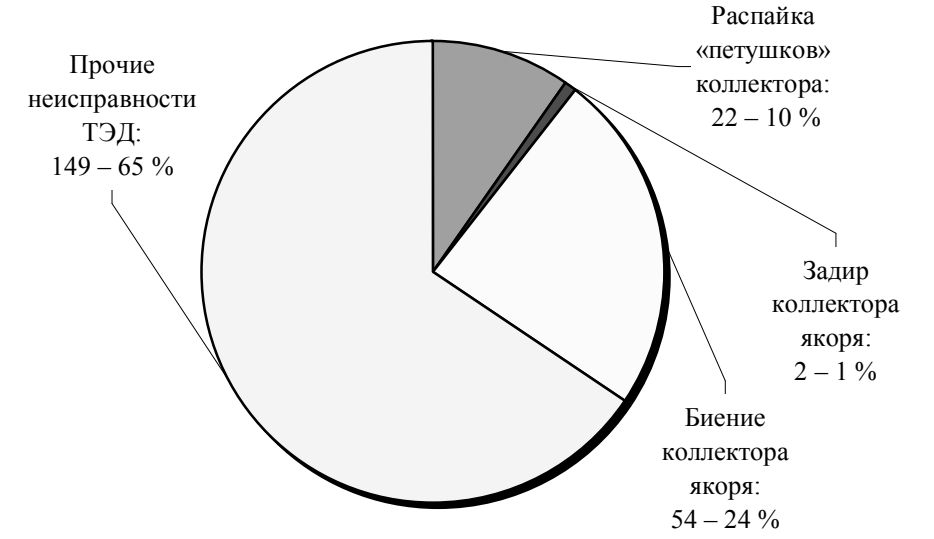
** – количество случаев неисправности ТЭД на 1 млн км пробега.

Можно отметить увеличение числа повреждений коллектора за 2008 г. по сравнению с 2007, сравнивая диаграммы на рисунках 2 и 3, – 84 повреждения коллектора в 2008 г. против 78 повреждений в 2007.



Всего неисправностей – 256 – 100 %

Рисунок 2 – Неисправности ТЭД ТЛ-2К1 за двенадцать месяцев 2008 г. –



Всего неисправностей – 227 – 100 %

Рисунок 3 – Неисправности ТЭД ТЛ-2К1 за двенадцать месяцев 2007 г.

Дефекты, возникающие в процессе эксплуатации:

выступание одной или группы коллекторных или миканитовых пластин, причина дефекта связана с собственной вибрацией ТЭД;

механический износ (царапины, выщербины, износ рабочей поверхности) может быть вызван попаданием пыли, абразивных частиц и частиц щеточного материала на рабочую поверхность коллектора;

подгар пластин коллектора, электроэрозионный износ, который может быть вызван повышенным искрением под щетками и возникновением кругового огня.

В процессе эксплуатации поверхность коллектора неравномерно изнашивается, на ней могут возникать задиры, величина биения коллектора может превышать допустимую норму. Иногда износ коллекторных пластин достигает такой величины, при котором миканитовые прокладки между пластинами и сами пластины оказываются на одном уровне.

Для выведения следов износа и восстановления правильной геометрической формы коллектор в условиях депо обтачивают.

Из-за конструктивной особенности коллектора (см. рисунок 1) его обработка представляет собой точение прерывистой поверхности, при которой режущий инструмент испытывает ударную нагрузку. Поэтому необходимо исследовать процесс обработки меди резанием, определить факторы, в значительной степени влияющие на качество обработанной поверхности, и оценить степень влияния этих факторов на качество рабочей поверхности после обточки.

Критерием, характеризующим качество рабочей поверхности коллектора, является шероховатость поверхности R_a, регламентированное значение данного параметра должно составлять 3 мкм.

На шероховатость поверхности влияют следующие факторы:

– геометрия режущего инструмента (углы в плане, радиус скругления режущей кромки при вершине резца, углы в главной секущей плоскости);

– материал режущего инструмента, от его качеств зависит стойкость инструмента;

– жесткость оборудования;

– режимы резания (скорость резания, величина подачи режущего инструмента, глубина резания).

После оценки указанных выше факторов выявлены факторы, в значительной степени оказывающие влияние на шероховатость рабочей поверхности коллектора после обточки – скорость резания, величина подачи, материал режущей части.

Для оценки влияния материала режущей части на шероховатость поверхности было проведено экспериментальное исследование, заключающееся в следующем: медный цилиндр марки М1 диаметром 28 мм обтачивался инструментами с режущей частью из различных инструментальных материалов (быстрорежущая сталь Р6М5, твердый сплав Т14К8 и синтетический алмаз типа «карбонадо»), с единой геометрией (главный угол резания $\gamma = 2°$, вспомогательный угол резания $\alpha = 13°$, главный угол в плане φ и вспомогательный φ_1 – 60°, радиус при вершине $r = 0{,}4$ мм), с едиными режимами резания (глубина резания $t = 0{,}25$ мм, подача $s = 0{,}1$ мм/об, скорость резания V, мм, варьировалась в процессе обработки). В результате эксперимента был построен график зависимости параметра шероховатости поверхности R_a от скорости резания (рисунок 4).

Согласно построенным графикам (см. рисунок 4) можно сделать вывод о том, что наилучшие результаты показал резец с режущей частью из синтетического алмаза. При увеличении скорости резания (см. рисунок 4, график 2) шероховатость поверхности снижается, процесс резания характеризуется стабильностью, с увеличением скорости резания в интервале значений от 60 м/мин шероховатость поверхности уменьшается незначительно.

Для оценки степени влияния режимов резания (скорости резания и подачи) на шероховатость поверхности была получена математическая модель с использованием композиционных планов второго порядка:

$$\hat{y} = 5,7 + 0,285x_1 + 3,196x_2 - 0,228x_1^2 + 0,317x_2^2 + 0,247x_1x_2\,, \qquad (1)$$

где x_1 – скорость резания V, м/мин; x_2 – величина подачи s, мм/об.

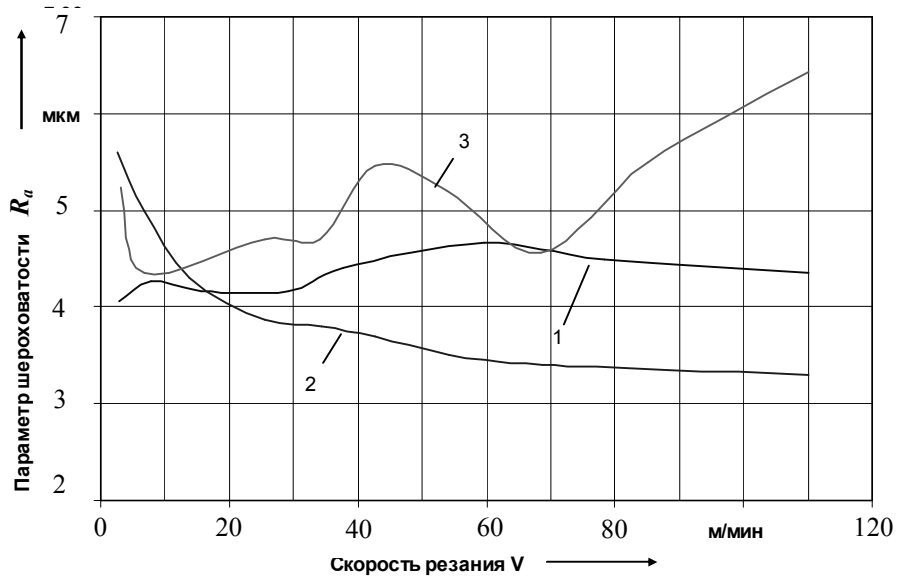


Рисунок 4 – Шероховатость поверхности после обработки: 1 – Т14К8; 2 – алмаз; 3 – Р6М5

Полученная модель оказалась адекватной, так как вычисленное значение критерия Фишера F = 5,43 оказалось меньше теоретического $F_{0,05;3;4} = 6,59$.

Для графической интерпретации полученной модели были построены поверхность и линии равного отклика с помощью программного средства Mathcad 14 (рисунки 5, 6).

Каждой точке линий равного отклика соответствуют режимы обточки коллектора, обеспечивающие заданную шероховатость в пределах исследуемых значений. Используя линии равного отклика, можно подобрать режимы, обеспечивающие минимальное значение R_a обрабатываемой поверхности. Для перехода от кодированных значений в натуральные используются выражения:

$$V = 60 + 30 \cdot x_1\,; \qquad (2)$$

$$s = 0,1 + 0,05 \cdot x_2\,. \qquad (3)$$

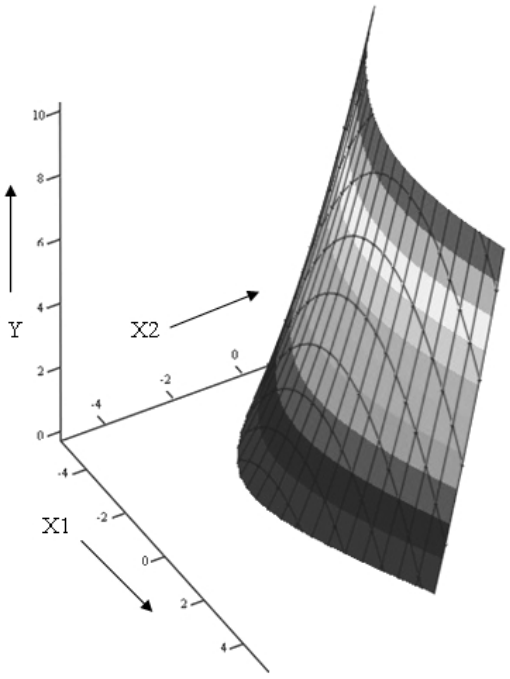


Рисунок 5 – Поверхность отклика

Для примера рассмотрим точки 1 и 2, которым соответствует заданная шероховатость $R_a = 3$ мкм (рисунок 6): координаты точки 1 – $x_1 = 0,7$; $x_2 = -0,9$. Подставляя указанные значения в выражения (2) и (3), получим: $V = 60 + 30 \cdot 0,7 = 81$ м/мин; $s = 0,1 - 0,05 \cdot 0,9 = 0,055$ мм/об; координаты точки 2 – $x_1 = -0,45$; $x_2 = -0,9$. $V = 60 - 30 \cdot 0,45 = 46,5$ м/мин; $s = 0,1 - 0,05 \cdot 0,9 = 0,055$ мм/об.

С точки зрения производительности при обточке коллектора точка 1 является более предпочтительной, так как при одной и той же величине подачи скорость резания во втором случае меньше, следовательно, и производительность ниже.

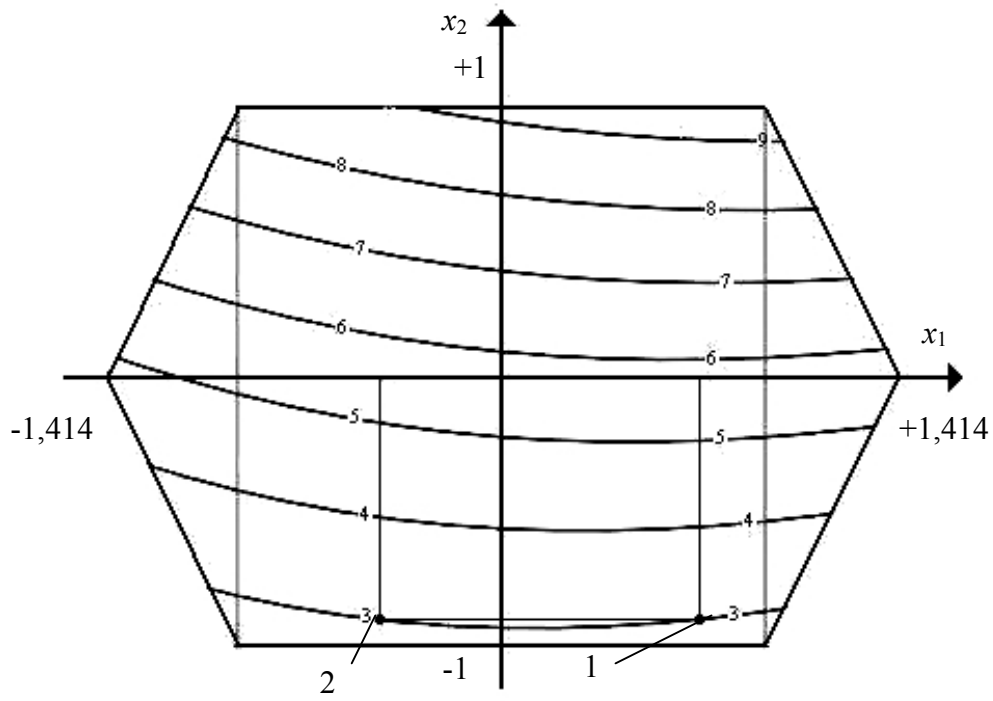


Рисунок 6 – Контурные кривые поверхности равного отклика

В результате исследования процесса механической обработки рабочей поверхности коллектора были выявлены факторы, в значительной степени влияющие на шероховатость поверхности коллектора, – материал режущей части инструмента, скорость резания и величина подачи. Была дана оценка влияния материала режущего инструмента на шероховатость, построены соответствующие зависимости параметра шероховатости R_a от скорости резания.

Лучшим среди используемых инструментальных материалов для обточки коллекторов признан синтетический алмаз типа «карбонадо». Также было оценено влияние скорости резания и величины подачи на шероховатость поверхности коллектора. Полученное уравнение регрессии можно применять для поиска рациональных режимов резания при механической обработке рабочей поверхности коллектора.

Список литературы

1. Тяговые электродвигатели электровозов [Текст] / В. И. Бочаров, В. И. Захаров, Л. Ф. Коломейцев и др.; Под ред. В. Г. Щербакова / Агентство «Наутилус». – Новочеркасск, 1998. – 672 с.

2. Петроченко, С. В. Анализ неисправностей коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей электровозов [Текст] / С. В. Петроченко, А. В. Солдаткин. // Теоретические знания – в практические дела: Сб. науч. ст. междунар. науч.-практ. конф. / Российский заочный ин-т текстильной и легкой промышленности. – Омск, 2008. – 205 с.

3. Правила ремонта электрических машин электроподвижного состава № ЦТ-ЦТВР-4782: утв. МПС Рос. Федерации 02.04.1990. М., 1992. 296 с.

4. Вульф, Л. М. Основы резания металлов [Текст] / Л. М. Вульф. Л.: Машгиз, 1954. – 327 с.

5. Спирин, Н. А. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента [Текст] / Н. А. Спирин, В. В. Лавров. / Уральский гос. техн. ун-т. – Екатеринбург, 2004.– 258 с.

6. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст] / Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 278 с.

УДК 621.336.7

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

ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗНОСА КОНТАКТНЫХ ПАР УСТРОЙСТВ ТОКОСЪЕМА МОНОРЕЛЬСОВОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

В статье представлены результаты экспериментальных исследований и расчета износа элементов системы токосъема монорельсового электрического транспорта.

В России в 2006 г. была введена в эксплуатацию первоочередная трасса Московской монорельсовой транспортной системы (ММТС) между станциями метро «Тимирязевская» и «Ботанический сад». Ведутся работы по созданию скоростных линий сообщением «город – аэропорт».

Наряду с основными функциональными узлами монорельсовой дороги – линейным двигателем, системой колесного опирания, системой подвеса, межвагонными тележками – большое значение имеет система токосъема, надежное функционирование которой во многом определяет работоспособность всей транспортной системы.

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС) с 1977 г. принимает участие во всех отечественных программах, связанных с теоретическими и экспериментальными исследованиями по совершенствованию и разработке новых вариантов токоприемников и токопроводов, в том числе для транспортных систем с жесткими токопроводами. В ОмГУПСе разработана методика исследования износа контактных пар устройств токосъема, которая реализуется лабораторным комплексом, включающим в себя специализированные установки возвратно-поступательного, вращательного и ударного типов. Лабораторный комплекс позволяет осуществлять износоусталостные испытания устройств токосъема магистрального и монорельсового электрического транспорта в соответствии с требованиями межгосударственного стандарта при изменении в широком диапазоне изгибной и контактной нагрузок с учетом протекания электрического тока в контакте. Конструктивные особенности комплекса позволяют моделировать в элементах системы циклические и контактные напряжения от нагрузки, соответствующей реальному режиму эксплуатации.

Установка возвратно-поступательного типа (рисунок 1) используется для исследования контактных пар со сложной геометрической поверхностью, характерных для систем токосъема монорельсового транспорта, и позволяет проводить исследование износа контактных элементов при условии протекания в зоне контакта как постоянного тока, так и переменного.

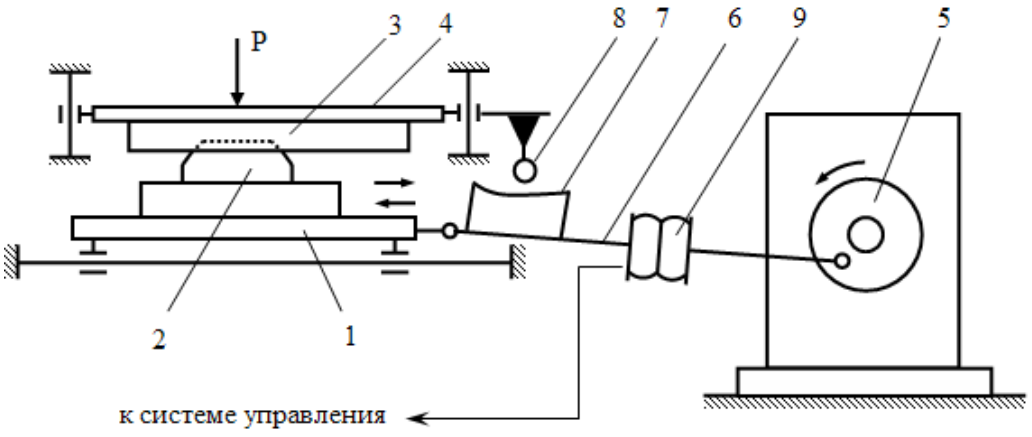


Рисунок 1 – Схема установки возвратно-поступательного типа

Механическая часть комплекса включает в себя станину, на которой установлены направляющие, сочлененные со скользунами и закрепленной на них подвижной кареткой 1. На каретке закреплен контактный элемент 2, взаимодействующий с токопроводом 3, закрепленным на изолировочной пластине 4. Возвратно-поступательное перемещение каретки 1 осуществляется приводом вращения 5, связанным тягой 6 с кареткой.

Кроме возвратно-поступательного движения установка позволяет проводить исследования при одностороннем движении, т. е. имитировать реальный процесс движения в одном направлении. Этот режим используется также при исследовании контактных пар из анизотропных материалов. Процесс движения в одну сторону реализуется с помощью копира 7, который устанавливается на тяге. При движении ролика 8 по поверхности копира токопровод поднимается и половину периода вращения привода элементы трибосистемы не взаимодействуют.

Для сокращения области неустойчивого скольжения при исследовании узла трения необходимо увеличивать диссипационные составляющие в нормальном и касательном направлениях к поверхностям трения. Конструктивные особенности установки позволяют учитывать влияние диссипационных составляющих. Диссипационные составляющие силы трения в нормальном направлении к поверхностям трения реализованы в установке пневматическим резинокордным элементом 9, вмонтированным в тягу 6 [2].

Методика испытаний, реализуемая на установке возвратно-поступательного типа, включает в себя варьирование следующих параметров для каждой пары контактных материалов: контактного давления; скорости движения элементов пары трения; режимов движения (возвратно-поступательное и однонаправленное); полярности и силы электрического тока; параметров окружающей среды (температуры, влажности, запыленности) и др. Результаты исследований представлены на рисунках 2 – 5.

Дальнейшие исследования контактных пар системы токосъема монорельсового транспорта выполнялись с использованием математических моделей. В соответствии с положениями теории подобия в один критерий были объединены следующие факторы: плотность, твердость, коэффициент линейного расширения, удельная теплоемкость, теплопроводность [3, 4]. В качестве значений этих параметров при моделировании процесса внешнего трения и изнашивания были использованы данные о материалах, использованных в эксперименте.

Метод отсеивания несущественных факторов позволил определить следующую группу факторов для составления модели: нагрузку на образец P, Н; радиус сферической поверхности r, м; скорость скольжения v, м/с; время испытания t, с; содержание меди в материале контактного элемента M, %; твердость материалов токопровода и контактного элемента H_1 и H_2; теплопроводность материала контактного элемента λ_1, Вт; удельную теплоемкость токопровода c_2, Вт. В качестве параметра оптимизации принят износ массы $И_m$.

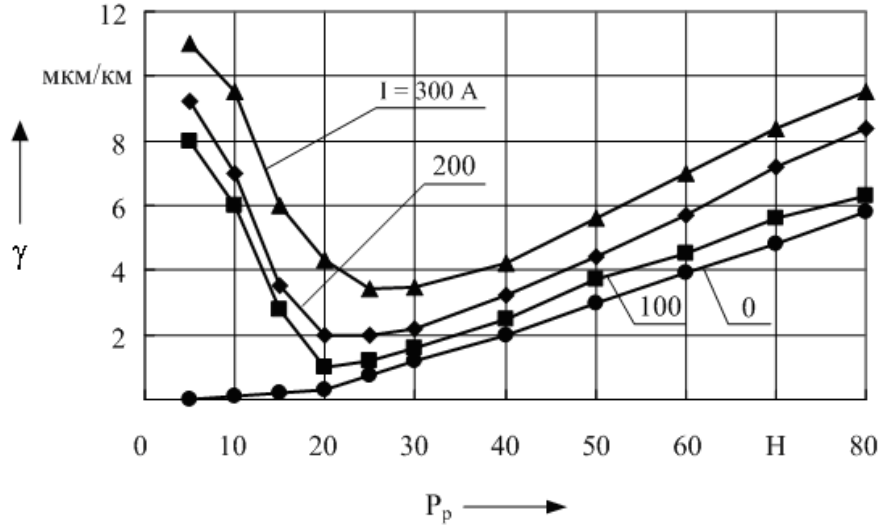


Рисунок 2 – Зависимость износа контактного элемента от силы тока в контакте

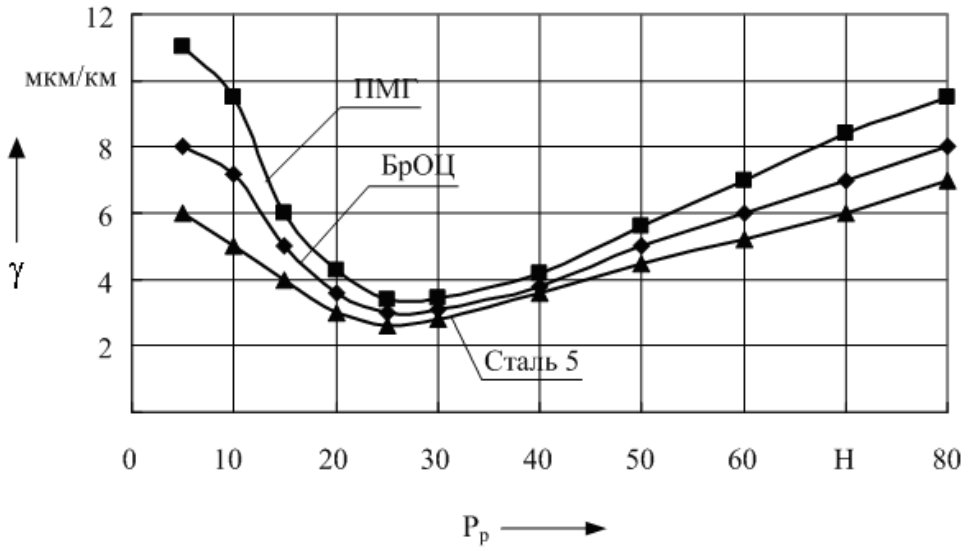


Рисунок 3 – Зависимость износа токосъемных контактных элементов из различных материалов от силы контактного нажатия

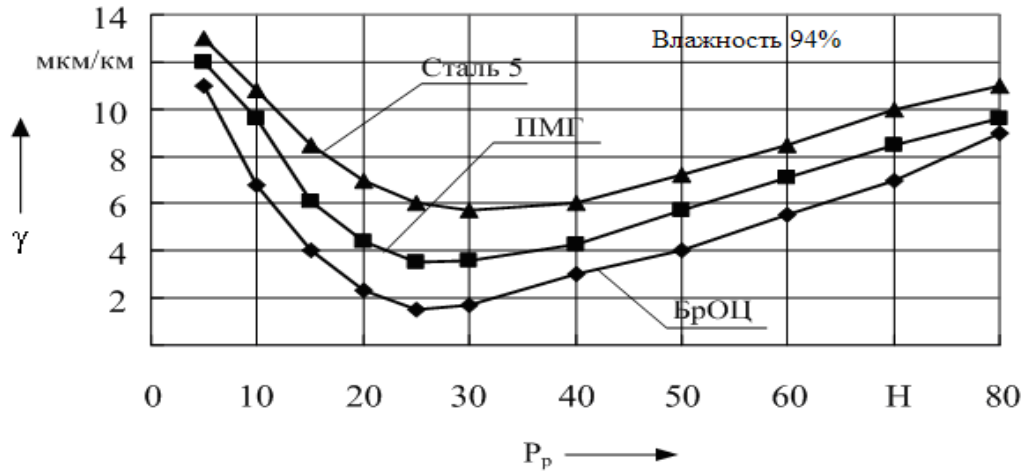


Рисунок 4 – Влияние на износ контактного элемента влажности окружающей среды

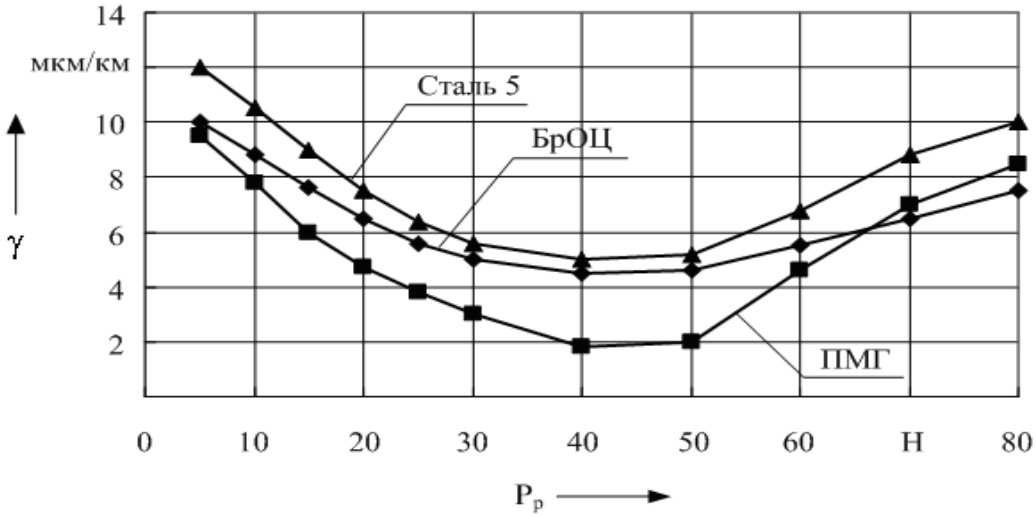


Рисунок 5 – Влияние на износ контактного элемента смены полярности тока в контакте

Функциональная зависимость между параметром оптимизации и факторами модели имеет вид:

$$И_m = \Psi_1(P; A; v; t; M; H_1/H_2; \lambda_1; c_2), \quad (1)$$

где H_1/H_2 – безразмерный симплекс.

В соответствии с положениями теории подобия получим уравнение подобия:

$$\frac{И_m}{P} = \psi_3\left[\left(\frac{Ptc_2}{r^2\lambda_1}\right)^{\alpha_m}\left(\frac{vt}{r}\right)^{\beta_m}(M)^{\gamma_m}\left(\frac{H_1}{H_2}\right)^{\varepsilon_m}\right]. \quad (2)$$

Из соотношения (2) получим расчетное уравнение:

$$\frac{И_m}{P} = a_0\left(\frac{Ptc_2}{r^2\lambda_1}\right)^{\alpha_m}\left(\frac{vt}{r}\right)^{\beta_m}(M)^{\gamma_m}\left(\frac{H_1}{H_2}\right)^{\varepsilon_m}, \quad (3)$$

где a_0 – постоянная, отражающая влияние на процесс неучтенных факторов;

$\alpha_m, \beta_m, \gamma_m, \varepsilon_m$ – коэффициенты, определяемые экспериментально;

$И_m/P$ – симплекс (отношение износа массы контактного элемента к давлению);

$\frac{Ptc_2}{r^2\lambda_1}$ – комплекс (мера отношения удельной мощности трения к способности токопровода накапливать, а контактного элемента – передавать тепло);

vt/r – отношение пути трения к радиусу контактного элемента.

Полученная модель использовалась при соблюдении условий подобия контактирования, нагружения и геометрической формы пары трения.

Расчетное уравнение (3) можно представить в виде:

$$y = a_0 X_1^{\alpha_m} X_2^{\beta_m} X_3^{\gamma_m} X_4^{\varepsilon_m}, \quad (4)$$

где X_1, X_2, X_3, X_4 – независимые переменные (факторы).

После логарифмирования уравнение (4) имеет вид:

$$\hat{y} = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4, \quad (5)$$

где $\hat{y}$ – оценка параметра оптимизации;

b_1, b_2, b_3, b_4 – оценки коэффициентов.

Для определения коэффициентов уравнения проведен полный факторный эксперимент в соответствии с матрицей планирования.

Для определения коэффициентов уравнения регрессии была использована формула:

$$b_i = \frac{1}{N}\sum_{u=1}^{N} X_{iu}\ \ln Y_{\text{iu}}, \quad (6)$$

где $i = 0...4$ – номер фактора;

$\ln Y_{iu}$ – отклик в опытах в точке u.

В результате вычислений получено уравнение:

$$\ln y = -8,376 + 0,425\ \ln X_1 - 0,694\ \ln X_2 + 0,53\ \ln X_3 + 0,769\ \ln X_4. \quad (7)$$

Статистический анализ оценки достоверности полученного уравнения подтвердил выполнение гипотезы адекватности модели.

Выполняем потенцирование уравнения (7):

$$И_m = P\left[e^{-8,376}\left(\frac{Ptc_2}{r^2\lambda_1}\right)^{0,425}\left(\frac{vt}{r}\right)^{-0,694}(M)^{0,53}\left(\frac{H_1}{H_2}\right)^{0,769}\right]. \quad (8)$$

На основании анализа уравнения (8) можно сделать вывод о том, что наиболее значительное влияние на параметр оптимизации оказывают механические свойства пары трения, а наименее значительный вклад в процесс изнашивания вносит параметр, учитывающий изменение нагрузки.

На рисунках 6 – 8 представлены зависимости износа контактного элемента, полученные на установке возвратно-поступательного типа, и результаты расчета. Экспериментальные и расчетные данные совпадают в области интенсивного механического износа, соответствующего диапазону контактного давления выше 30 Н.

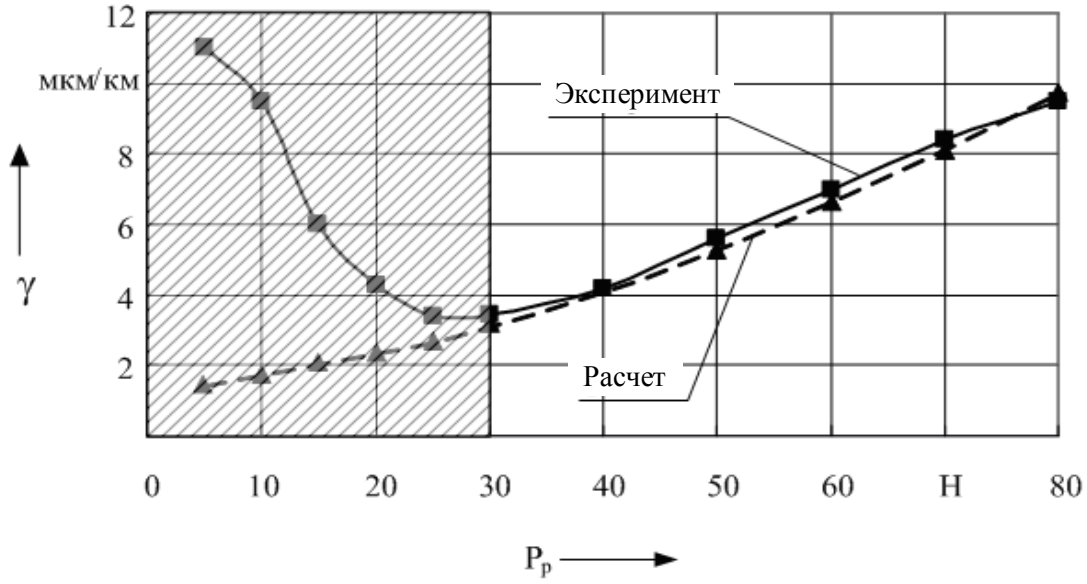


Рисунок 6 – Сравнение экспериментальных и расчетных данных для материала контактного элемента ПМГ

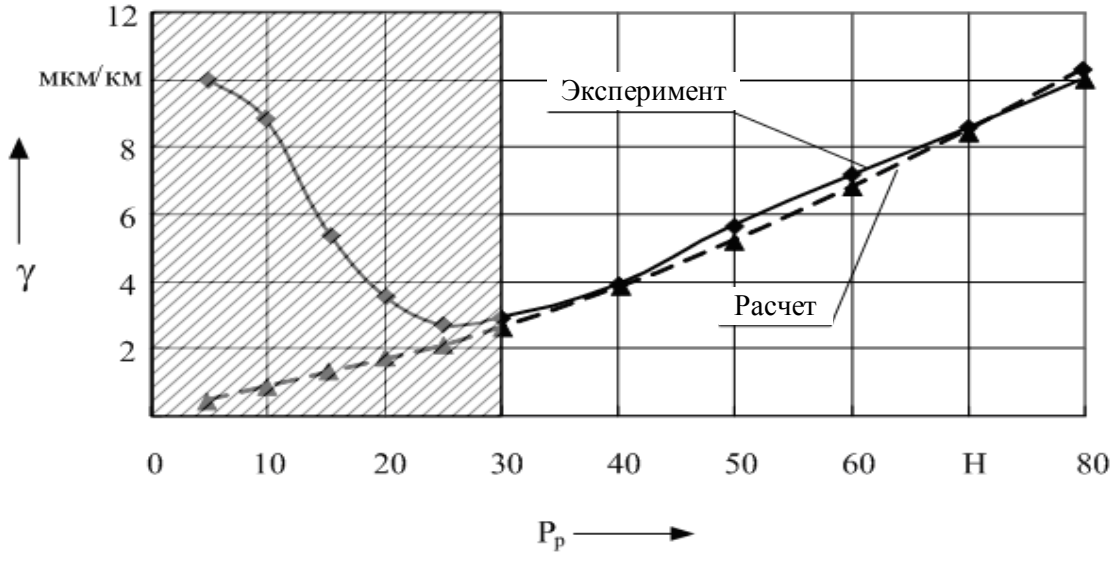


Рисунок 7 – Сравнение экспериментальных и расчетных данных для материала контактного элемента БрОЦ

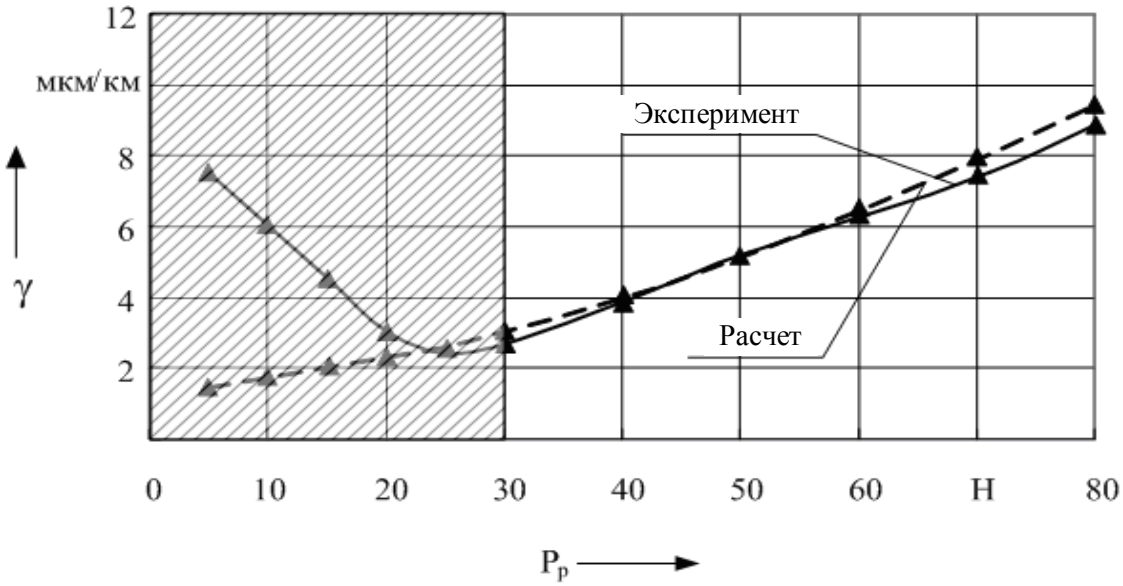


Рисунок 8 – Сравнение экспериментальных и расчетных данных для стального контактного элемента

Анализ графиков на рисунках 6 – 8 позволяет сделать вывод о том, что прогнозировать величину износа с помощью уравнения (9) с определенной долей вероятности можно для нажатий в диапазоне 40 Н и выше. Это связано с тем, что при уменьшении контактного нажатия возрастает вероятность отрывов и связанных с ним случаев искрообразования и электроэрозионного разрушения поверхностного слоя контактных материалов, а при увеличении выше 48 Н существенную роль играет механический износ, приводящий к истиранию контактного элемента токоприемника и токопровода.

Небольшие отклонения между кривыми связаны с тем, что по формуле (9) вычисляется механический износ, но при этом не учитывается негативное воздействие тока в контакте. Однако в ходе экспериментальных исследований на стенде в зоне скользящего контакта протекал ток, который при нажатиях свыше 50 Н также оказывал незначительное влияние на износ контактного элемента.

Таким образом, в ОмГУПСе разработана методика экспериментальных исследований износа контактных пар устройств токосъема монорельсового электрического транспорта. Результаты расчета износа контактных пар устройств токосъема на модели адекватны экспериментальным данным в области значений интенсивного механического износа.

Список литературы

1. Сидоров, О. А. Методы исследования износа контактных пар устройств токосъема монорельсового электрического транспорта [Текст]: Монография / О. А. Сидоров, С. А. Ступаков / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2009. – 155 с.

2. Пат. 82444 Рос. Федерация: МПК B 60 L 3/12. Устройство для исследования скользящего контакта между токоприемником и токопроводом [Текст] / Сидоров О. А., Ступаков С. А., Томилов В. В., Кутькин А. Н., Филиппов В. М.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – № 2008149393; заявл. 15.12.08; опубл. 27.04.09, Бюл. № 12.

3. Браун, Э. Д. Моделирование трения и изнашивания в машинах [Текст] / Э. Д. Браун, Ю. А. Евдокимов, А. В. Чичинадзе. – М. : Машиностроение, 1982. – 191 с.

4. Гаркунов, Д. Н. Триботехника [Текст]: Учебник / Д. Н. Гаркунов. – М.: Машиностроение, 1989. – 328 с.

УДК 621.316.97

В. А. Кандаев, Л. А. Карпова, К. В. Авдеева

ПОЛЕ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА ВБЛИЗИ СИСТЕМЫ ПРОВОДНИКОВ, РАСПОЛОЖЕННЫХ НА ПОВЕРХНОСТИ ОДНОРОДНОЙ ЗЕМЛИ

В статье изложен метод расчета распределения электрических величин в системе проводников, расположенных на поверхности однородной земли, в поле точечного источника. Если количество проводников больше одного, то расчет электрических величин в земле и проводниках осуществляется с использованием численных методов.

В настоящее время протяженность электрифицированных участков железных дорог превышает 43 тыс. км. Железнодорожный транспорт имеет развитую сеть кабельных линий электроснабжения, магистральных и местных линий связи, кабельных линий контроля и автоматики. Подземные коммуникации обеспечивают функционирование систем, их безопасное обслуживание и защиту этих систем в условиях грозовых разрядов и токов короткого замыкания как ЛЭП высокого напряжения, так и тягового электроснабжения.

Задачи, связанные с определением поля точечного источника, на практике встречаются довольно часто и не вызывают особых затруднений, если в поле этого источника отсутствуют протяженные подземные или наземные сооружения с параметрами, распределенными по длине. К таким сооружениям относятся подземные кабельные линии всех назначений, подземные и наземные трубопроводы с наличием изолирующего покрытия и без него, рельсовые сети железнодорожного и городского транспорта.

В качестве точечного источника можно рассматривать место удара молнии в непосредственной близости от названных сооружений, если отсутствует электрический пробой грунта, или место повреждения кабеля относительно земли, в этом случае поврежденное место можно рассматривать как точечный источник, с которого ток стекает в окружающую среду.

Аналитический расчет электрических величин в земле и подземных или наземных сооружениях сопряжен со значительными трудностями, поскольку представляет собой трехмерную задачу с граничными условиями, которые не полностью определены в данной системе.

Решение можно получить через известные специальные функции [1] для самого простого случая, когда имеется протяженное сооружение и источник. Более сложные варианты решаются с помощью численных методов.

Задачу решим для сооружения, расположенного на поверхности земли, и для четырех сооружений, имитирующих двухпутную железную дорогу.

Точечный источник, с которого стекает ток I_0, находится на глубине h в однородной земле с удельным сопротивлением ρ. Протяженное сооружение бесконечной длины (одиночный рельс) с эквивалентным радиусом a_0 и погонным сопротивлением R расположено на поверхности земли и имеет тонкое изолирующее покрытие, сопротивление которого равно $R_и$ (рисунок 1).

Необходимо определить ток в проводнике $I(x)$, плотность тока утечки с проводника $j(x)$, а также распределение потенциалов проводника и земли, если известен ток, стекающий с точечного источника.

Потенциал любой точки среды, например точки $M(x,y,z)$ на рисунке 1,

$$\varphi_з = \varphi_0 + \varphi_{пр}, \qquad (1)$$

где φ_0 – потенциал, создаваемый током точечного источника,

$\varphi_{пр}$ – потенциал, обусловленный током утечки с проводника, расположенного на поверхности среды.

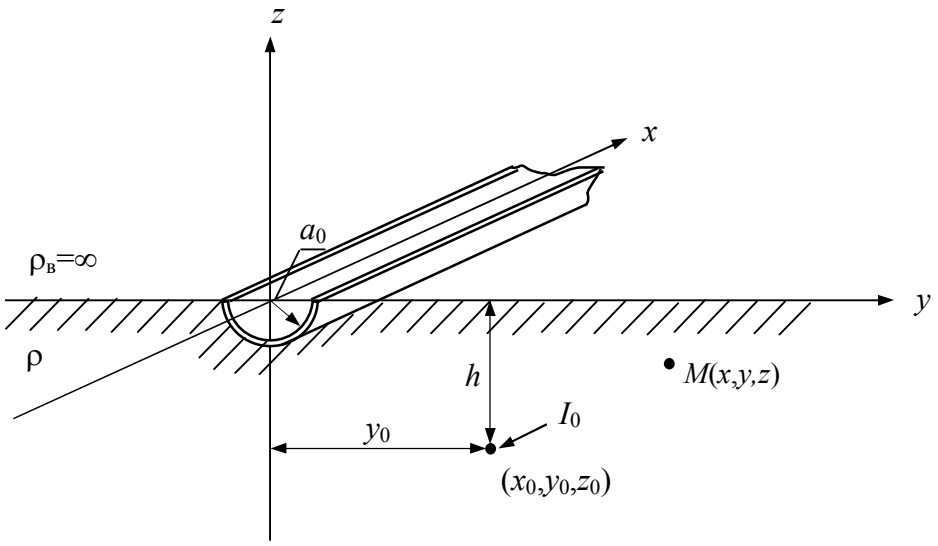


Рисунок 1 – Схема для расчета распределения электрических величин проводника, расположенного на поверхности однородной земли, в поле точечного источника

Из работы [1] известно, что ток утечки с протяженного проводника, расположенного на поверхности среды, $j(x)$ приводит к появлению в среде потенциала:

$$\varphi_{\text{пр}}(x,y,z)=\frac{\rho}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} j(\xi)\frac{\mathrm{d}\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2+r^2}}, \tag{2}$$

где $r=\sqrt{y^2+z^2}$.

Потенциал, создаваемый током точечного источника,

$$\varphi_0(x,y,z)=\frac{\rho I_0}{2\pi\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2}}. \tag{3}$$

Используя формулы (2) и (3), найдем потенциал проводника, расположенного на поверхности среды, по отношению к удаленной земле:

$$\varphi_1(x)=\frac{\rho I_0}{2\pi\sqrt{x^2+r_0^2}}+R_{\text{и}}j(x)+\frac{\rho}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} j(\xi)\frac{\mathrm{d}\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2+a_0^2}}, \tag{4}$$

где $r_0=\sqrt{y_0^2+h^2}$.

Так как потенциалы и токи в рассматриваемой системе проводников удовлетворяют равенству:

$$\frac{\mathrm{d}\varphi_1(x)}{\mathrm{d}x}=-RI(x). \tag{5}$$

Подставив в выражение (5) значения $\varphi_1(x)$, получим интегродифференциальное уравнение, описывающее распределение тока в проводнике, лежащем на поверхности среды:

$$-RI(x)=\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}\left\{\frac{\rho I_0}{2\pi\sqrt{x^2+r_0^2}}\right\}+R_{\text{и}}j'(x)+\frac{\rho}{2\pi}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}\left\{\int_{-\infty}^{\infty} j(\xi)\frac{\mathrm{d}\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2+a_0^2}}\right\}. \tag{6}$$

Для решения уравнения (6) воспользуемся преобразованием Фурье. Введем следующее обозначение:

$$\int_{-\infty}^{\infty} I(x)e^{i\omega x}\mathrm{d}x=I(\omega). \tag{7}$$

Учитывая, что $j(x) = -I'(x)$, а также свойства преобразования Фурье:

$$\text{если } \int_{-\infty}^{\infty} F(x)e^{i\omega x}\mathrm{d}x = f(\omega), \text{ то } \int_{-\infty}^{\infty}\left\{\frac{F(x)}{\mathrm{d}x}\right\}\mathrm{e}^{i\omega x}\mathrm{d}x = -i\omega f(\omega); \tag{8}$$

$$-RI(\omega) = -i\omega\frac{\rho I_0 K_0\left[r_0|\omega|\right]}{\pi} + \omega^2 R_{\text{и}} I(\omega) + \frac{\omega^2\rho}{\pi} I(\omega)K_0\left[a_0|\omega|\right], \tag{9}$$

где K_0 – функция Макдональда нулевого порядка [2],
получим уравнение:

$$-RI(\omega) = -i\omega\frac{\rho I_0 K_0\left[r_0|\omega|\right]}{\pi} + \omega^2 R_{\text{и}} I(\omega) + \frac{\omega^2\rho}{\pi} I(\omega)K_0\left[a_0|\omega|\right]. \tag{10}$$

Переходное сопротивление определяется по выражению [1]:

$$R_{\text{п}} = R_{\text{и}} + \frac{\rho}{\pi}K_0\left[a_0|\omega|\right], \tag{11}$$

а коэффициента утечки –

$$\alpha_0 = \sqrt{\frac{R}{R_{\text{п}}}}, \tag{12}$$

отсюда получим:

$$I(\omega) = \frac{i\omega\rho I_0 K_0\left[r_0|\omega|\right]}{\pi R_{\text{п}}\left(\omega^2 + {\alpha_0}^2\right)}. \tag{13}$$

Взяв обратное преобразование Фурье, определяем ток в проводнике, расположенном на поверхности земли:

$$I(x) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} I(\omega)e^{-i\omega x}\mathrm{d}\omega = \frac{i\rho I_0}{2\pi^2 R_{\text{п}}}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\omega\cdot K_0\left[r_0|\omega|\right]}{\left(\omega^2 + {\alpha_0}^2\right)}e^{-i\omega x}\mathrm{d}\omega. \tag{14}$$

Если учесть, что

$$\int_{-\infty}^{\infty}\frac{e^{i\omega t}\mathrm{d}t}{\sqrt{t^2 + a^2}} = 2K_0\left[a|\omega|\right], \tag{15}$$

получим:

$$I(x) = \frac{i\rho I_0}{4\pi^2 R_{\text{п}}}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\mathrm{d}t}{\sqrt{t^2 + {r_0}^2}}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\omega\cdot e^{i\omega(t-x)}}{\left(\omega^2 + {\alpha_0}^2\right)}\mathrm{d}\omega. \tag{16}$$

Согласно [1] $\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\omega e^{i\omega(t-x)}}{\left(\omega^2 + {\alpha_0}^2\right)}\mathrm{d}\omega = \pi i\frac{t-x}{|t-x|}e^{-\alpha_0|t-x|}$, тогда

$$I(x) = \frac{-\rho I_0}{4\pi R_{\text{п}}}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{t-x}{|t-x|}\frac{e^{-\alpha_0|t-x|}}{\sqrt{t^2 + {r_0}^2}}\mathrm{d}t. \tag{17}$$

Учитывая, что $\int_{-\infty}^{\infty}\frac{t-x}{|t-x|}\frac{e^{-\alpha_0|t-x|}}{\sqrt{t^2 + {r_0}^2}}\mathrm{d}t = -2\Psi_{[\alpha_0 x,\ \alpha_0 r_0]}$, получаем:

$$I(x) = \frac{\rho I_0}{2\pi R_{\text{п}}} \Psi_{[\alpha_0 x,\, \alpha_0 r_0]}, \tag{18}$$

где $\Psi_{[\alpha_0 x,\, \alpha_0 r_0]}$ - специальная функция двух переменных, табулированная в работе [1].

$\Psi_{[\alpha_0 x,\, \alpha_0 r_0]} = \frac{1}{2}\left\{ e^{-\alpha_0 x} \Phi_{[\alpha_0 x,\, \alpha_0 r_0]} - e^{\alpha_0 x} \Phi_{[-\alpha_0 x, \alpha_0 r_0]} \right\}$, причем $\Phi_{[\alpha_0 x, \alpha_0 r_0]} = \int\limits_{-\alpha_0 x}^{\infty} \frac{e^{-t}\,\mathrm{d}t}{\sqrt{(\alpha_0 r_0)^2 + t^2}}$.

Плотность тока утечки с проводника, расположенного на поверхности земли,

$$j(x) = -\frac{\mathrm{d}I(x)}{\mathrm{d}x}. \tag{19}$$

Так как $\frac{\partial \Psi_{[\alpha_0 x,\, \alpha_0 r_0]}}{\partial x} = \alpha_0 \left(-\Omega_{[\alpha_0 x,\, \alpha_0 r_0]} + \frac{1}{\sqrt{(\alpha_0 x)^2 + (\alpha_0 r_0)^2}} \right)$,

где $\Omega_{[\alpha_0 x,\, \alpha_0 r_0]} = \frac{1}{2}\left\{ \mathrm{e}^{-\alpha_0 x} \Phi_{[\alpha_0 x, \alpha_0 r_0]} + e^{\alpha_0 x} \Phi_{[-\alpha_0 x, \alpha_0 r_0]} \right\}$,

$$j(x) = \frac{\rho I_0 \alpha_0}{2\pi R_{\text{п}}} \left[\Omega_{[\alpha_0 x,\, \alpha_0 r_0]} - \frac{1}{\sqrt{(\alpha_0 x)^2 + (\alpha_0 r_0)^2}} \right]. \tag{20}$$

Потенциал проводника, расположенного на поверхности земли, найдем из соотношения:

$$\frac{\mathrm{d}\varphi_1(x)}{\mathrm{d}x} = -RI(x). \tag{21}$$

Приняв $\varphi_1(\infty) = 0$, получим:

$$\varphi_1(x) = -R \int\limits_{-\infty}^{x} I(x)\mathrm{d}x = \frac{-\rho I_0 R}{2\pi R_{\text{п}}} \int\limits_{-\infty}^{x} \Psi_{[\alpha_0 x,\, \alpha_0 r_0]} \mathrm{d}x = \frac{-\rho I_0 {\alpha_0}^2}{2\pi} \int\limits_{-\infty}^{x} \Psi_{[\alpha_0 x,\, \alpha_0 r_0]} \mathrm{d}x. \tag{22}$$

Согласно выводам в работе [1] $\frac{\partial \Omega_{[u,v]}}{\partial u} = -\Psi_{[u,v]}$, тогда

$$\varphi_1(x) = \frac{\rho I_0 \alpha_0}{2\pi} \Omega_{[\alpha_0 x,\, \alpha_0 r_0]}. \tag{23}$$

На рисунках 2 – 4 показаны распределение тока, плотности тока утечки и потенциал по отношению к удаленной земле в проводнике, расположенном на поверхности однородной земли с удельным сопротивлением ρ = 50 Ом·м при $\alpha_0 = 3{,}1 \cdot 10^{-4}$ 1/м, $y_0 = 3$ м, $h = 0{,}5$ м, $I_0 = 0{,}1$ А.

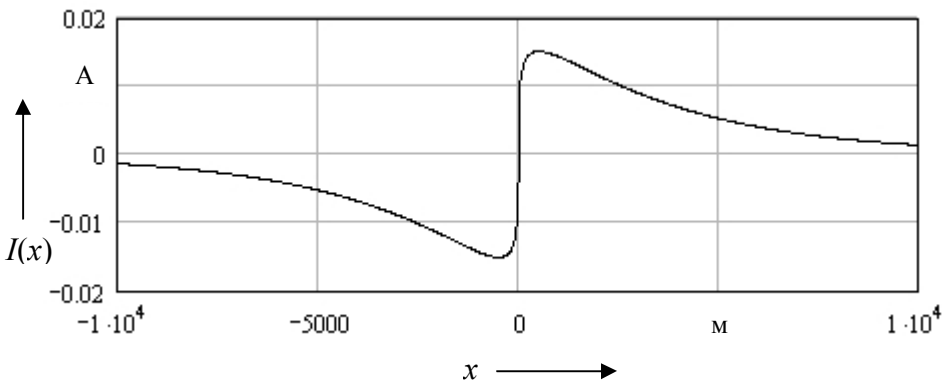


Рисунок 2 – Распределение тока в проводнике, расположенном на поверхности однородной земли

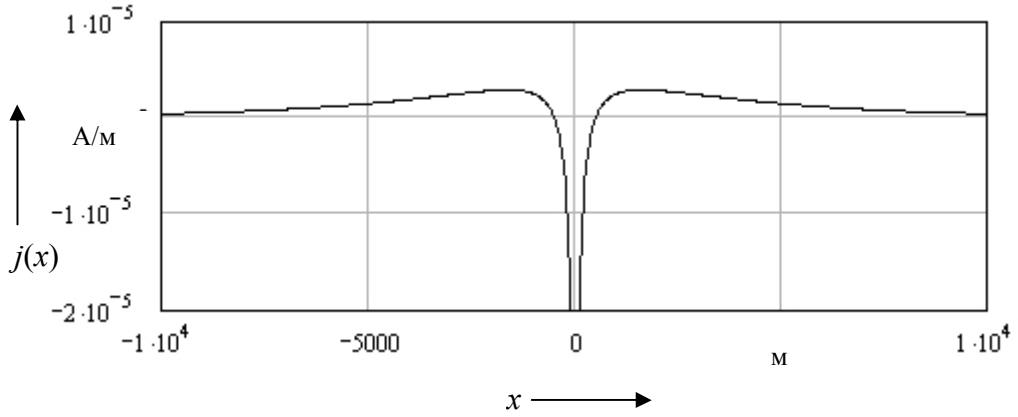


Рисунок 3 – Распределение плотности тока утечки с проводника, расположенного на поверхности однородной земли

Потенциал в среде вычисляется по формуле (1). На рисунке 5 приведены кривые распределения потенциала поверхности земли $\varphi_з$ при $x = 0$ от тока, стекающего с точечного источника, при наличии и в отсутствии проводника, расположенного на поверхности земли.

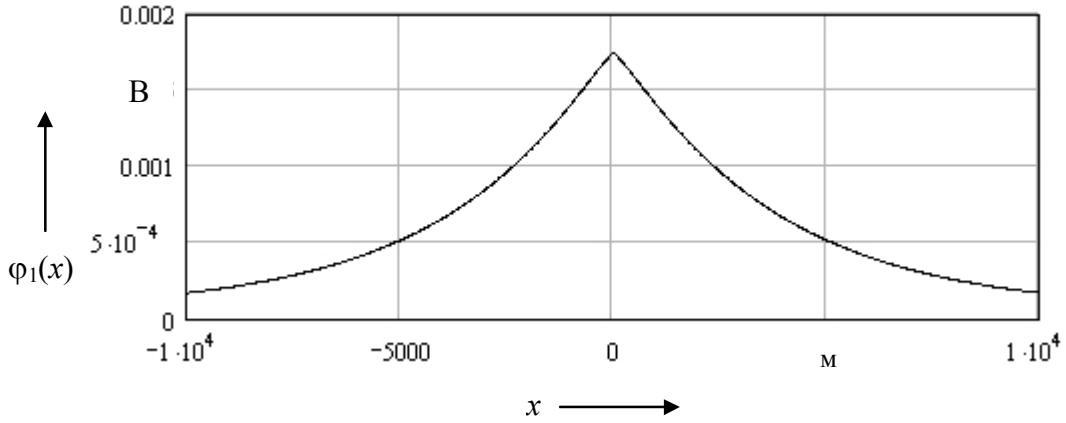


Рисунок 4 – Распределение потенциала проводника

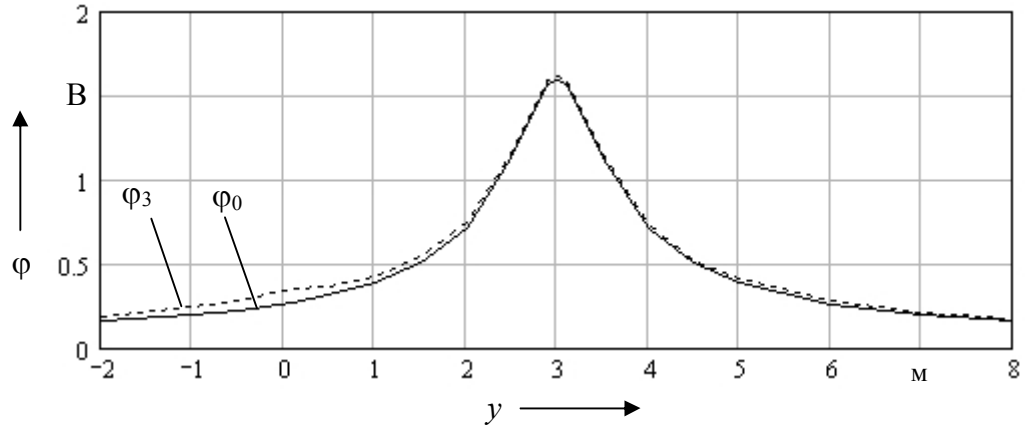


Рисунок 5 – Распределение потенциала поверхности земли

Рассмотрим более сложную задачу. Четыре одинаковых прямолинейных проводника бесконечной длины с радиусом a_0 и погонным сопротивлением R расположены вдоль оси OX (рисунок 6) и наполовину погружены в однородную среду (землю) с удельным сопротивлением ρ. Между каждым проводником и средой имеется изолирующий слой, сопротивление

которого равно $R_и$. На расстоянии y_0 по оси OY и на глубине $h = z_0$ находится точечный источник тока I_0. Ток, стекающий с точечного источника, создает потенциальное поле в среде, которое возбуждает в проводниках, расположенных на поверхности среды, токи I_1, I_2, I_3 и I_4 соответственно. При этом линейная плотность утечки с проводников – j_1, j_2, j_3 и j_4. Необходимо найти распределение токов I_1, I_2, I_3 и I_4, линейной плотности токов утечки j_1, j_2, j_3 и j_4, а также потенциалов в проводниках и в среде, если известен ток точечного источника I_0.

Потенциал любой точки среды, например точки $M(x,y,z)$ на рисунке 6,

$$\varphi_з = \varphi_0 + \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4, \tag{24}$$

где φ_0 – потенциал, создаваемый током точечного источника, вычисляемый по формуле (3);

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ – потенциалы, обусловленные токами утечки с проводников, расположенных на поверхности среды, определяемые по формуле (2).

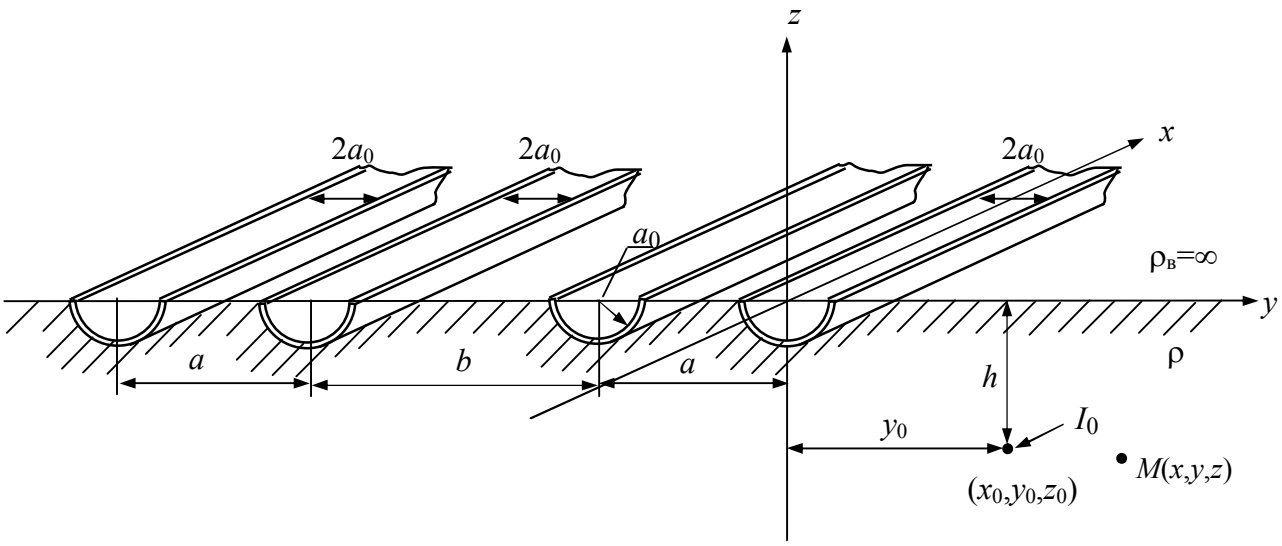


Рисунок 6 – Схема для расчета распределения электрических величин в системе проводников, расположенных на поверхности однородной земли, в поле точечного источника

Используя формулы (2) и (3), найдем потенциалы проводников, расположенных на поверхности среды, по отношению к удаленной земле:

$$\varphi_1(x) = \frac{\rho I_0}{2\pi\sqrt{x^2 + {r_{01}}^2}} + R_и j_1(x) + \frac{\rho}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} j_1(\xi)\frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2 + {a_0}^2}} + \frac{\rho}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} j_2(\xi)\frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2 + a^2}} +$$

$$+ \frac{\rho}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} j_3(\xi)\frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2 + (a+b)^2}} + \frac{\rho}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} j_4(\xi)\frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2 + (2a+b)^2}}; \tag{25}$$

$$\varphi_2(x) = \frac{\rho I_0}{2\pi\sqrt{x^2 + {r_{02}}^2}} + R_и j_2(x) + \frac{\rho}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} j_1(\xi)\frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2 + a^2}} + \frac{\rho}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} j_2(\xi)\frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2 + {a_0}^2}} +$$

$$+ \frac{\rho}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} j_3(\xi)\frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2 + b^2}} + \frac{\rho}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} j_4(\xi)\frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2 + (a+b)^2}}; \tag{26}$$

$$\varphi_3(x) = \frac{\rho I_0}{2\pi\sqrt{x^2 + {r_{03}}^2}} + R_и j_3(x) + \frac{\rho}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} j_1(\xi)\frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2 + (a+b)^2}} + \frac{\rho}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} j_2(\xi)\frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2 + b^2}} +$$

$$+\frac{\rho}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} j_3(\xi)\frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2+a_0^{\,2}}}+\frac{\rho}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} j_4(\xi)\frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2+a^2}}; \qquad (27)$$

$$\varphi_4(x)=\frac{\rho I_0}{2\pi\sqrt{x^2+r_{04}^{\,2}}}+R_{\text{и}}j_4(x)+\frac{\rho}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} j_1(\xi)\frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2+(2a+b)^2}}+\frac{\rho}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} j_2(\xi)\frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2+(a+b)^2}}+$$
$$+\frac{\rho}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} j_3(\xi)\frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2+a^2}}+\frac{\rho}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} j_4(\xi)\frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2+a_0^{\,2}}}; \qquad (28)$$

где $r_{01}=\sqrt{y_0^{\,2}+h^2}$; $r_{02}=\sqrt{(y_0+a)^2+h^2}$; $r_{03}=\sqrt{(y_0+a+b)^2+h^2}$; $r_{04}=\sqrt{(y_0+2a+b)^2+h^2}$.

Так как рассматриваемая система линейна, то справедливы выражения:

$$\frac{d\varphi_1(x)}{dx}=-RI_1(x);\ \frac{d\varphi_2(x)}{dx}=-RI_2(x);\ \frac{d\varphi_3(x)}{dx}=-RI_3(x);\ \frac{d\varphi_4(x)}{dx}=-RI_4(x). \qquad (29)$$

Подставив в уравнения (29) значения $\varphi_1(x)$, $\varphi_2(x)$, $\varphi_3(x)$, $\varphi_4(x)$ из формул (25) – (28), получим систему интегродифференциальных уравнений, описывающих распределение токов в проводниках, лежащих на поверхности среды:

$$\begin{cases}
-RI_1(x)=\dfrac{d}{dx}\left\{\dfrac{\rho I_0}{2\pi\sqrt{x^2+r_{01}^{\,2}}}\right\}+R_{\text{и}}j_1'(x)+\dfrac{\rho}{2\pi}\dfrac{d}{dx}\left\{\displaystyle\int_{-\infty}^{\infty} j_1(\xi)\frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2+a_0^{\,2}}}+\right.\\
\left.+\displaystyle\int_{-\infty}^{\infty} j_2(\xi)\frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2+a^2}}+\int_{-\infty}^{\infty} j_3(\xi)\frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2+(a+b)^2}}+\int_{-\infty}^{\infty} j_4(\xi)\frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2+(2a+b)^2}}\right\};\\
-RI_2(x)=\dfrac{d}{dx}\left\{\dfrac{\rho I_0}{2\pi\sqrt{x^2+r_{02}^{\,2}}}\right\}+R_{\text{и}}j_2'(x)+\dfrac{\rho}{2\pi}\dfrac{d}{dx}\left\{\displaystyle\int_{-\infty}^{\infty} j_1(\xi)\frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2+a^2}}+\right.\\
\left.+\displaystyle\int_{-\infty}^{\infty} j_2(\xi)\frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2+a_0^{\,2}}}+\int_{-\infty}^{\infty} j_3(\xi)\frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2+b^2}}+\int_{-\infty}^{\infty} j_4(\xi)\frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2+(a+b)^2}}\right\};\\
-RI_3(x)=\dfrac{d}{dx}\left\{\dfrac{\rho I_0}{2\pi\sqrt{x^2+r_{03}^{\,2}}}\right\}+R_{\text{и}}j_3'(x)+\dfrac{\rho}{2\pi}\dfrac{d}{dx}\left\{\displaystyle\int_{-\infty}^{\infty} j_1(\xi)\frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2+(a+b)^2}}+\right.\\
\left.+\displaystyle\int_{-\infty}^{\infty} j_2(\xi)\frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2+b^2}}+\int_{-\infty}^{\infty} j_3(\xi)\frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2+a_0^{\,2}}}+\int_{-\infty}^{\infty} j_4(\xi)\frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2+a^2}}\right\};\\
-RI_4(x)=\dfrac{d}{dx}\left\{\dfrac{\rho I_0}{2\pi\sqrt{x^2+r_{04}^{\,2}}}\right\}+R_{\text{и}}j_4'(x)+\dfrac{\rho}{2\pi}\dfrac{d}{dx}\left\{\displaystyle\int_{-\infty}^{\infty} j_1(\xi)\frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2+(2a+b)^2}}+\right.\\
\left.+\displaystyle\int_{-\infty}^{\infty} j_2(\xi)\frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2+(a+b)^2}}+\int_{-\infty}^{\infty} j_3(\xi)\frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2+a^2}}+\int_{-\infty}^{\infty} j_4(\xi)\frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2+a_0^{\,2}}}\right\}.
\end{cases} \qquad (30)$$

Для решения системы уравнений (30) воспользуемся преобразованием Фурье. Обозначим спектры функций: $\int_{-\infty}^{\infty} I_1(x)e^{i\omega x}dx=I_1(\omega)$; $\int_{-\infty}^{\infty} I_2(x)e^{i\omega x}dx=I_2(\omega)$; $\int_{-\infty}^{\infty} I_3(x)e^{i\omega x}dx=I_3(\omega)$; $\int_{-\infty}^{\infty} I_4(x)e^{i\omega x}dx=I_4(\omega)$.

С учетом выражений (8) и (9) получим систему алгебраических уравнений относительно спектров токов:

$$\begin{cases} -RI_1(\omega) = -i\omega\dfrac{\rho I_0 K_0\left[r_{01}|\omega|\right]}{\pi} + \omega^2 R_и I_1(\omega) + \dfrac{\omega^2\rho}{\pi}\Big\{I_1(\omega)K_0\left[a_0|\omega|\right] + \\ +I_2(\omega)K_0\left[a|\omega|\right] + I_3(\omega)K_0\left[(a+b)|\omega|\right] + I_4(\omega)K_0\left[(2a+b)|\omega|\right]\Big\}; \\ -RI_2(\omega) = -i\omega\dfrac{\rho I_0 K_0\left[r_{02}|\omega|\right]}{\pi} + \omega^2 R_и I_2(\omega) + \dfrac{\omega^2\rho}{\pi}\Big\{I_1(\omega)K_0\left[a|\omega|\right] + \\ +I_2(\omega)K_0\left[a_0|\omega|\right] + I_3(\omega)K_0\left[b|\omega|\right] + I_4(\omega)K_0\left[(a+b)|\omega|\right]\Big\}; \\ -RI_3(\omega) = -i\omega\dfrac{\rho I_0 K_0\left[r_{03}|\omega|\right]}{\pi} + \omega^2 R_и I_3(\omega) + \dfrac{\omega^2\rho}{\pi}\Big\{I_1(\omega)K_0\left[(a+b)|\omega|\right] + \\ +I_2(\omega)K_0\left[b|\omega|\right] + I_3(\omega)K_0\left[(a_0)|\omega|\right] + I_4(\omega)K_0\left[a|\omega|\right]\Big\}; \\ -RI_4(\omega) = -i\omega\dfrac{\rho I_0 K_0\left[r_{04}|\omega|\right]}{\pi} + \omega^2 R_и I_4(\omega) + \dfrac{\omega^2\rho}{\pi}\Big\{I_1(\omega)K_0\left[(2a+b)|\omega|\right] + \\ +I_2(\omega)K_0\left[(a+b)|\omega|\right] + I_3(\omega)K_0\left[a|\omega|\right] + I_4(\omega)K_0\left[a_0|\omega|\right]\Big\}. \end{cases} \quad (31)$$

С учетом выражений (11) и (12) система (31) будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} I_1(\omega) = \dfrac{i\omega\cdot\rho I_0 K_0\left[r_{01}|\omega|\right] - \omega^2\rho\left\{I_2(\omega)K_0\left[a|\omega|\right] + I_3(\omega)K_0\left[(a+b)|\omega|\right] + I_4(\omega)K_0\left[(2a+b)|\omega|\right]\right\}}{\pi R_п\left(\omega^2 + \alpha_0{}^2\right)}; \\ I_2(\omega) = \dfrac{i\omega\cdot\rho I_0 K_0\left[r_{02}|\omega|\right] - \omega^2\rho\left\{I_1(\omega)K_0\left[a|\omega|\right] + I_3(\omega)K_0\left[b|\omega|\right] + I_4(\omega)K_0\left[(a+b)|\omega|\right]\right\}}{\pi R_п\left(\omega^2 + \alpha_0{}^2\right)}; \\ I_3(\omega) = \dfrac{i\omega\cdot\rho I_0 K_0\left[r_{03}|\omega|\right] - \omega^2\rho\left\{I_1(\omega)K_0\left[(a+b)|\omega|\right] + I_2(\omega)K_0\left[b|\omega|\right] + I_4(\omega)K_0\left[a|\omega|\right]\right\}}{\pi R_п\left(\omega^2 + \alpha_0{}^2\right)}; \\ I_4(\omega) = \dfrac{i\omega\cdot\rho I_0 K_0\left[r_{04}|\omega|\right] - \omega^2\rho\left\{I_1(\omega)K_0\left[(2a+b)|\omega|\right] + I_2(\omega)K_0\left[(a+b)|\omega|\right] + I_3(\omega)K_0\left[a|\omega|\right]\right\}}{\pi R_п\left(\omega^2 + \alpha_0{}^2\right)}. \end{cases} \quad (32)$$

Введем в выражения (32) подстановку

$$\begin{cases} E_1(\omega) = \dfrac{i\omega\cdot\rho I_0 K_0\left[r_{01}|\omega|\right]}{\pi R_п\left(\omega^2 + \alpha_0{}^2\right)};\ E_2(\omega) = \dfrac{i\omega\cdot\rho I_0 K_0\left[r_{02}|\omega|\right]}{\pi R_п\left(\omega^2 + \alpha_0{}^2\right)}; \\ E_3(\omega) = \dfrac{i\omega\cdot\rho I_0 K_0\left[r_{03}|\omega|\right]}{\pi R_п\left(\omega^2 + \alpha_0{}^2\right)};\ E_4(\omega) = \dfrac{i\omega\cdot\rho I_0 K_0\left[r_{04}|\omega|\right]}{\pi R_п\left(\omega^2 + \alpha_0{}^2\right)}; \\ A(\omega) = \dfrac{\omega^2\rho K_0\left[a|\omega|\right]}{\pi R_п\left(\omega^2 + \alpha_0{}^2\right)};\ B(\omega) = \dfrac{\omega^2\rho K_0\left[b|\omega|\right]}{\pi R_п\left(\omega^2 + \alpha_0{}^2\right)}; \\ C(\omega) = \dfrac{\omega^2\rho K_0\left[(a+b)|\omega|\right]}{\pi R_п\left(\omega^2 + \alpha_0{}^2\right)};\ D(\omega) = \dfrac{\omega^2\rho K_0\left[(2a+b)|\omega|\right]}{\pi R_п\left(\omega^2 + \alpha_0{}^2\right)} \end{cases} \quad (33)$$

и получим систему линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} I_1(\omega)+A(\omega)\cdot I_2(\omega)+C(\omega)\cdot I_3(\omega)+D(\omega)\cdot I_4(\omega)-E_1(\omega)=0; \\ A(\omega)\cdot I_1(\omega)+I_2(\omega)+B(\omega)\cdot I_3(\omega)+C(\omega)\cdot I_4(\omega)-E_2(\omega)=0; \\ C(\omega)\cdot I_1(\omega)+B(\omega)\cdot I_2(\omega)+I_3(\omega)+A(\omega)\cdot I_4(\omega)-E_3(\omega)=0; \\ D(\omega)\cdot I_1(\omega)+C(\omega)\cdot I_2(\omega)+A(\omega)\cdot I_3(\omega)+I_4(\omega)-E_4(\omega)=0. \end{cases} \quad (34)$$

Решим систему уравнений (34) методом Крамера [2]. Для этого найдем определители следующих матриц:

$$\begin{cases} M(\omega)=\begin{pmatrix} 1 & A(\omega) & C(\omega) & D(\omega) \\ A(\omega) & 1 & B(\omega) & C(\omega) \\ C(\omega) & B(\omega) & 1 & A(\omega) \\ D(\omega) & C(\omega) & A(\omega) & 1 \end{pmatrix};\ M_1(\omega)=\begin{pmatrix} E_1(\omega) & A(\omega) & C(\omega) & D(\omega) \\ E_2(\omega) & 1 & B(\omega) & C(\omega) \\ E_3(\omega) & B(\omega) & 1 & A(\omega) \\ E_4(\omega) & C(\omega) & A(\omega) & 1 \end{pmatrix}; \\ M_2(\omega)=\begin{pmatrix} 1 & E_1(\omega) & C(\omega) & D(\omega) \\ A(\omega) & E_2(\omega) & B(\omega) & C(\omega) \\ C(\omega) & E_3(\omega) & 1 & A(\omega) \\ D(\omega) & E_4(\omega) & A(\omega) & 1 \end{pmatrix};\ M_3(\omega)=\begin{pmatrix} 1 & A(\omega) & E_1(\omega) & D(\omega) \\ A(\omega) & 1 & E_2(\omega) & C(\omega) \\ C(\omega) & B(\omega) & E_3(\omega) & A(\omega) \\ D(\omega) & C(\omega) & E_4(\omega) & 1 \end{pmatrix}; \\ M_4=\begin{pmatrix} 1 & A(\omega) & C(\omega) & E_1(\omega) \\ A(\omega) & 1 & B(\omega) & E_2(\omega) \\ C(\omega) & B(\omega) & 1 & E_3(\omega) \\ D(\omega) & C(\omega) & A(\omega) & E_4(\omega) \end{pmatrix}. \end{cases} \quad (35)$$

Решения систем уравнений (34) и (35) будут иметь вид: $I_1(\omega)=\dfrac{|M_1(\omega)|}{|M(\omega)|}$; $I_2(\omega)=\dfrac{|M_2(\omega)|}{|M(\omega)|}$; $I_3(\omega)=\dfrac{|M_3(\omega)|}{|M(\omega)|}$; $I_4(\omega)=\dfrac{|M_4(\omega)|}{|M(\omega)|}$.

Взяв обратное преобразование Фурье, получим значения тока в каждом проводнике:

$$\begin{cases} I_1(x)=\dfrac{1}{2\pi}\int\limits_{-\infty}^{\infty} I_1(\omega)e^{-i\omega x}\mathrm{d}\omega; \\ I_2(x)=\dfrac{1}{2\pi}\int\limits_{-\infty}^{\infty} I_2(\omega)e^{-i\omega x}d\omega; \\ I_3(x)=\dfrac{1}{2\pi}\int\limits_{-\infty}^{\infty} I_3(\omega)e^{-i\omega x}d\omega; \\ I_4(x)=\dfrac{1}{2\pi}\int\limits_{-\infty}^{\infty} I_4(\omega)e^{-i\omega x}d\omega. \end{cases} \quad (36)$$

Линейная плотность тока определяется по уравнениям: $j_1(x)=-\dfrac{\mathrm{d}I_1(x)}{\mathrm{d}x}$, $j_2(x)=-\dfrac{\mathrm{d}I_2(x)}{\mathrm{d}x}$, $j_3(x)=-\dfrac{\mathrm{d}I_3(x)}{\mathrm{d}x}$, $j_4(x)=-\dfrac{\mathrm{d}I_4(x)}{\mathrm{d}x}$.

Используя указанное выше свойство преобразования Фурье, получим:

$$j_1(x)=\frac{1}{2\pi}\int\limits_{-\infty}^{\infty} i\omega I_1(\omega)e^{-i\omega x}\mathrm{d}\omega,\ j_2(x)=\frac{1}{2\pi}\int\limits_{-\infty}^{\infty} i\omega I_2(\omega)e^{-i\omega x}\mathrm{d}\omega,\ j_3(x)=\frac{1}{2\pi}\int\limits_{-\infty}^{\infty} i\omega I_3(\omega)e^{-i\omega x}\mathrm{d}\omega,$$

$$j_4(x) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} i\omega I_4(\omega) e^{-i\omega x} \mathrm{d}\omega .$$

На рисунке 7 показаны кривые распределения токов в проводниках, расположенных на поверхности земли, для случая, когда ρ = 50 Ом·м; $\alpha_0 = 3{,}1\cdot10^{-4}$ 1/м; $y_0 = 0{,}1$ м; $h = 0{,}5$ м; $I_0 = 0{,}1$ А, на рисунке 8 – кривые распределения плотности токов в проводниках.

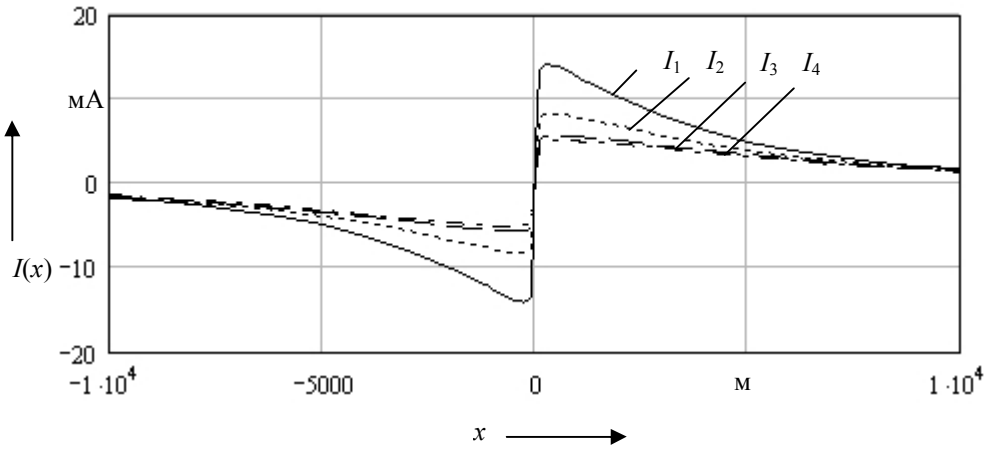


Рисунок 7 – Распределение токов в проводниках, расположенных на поверхности земли

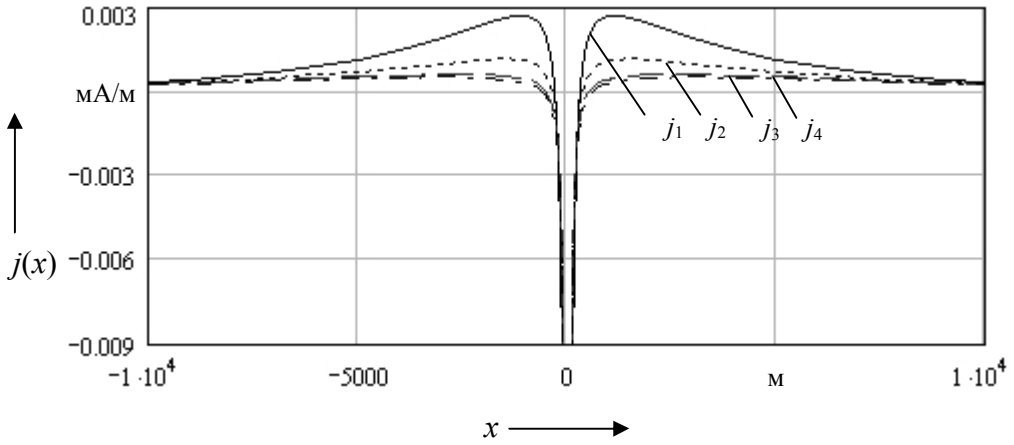


Рисунок 8 – Распределение плотности токов в проводниках

Потенциалы в проводниках определяются по формулам (25) – (28), в среде – по (24).

На рисунке 9 приведены кривые распределения потенциала поверхности земли от тока, стекающего с точечного источника без φ_0 и $\varphi_з$ в присутствии четырех проводников, расположенных на поверхности земли, при $x = 0$.

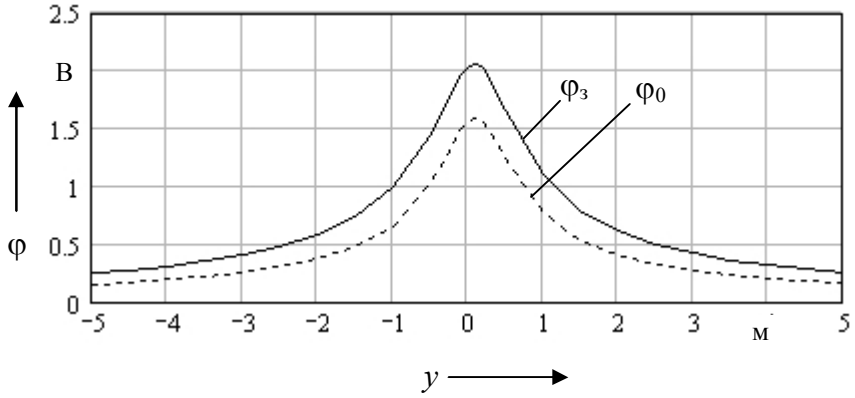


Рисунок 9 – Распределение потенциала поверхности земли

Из полученных результатов следует, что присутствие проводников на поверхности земли увеличивает потенциал, создаваемый на поверхности земли. Потенциал поверхности земли зависит от количества наземных сооружений, их параметров и расстояния до точечного источника.

Список литературы

1. Стрижевский, И. В. Теория и расчет дренажной и катодной защиты магистральных трубопроводов от коррозии блуждающими токами [Текст] / И. В. Стрижевский. / Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы. – М., 1963. – 240 с.

2. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов [Текст] / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М.: Наука, 1980. – 976 с.

УДК 669.662.76

А. М. Парамонов, В. Т. Черемисин, Е. Н. Рыжкова

К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОТЫ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПРЕДПРИЯТИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

В статье рассматриваются пути повышения эффективности и экономичности пламенного нагрева металла. Предложены методика и алгоритм технико-экономической оптимизации рекуперации тепла уходящих газов для конкретного значения их температуры на выходе из рабочего пространства нагревательной печи. Обоснована целесообразность применения разработанного алгоритма для определения экономически выгодной температуры подогрева в рекуператоре воздуха, идущего на горение топлива, при проектировании и эксплуатации нагревательных печей. Применение предлагаемых рекомендаций позволяет повысить тепловую эффективность и экономичность работы нагревательных печей.

В пламенных нагревательных печах при отсутствии утилизации потери тепла с уходящими газами составляют 40 – 70 % от общего расхода тепла на печь. Использование теплоты уходящих газов в промышленных печах представляет собой важную задачу, так как повышает КПД печи, снижает удельный расход топлива на тепловую обработку материала, позволяет интенсифицировать процессы горения топлива и нагрева металла.

Эффективность использования топлива в печах повышается при сочетании мероприятий по обеспечению полного его сгорания при минимальном избытке воздуха с более полной утилизацией (рекуперацией) физической теплоты уходящих газов в теплоиспользующих устройствах (рекуператорах).

Рекуперация теплоты уходящих газов характеризуется степенью рекуперации. Степень рекуперации – это отношение количества утилизированной теплоты на подогрев нагреваемого теплоносителя в рекуперативном теплообменнике к количеству теплоты уходящих газов на его входе.

Высокотемпературный подогрев воздуха, идущего на горение топлива, в рекуператоре печи – основное мероприятие по повышению тепловой эффективности нагревательных печей, позволяющее повысить их термический КПД, снизить удельный расход топлива на подогрев металла с одновременным увеличением производительности печи. Однако это ведет к увеличению затрат на теплоутилизирующие устройства, поэтому целесообразно получить оправданную степень рекуперации теплоты уходящих газов. Окупаемость капиталовложений в теплоутилизирующие устройства ускоряется подбором оптимальных схем и последовательностью их установки по дымовому тракту.

Значение экономически выгодной степени рекуперации теплоты для конкретного значения температуры уходящих из рабочего пространства нагревательной печи дымовых газов можно найти исходя из минимума суммарных (приведенных) затрат на рекуператор и топливо:

$$З_р = С_т B + С_р H_р. \quad (1)$$

Приравняв к нулю частные производные функции (1) по степени рекуперации теплоты уходящих газов (оптимизируемому параметру) [1], имеем:

$$\frac{\partial З_р}{\partial P} = С_т \frac{\partial B}{\partial P} + С_р \frac{\partial H_р}{\partial P} = 0, \quad (2)$$

где $З_р$ – приведенные затраты по рекуператору и топливу, р./г.;

P – степень рекуперации теплоты уходящих газов;

B – расход топлива, м^3/г. или кг/г.;

$H_р$ – поверхность нагрева рекуператора, м^2;

$С_т$ – стоимость топлива, р./м^3 или р./кг;

$С_р$ – приведенная годовая стоимость 1 м^2 поверхности нагрева рекуператора, р./(м^{2}г.);

$$С_р = P_р(P_н + П) + \Delta N_{т.д}[Z \cdot С_{т.д}(P_н + П) + С_э \cdot h],$$

где $P_р$ – стоимость 1 м^2 поверхности нагрева рекуператора, р./м^2;

$P_н$ – нормативный коэффициент эффективности, 1/г.;

П – норма амортизационных отчислений;

$\Delta N_{тд}$ – мощность, затрачиваемая на обслуживание 1 м^2 поверхности нагрева рекуператора (на преодоление газового и воздушного сопротивления), кВт/м^2;

$\Delta С_{т\,д}$ – стоимость тягодутьевых машин, р./кВт;

Z – коэффициент запаса по расходу и давлению тягодутьевых машин;

$С_э$ – стоимость электроэнергии, р./кВт · ч;

h – время работы печи в течение года, с./г.

Чтобы получить расчетную формулу для определения $P_{опт}$, представим поверхность нагрева рекуператора и расход топлива в виде функции от степени рекуперации тепла отходящих газов.

Годовой расход топлива

$$B = B_н\ h + B_р, \quad (3)$$

где $B_н$ – расход топлива на нагрев металла при стационарном температурном режиме печи, кг/с.;

$B_р$ – расход топлива при выводе из печи из холодного состояния после длительного простоя на стационарный температурный режим, кг/г.

Выражение для вычисления расхода топлива $B_н$ получим из уравнения теплового баланса печи:

$$Q_х + Q_в + Q_т + Q_{экз} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6, \quad (4)$$

где $Q_х = B\ Q_н^р$ – химическое тепло топлива, Вт;

$Q_н^р$ – низшая теплота сгорания топлива, Дж/м^3 или Дж/кг;

$Q_в, Q_т$ – тепловой поток, вносимый соответственно воздухом и топливом, Вт

$$Q_в = B_н V_в C_в t_в; \quad (5)$$

$$Q_{\text{т}} = B_{\text{н}} C_f t_f, \tag{6}$$

где $t_{\text{в}}$, $C_{\text{в}}$ – соответственно температура и средняя теплоемкость воздуха, поступающего к горелочным устройствам печи, $^{\circ}C$, Дж/(м^3 ·К);

$V_{\text{в}}$ – количество воздуха, необходимое для сжигания единицы количества топлива, м^3/кг или м^3/м^3;

t_f, C_f – температура и средняя теплоемкость топлива соответственно, $^{\circ}C$, Дж/(кг ·К);

$Q_{\text{экз}}$ – тепловой поток от экзотермических реакций, Вт;

Q_1 – тепловой поток, необходимый для нагрева металла, Вт;

Q_2 – тепловой поток уходящих из печи дымовых газов, Вт,

$$Q_2 = Bq_{\text{г}} = BV_{\text{г}} C_{\text{г}} t_{\text{г}}; \tag{7}$$

$$q_{\text{г}} = V_{\text{г}} C_{\text{г}} t_{\text{г}}, \tag{8}$$

где $V_{\text{г}}$ – объем дымовых газов на единицу количества топлива, м^3/кг или м^3/м^3;

$t_{\text{г}}$, $C_{\text{г}}$ – температура и средняя теплоемкость уходящих из печи дымовых газов, $^{\circ}C$, Дж/(м^3 ·К);

Q_3,Q_4 – тепловые потери от химической и механической неполноты сгорания топлива, Вт,

$$Q_3 = BV_{\text{г}} R; \tag{9}$$

$$R = 12140 \cdot 10^3 R_1; \tag{10}$$

$$Q_4 = BQ_{\text{н}}^{\text{p}} R_2, \tag{11}$$

где R_1 – доля несгоревшего CO в уходящих газах;

R_2 – доля потерь от механической неполноты сгорания топлива;

Q_5 – тепловые потери теплопроводностью через кладку, Вт;

Q_6 – тепловые потери излучением через открытые окна, Вт.

Температура воздуха на выходе из рекуператоре $t_{\text{в}}^{//}$ связана с температурой горячего воздуха, поступающего к горелочным устройствам печи, равенством:

$$t_{\text{в}}^{//} = t_{\text{в}} + \delta\, t_{\text{в}}, \tag{12}$$

где $\delta t_{\text{в}}$ – падение температуры воздуха на пути от рекуператора до горелочных устройств печи вследствие потерь теплоты в окружающую среду.

$$V_{\text{в}} C_{\text{в}} t_{\text{в}} = pV_{\text{г}} C_{\text{г}}^{/} t_{\text{г}}^{/} - V_{\text{в}} C_{\text{в}}^{//} \delta t_{\text{в}} = pq_{\text{г}}^{/} - V_{\text{в}} C_{\text{в}}^{//} \delta t_{\text{в}}; \tag{13}$$

$$q_{\text{г}}^{/} = V_{\text{г}} C_{\text{г}}^{/} t_{\text{г}}^{/} \tag{14}$$

где $t_{\text{г}}^{/}$, $C_{\text{г}}^{/}$ – температура и средняя теплоемкость уходящих газов на выходе в рекуператор, $^{\circ}C$, Дж/(м^3 ·К);

$$t_{\text{г}}^{/} = \frac{C_{\text{г}} t_{\text{г}} + \theta C_{\text{в}}^{/} t_{\text{в}}^{/}}{(1+\theta) C_{\text{г}}^{/}} - \delta\, t_{\text{г}}, \tag{15}$$

где $C_{\text{в}}^{/}$, $C_{\text{в}}^{//}$ – средняя теплоемкость окружающего воздуха и воздуха на выходе из рекуператора, Дж/(м^3 ·К);

$t_{\text{в}}^{/}$ – температура окружающего воздуха, $^{\circ}C$;

$\delta t_г$ – падение температуры газов от печи до рекуператора вследствие потерь теплоты в окружающую среду, $^{\circ}C$;

θ – коэффициент, учитывающий разбавление уходящих газов на пути до рекуператора.

$$BQ_н^р + B_н V_в C_в t_в + B_н C_f t_f - B_н V_г C_г t_г - B_н V_г R - BQ_н^р R_2 = Q_1 + Q_5 + Q_6 - Q_{экз}; \quad (16)$$

$$B_н = \frac{Q_1 + Q_5 + Q_6 - Q_{экз}}{Q_н^р\ (1-R_2) + C_f t_f - V_г R - q_г + p\left[\frac{q_г}{1+\theta} - V_г\left(\frac{\theta\ C_в^{/} t_в^{/}}{1+\theta} - \delta t_г C_г^{/}\right)\right] - V_в C_в^{//} t_в^{//}}. \quad (17)$$

Обозначив $Д = Q_1 + Q_5 + Q_6 - Q_{экз}$, $Е = Q_н^р\ (1-R_2) + C_r t_r - V_г R - q_г - V_в C_в^{//} \delta\ t_в^{//}$, получим:

$$B_н = \frac{Д}{Е + q_г^{/} p}. \quad (18)$$

Годовой расход топлива на разогрев печи при выводе ее из холодного состояния после длительного простоя на стационарный температурный режим определяется по выражению:

$$B_р = \frac{Q_а N + (Q_г + Q_m)\ h_р N}{Q_н^р}, \quad (19)$$

где $Q_а$ – количество тепла на аккумуляцию, Дж;

N – количество пусков печи в работу из холодного состояния после длительных остановок, 1/г.;

$Q_г$ – теплота дымовых газов, уходящих из печи во время ее пуска в работу из холодного состояния, Вт;

Q_m – теплота, теряемая теплопроводностью в окружающую среду через футеровку печи, которая определяется по общеизвестной формуле, принимая значение внутренней температуры кладки как среднее в начале и в конце ее разогрева, Вт;

$h_р$ – время разогрева печи при ее пуске из холодного состояния, с.

Количество тепла на аккумуляцию определяется по выражению:

$$Q_а = \sum_{i=1}^{n} V_i \rho_i (C_i^к t_i^к - t_i^н t_i^н), \quad (20)$$

где V_i, ρ_i – соответственно объем и плотность i-го слоя футеровки, м^3, кг/м^3;

$t_i^н$ $t_i^к$ – значения начальной и конечной температуры i-го слоя футеровки, $^{\circ}C$;

$C_i^н$, $C_i^к$ – средняя теплоемкость материала i-го слоя футеровки при начальной и конечной его температуре, Дж/ (кг·К).

Если принять с определенной степенью погрешности, что производительность топливосжигающих устройств при разогреве печи и ее работе при стационарном температурном режиме одинаковы, то

$$Q_г = B_н V_г C_г t_г; \quad (21)$$

$$B_р = \frac{B_н h_р V_г C_г t_г N}{Q_н^р} + \frac{(Q_а + Q_m h_р)\ N}{Q_н^р}. \quad (22)$$

Суммарный годовой расход топлива определим, подставив в уравнение (3) выражения (18) и (22):

$$B = \frac{\text{Д}}{\text{Е} + q_{\text{г}}^{/} p}\left(h + \frac{h_{\text{р}} V_{\text{г}} C_{\text{г}} t_{\text{г}} N}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}} + \frac{(Q_a + Q_m h_{\text{р}})\, N}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}}\right). \quad (23)$$

Величину поверхности нагрева рекуператора определим из выражения [2]:

$$H_{\text{р}} = \frac{B_{\text{н}} \eta_{\text{в}} V_{\text{в}} (C_{\text{в}}^{//} t_{\text{в}}^{//} - \text{C}_{\text{в}}^{/} t_{\text{в}}^{/})}{\text{К}\varepsilon\ \upsilon}, \quad (24)$$

где υ – средний температурный напор, $^{\circ}C$;

К – коэффициент теплопередачи, Вт/(м^2 ·К);

$t_{\text{в}}^{/}$, $C_{\text{в}}^{/}$ – соответственно температура и средняя теплоемкость воздуха на входе в рекуператор, $^{\circ}C$, Дж/(м^3 ·К);

ε – поправочный коэффициент при сложной схеме теплообмена;

$\eta_{\text{в}}$ – коэффициент, учитывающий потери воздуха в рекуператоре.

С целью упрощения конечных зависимостей средний температурный напор в рекуператоре определим по приближенной формуле [3]:

$$\upsilon = \text{А}\ (t_{\text{г}}^{//} - t_{\text{в}}^{/}) + \text{Б}\ (t_{\text{г}}^{/} - t_{\text{в}}^{//}), \quad (25)$$

где $t_{\text{г}}^{//}$ – температура уходящих газов на выходе из рекуператора, $^{\circ}$С.

В зависимости от отношения $(t_{\text{г}}^{//} - t_{\text{в}}^{/})/(t_{\text{г}}^{/} - t_{\text{в}}^{//})$ коэффициенты А и Б принимают следующие численные значения: при $(t_{\text{г}}^{//} - t_{\text{в}}^{/})/(t_{\text{г}}^{/} - t_{\text{в}}^{//}) = 1 \div 3$ А = 0,43; Б = 0,57; при $(t_{\text{г}}^{//} - t_{\text{в}}^{/})/(t_{\text{г}}^{/} - t_{\text{в}}^{//}) = 3 \div 6$ А = 0,35; Б = 0,735.

Принятое допущение дает отклонение от среднелогарифмического значения величины υ не более чем на 2 %.

Температуру уходящих газов на выходе из рекуператора определим из уравнения теплового баланса:

$$V_{\text{в}} \eta_{\text{в}} (C_{\text{в}}^{//} t_{\text{в}}^{//} - C_{\text{в}}^{/} t_{\text{в}}^{/}) = m V_{\text{г}} (C_{\text{г}}^{/} t_{\text{г}}^{/} - C_{\text{г}}^{//} t_{\text{г}}^{//})\ (1 + \theta)\ \eta_{\text{г}}; \quad (26)$$

$$t_{\text{г}}^{//} = \frac{C_{\text{г}}^{/}}{C_{\text{г}}^{//}} - \frac{P q_{\text{г}}^{/} - V_{\text{в}} C_{\text{в}}^{/} t_{\text{в}}^{/}}{m\ V_{\text{г}} (1 + \theta)\ \eta_{\text{г}} C_{\text{г}}^{//}}, \quad (27)$$

где $C_{\text{г}}^{//}$ – средняя теплоемкость уходящих газов на выходе из рекуператора, Дж/(м^3 · К);

m – коэффициент, учитывающий выбивание продуктов сгорания из печи;

$\eta_{\text{г}}$ – коэффициент, учитывающий тепловые потери через ограждающие стенки рекуператора в окружающую среду.

Температуру уходящих газов на входе в рекуператор определяется из выражения (15).

Получим выражение для расчета температуры воздуха на выходе из рекуператора:

$$P = \frac{q_{\text{в}}}{q_{\text{г}}^{/}} = \frac{V_{\text{в}} C_{\text{в}}^{//} t_{\text{в}}^{//}}{q_{\text{г}}^{/}}; \quad (28)$$

$$t_{\text{в}}^{//} = \frac{P q_{\text{г}}^{/}}{V_{\text{в}} C_{\text{в}}^{//}}. \quad (29)$$

Подставив уравнение (27) и (29) в равенство (25) и обозначив

$$U = t_{\text{г}}^{/}\left(\text{А}\frac{C_{\text{г}}^{/}}{C_{\text{г}}^{//}} + \text{Б}\right) + \text{А} t_{\text{в}}^{/}\left(\frac{V_{\text{в}}\ C_{\text{в}}^{/}\ t_{\text{в}}^{/}}{m V_{\text{г}} C_{\text{г}}^{//} (1 + \theta)} - 1\right); \quad (30)$$

$$W = q_{\text{г}}^{/}\left(\frac{\text{А}\eta_{\text{в}}}{mV_{\text{г}}C_{\text{г}}^{//}\ \eta_{\text{г}}(1+\theta)} + \frac{\text{Б}}{V_{\text{в}}C_{\text{в}}^{//}}\right), \tag{31}$$

получим выражение для среднего температурного напора:

$$\upsilon = U - WP. \tag{32}$$

Подстановка значений $B_{\text{н}}$ и υ из уравнений (18) и (32) в выражение (24) с учетом, что $V_{\text{в}}C_{\text{в}}^{//}t_{\text{в}}^{//} = Pq_{\text{г}}^{/}$, дает искомую зависимость в виде:

$$H_{\text{р}} = \frac{\text{Д}\eta_{\text{в}}(pq_{\text{г}}^{/} - V_{\text{в}}C_{\text{в}}^{/})}{(\text{Е} + q_{\text{г}}^{/}p)(U - WP)R\varepsilon}. \tag{33}$$

Взяв первые производные по P из выражений (23) и (33) и подставив их в уравнение (2), получим после некоторых преобразований:

$$\text{а}p^2 + \text{в}p + d = 0, \tag{34}$$

где $\text{а} = q_{\text{г}}^{/}W\ \left[3\eta_{\text{в}}Q_{\text{н}}^{\text{р}}q_{\text{г}}^{/} - \text{К}\varepsilon W(hQ_{\text{н}}^{\text{р}} + h_{\text{р}}V_{\text{г}}C_{\text{г}}t_{\text{г}}N)\right]$;

$$\text{в} = 2\eta_{\text{в}}Q_{\text{н}}^{\text{р}}W(q_{\text{г}}^{/}\text{Е} + V_{\text{в}}C_{\text{в}}^{/}t_{\text{в}}^{/}) - 2\,(q_{\text{г}}^{/})^2\text{К}\varepsilon uW(hQ_{\text{н}}^{\text{р}} + h_{\text{р}}V_{\text{г}}C_{\text{г}}t_{\text{г}}N);$$

$$d = \eta_{\text{в}}Q_{\text{н}}^{\text{р}}\left[V_{\text{в}}C_{\text{в}}^{/}t_{\text{в}}^{/}(q_{\text{г}}^{/}u + EW) - q_{\text{г}}^{/}\text{Е}u\right] + q_{\text{г}}^{/}\text{К}\varepsilon u^2(hQ_{\text{н}}^{\text{р}} + h_{\text{р}}V_{\text{г}}C_{\text{г}}t_{\text{г}}N).$$

На основании полученных выражений разработан алгоритм определения экономически выгодной степени рекуперации теплоты уходящих газов для конкретного значения их температуры на выходе из рабочего пространства печи $P_{\text{опт}}$. С определением $P_{\text{опт}}$ представляется возможным найти экономически выгодные значения температуры подогрева воздуха в рекуператоре и уходящих газов за рекуператором, используя выражения (27) и (29).

Исследование влияния стоимостных показателей на величину $P_{\text{опт}}$ показало, что с повышением стоимости топлива и времени работы нагревательной печи возрастают $P_{\text{опт}}$ и $t_{\text{в опт}}^{//}$. Повышение стоимости рекуператора приводит к снижению $P_{\text{опт}}$ и $t_{\text{в опт}}^{//}$.

Разработанный алгоритм был использован при реконструкции кузнечной камерной нагревательной печи производительностью 600 кг/ч с конечной температурой нагрева металла 1100 $^{\circ}C$ одного из предприятий г. Омска, использующего в качестве топлива мазут марки М100. Целью реконструкции печи являлось повышение технико-экономических показателей ее работы и снижение удельного расхода топлива на нагрев металла за счет утилизации теплоты дымовых газов для подогрева воздуха, подаваемого на горение топлива. Существующая печь не имела рекуператора. Футеровка печи являлась трехслойной, выполненной из шамотного кирпича марки ША, легковесного кирпича марки ШЛ-0,4, перлитодиатомитового кирпича «Термосилипор». После реконструкции печь была оборудована щелевым радиационным рекуператором с двойной циркуляцией воздуха конструкции ОАО «Теплопроект». Рекуператор расположен над печью.

Характеристики нагревательной печи до и после реконструкции представлены в таблице.

Разработан алгоритм определения экономически выгодной степени рекуперации теплоты уходящих газов. Результаты работы подтверждают целесообразность использования предложенного алгоритма при проектировании и эксплуатации печных агрегатов.

Характеристики нагревательной печи до и после рекуперации

Наименование показателя	Единица измерения	До реконст-рукции	После реконст-рукции
Стоимость топлива	р./кг	2,25	2,25
Время работы печи	ч/г.	3100	3100
Температура уходящих газов на выходе из печи	°С	1160	1160
Температура подогрева воздуха	°С	–	425
Степень рекуперации теплоты уходящих газов		–	0,239
Термический КПД печи	%	7,8	28,6
Удельный расход топлива (с учетом пусков печи в работу из холодного состояния после простоев)	кг/т	245	193

Список литературы

1. Батищев, Д. И. Методы оптимального проектирования [Текст]: Учеб. пособие для вузов / Д. И. Батищев. – М.: Радио и связь, 1984. – 248 с.: ил. – Библиогр.: с. 243, 244. – Предм. указ.: с. 246-247. – (в пер.).

2. Тебеньков, Б. П. Рекуператоры для промышленных печей [Текст]: / Б. П. Тебеньков. – 4-е изд., испр. и доп. – М.: Металлургия, 1975. – 294 с.: ил. – Библиогр.: С. 286 – 290. – Предм. указ.: с. 291 – 294 – (в пер.).

3. Тебеньков, Б. П. Экономия топлива при нагреве металла в кузнечных печах / Б. П. Тебеньков, Е. С. Раменская // Прогрессивная технология и оборудование для нагрева под штамповку. – М.: Машиностроение, 1976. – С. 19 – 32.

УДК 658.26:656.2:519:673

А. В. Пономарев

МЕТОД АПРИОРНОЙ ОЦЕНКИ РАСХОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ РЕМОНТА ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

В статье рассматриваются возможности повышения эффективности использования электрической энергии. Показаны способы совершенствования существующего подхода к определению расхода электрической энергии на квазидетерминированные технологические процессы ремонта подвижного состава путем выявления отклонений в процессе электропотребления. Представлен также разработанный метод технологически обоснованного определения расхода электрической энергии с использованием имитационного моделирования технологических процессов.

В соответствии с «Энергетической стратегией ОАО «РЖД» на период до 2010 г. и на перспективу до 2030 г.» одним из основных ориентиров инвестиционного и инновационного развития ОАО «РЖД» в области стационарной энергетики является снижение энергоемкости основных технологических процессов до 2015 г. на 10 – 15 %. Для достижения поставленных целей активно внедряются организационно-технические мероприятия, направленные на снижение объемов потребления электрической энергии или на повышение показателей производства.

Действующие по сети железных дорог методы планирования и нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) не позволяют получить достоверной априорной оценки изменения расхода ТЭР при модернизации технологических процессов ремонта подвижного состава. Причиной этого являются две основные проблемы, которые вытекают из

того факта, что существующие методы опираются на данные об электропотреблении предыдущего периода без соответствующей обработки:

в процессе потребления электрической энергии за прошедший период могут иметь место случаи нерационального использования электрической энергии, которые вместо того, чтобы быть выявленными, закладываются в планируемый расход электроэнергии на предстоящий период или учитываются в нормах электропотребления;

недостаточно точно учитываются возможные изменения внутренних и внешних параметров электропотребления, обусловленные реструктуризацией действующих технологических процессов.

Для решения первой проблемы с целью получения возможности выявления отклонений в процессе электропотребления квазидетерминированных технологических процессов разработан программный модуль анализа данных об электропотреблении в условиях использования микропроцессорных счетчиков электрической энергии [1].

В основе программного модуля лежит разработанный метод статистической обработки данных, основа которого заключается в построении среднестатистического графика потребления электрической энергии с учетом исключения грубых отклонений путем посуточного и поинтервального выявления промахов статистическими методами.

Рисунок 1 – Графическая схема алгоритма поиска промахов

Алгоритм поиска статистических промахов программным модулем представлен на рисунке 1. Апробация разработанного программного модуля проведена в локомотивном ремонтном депо на технологическом процессе заливки баббитом вкладышей моторно-осевых подшипников.

В результате обработки данных об электропотреблении отделения баббитозаливки локомотивного депо за 26 суток с помощью разработанного программного модуля в пяти из них зафиксировано существенное отклонение среднего значения мощности контролируемого потребителя. Причиной отклонений явилось преднамеренное сокращение или увеличение продолжительности рабочей смены в эти дни, что повлияло на режим работы электрооборудования.

Среди остальных 21 суток выявлено множество отклонений в процессе электропотребления, большая часть из которых связана с включенной в ночное время вентиляцией, что не предусмотрено действующим технологическим процессом. Пример графика электропотребления с явно выраженными отклонениями, обусловленными включенной в ночное время вентиляцией, построенный для пятиминутных интервалов, представлен на рисунке 2. На основании выявленных отклонений строится среднестатистический график электропотребления, пример которого для 30-минутных интервалов изображен на рисунке 3.

Область применения разработанного программного модуля анализа данных об электропотреблении квазидетерминированных технологических процессов в условиях использования микропроцессорных счетчиков электрической энергии не ограничивается обработкой данных об электропотреблении за прошедший период.

Предусмотрена возможность оперативного анализа электропотребления на основании сравнения текущих значений расхода электрической энергии с имеющейся «обучающей» выборкой, составленной на основании прошлого периода. Такой подход позволяет повысить

эффективность использования электрической энергии за счет своевременной выработки управленческих решений.

Рисунок 2 – Фрагмент окна программного модуля с построенным суточным графиком электропотребления, имеющим отклонения по мощности на интервальных участках

Рисунок 3 – Фрагмент окна программного модуля с построенным среднестатистическим графиком электропотребления отделения баббитозаливки

Однако данный подход применим только для квазидетерминированных технологических процессов, имеющих установленный порядок работ и имеющих относительно постоянную привязку ко времени.

Получение обоснованной оценки расхода электрической энергии, опирающейся не на показания предшествующего периода, а на действительные характеристики технологических

процессов и параметры используемого электрооборудования с учетом стохастичности всех контролируемых параметров, возможно при использовании методов имитационного моделирования.

Применение методов имитационного моделирования позволяет не только определить технологически обоснованные объемы электрической энергии, но и априорно оценить эффективность планируемых к внедрению организационно-технических мероприятий, определить потребности в других видах ТЭР и необходимых затратах (временных, трудозатратах, ресурсах) и в конечном итоге снизить энергоемкость и повысить эффективность управления структурными подразделениями [2].

Разделяют четыре основных вида имитационного моделирования: моделирование динамических систем, дискретно-событийное моделирование, системная динамика и агентное моделирование. Выбор соответствующего подхода осуществляется исходя из поставленных перед исследователем задач [3].

Для моделирования технологических процессов ремонта подвижного состава наилучшим образом подходит дискретно-событийное имитационное моделирование, что обусловлено следующими обстоятельствами:

технологический процесс ремонта подвижного состава имеет жесткую установленную структуру производственного потока;

технологический процесс ремонта подвижного состава можно представить в виде стохастической временной сети Петри, узлами которой являются отдельные технологические операции;

технологические операции могут быть представлены в виде простых систем массового обслуживания с одним или несколькими обслуживающими устройствами;

параметры выполнения технологической операции (продолжительность, относительная частота выполнения, режимы работы оборудования и др.) могут быть описаны с помощью математического аппарата теории вероятностей.

Построение имитационной модели начинается с построения структурно-алгоритмической модели исследуемого технологического процесса ремонта подвижного состава. Разработанный сотрудниками Омского государственного университета путей сообщения программный комплекс «Сетевое планирование при организации ремонта подвижного состава» позволяет в удобном виде представлять сетевые графики исследуемых технологических процессов [4], сокращая время построения структурно-алгоритмической модели, пример которой приведен на рисунке 4.

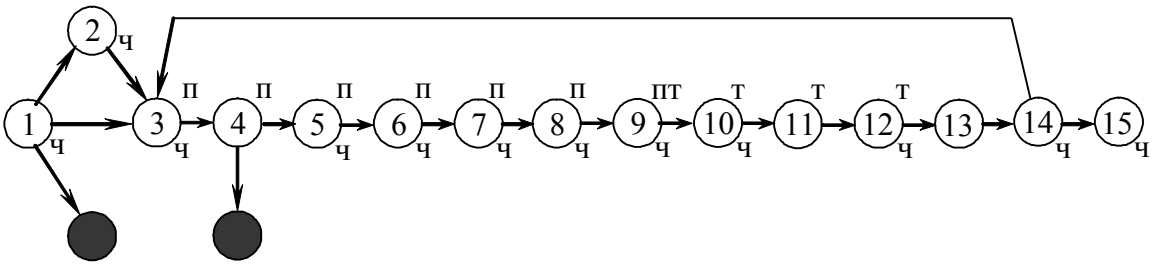


Рисунок 4 – Структурно-алгоритмическая модель технологического процесса заливки баббитом вкладышей моторно-осевых подшипник : – позиция выбраковки изделий; П – позиция работы печи; Т – позиция работы тигля; Ч – технологическая операция, в выполнении которой необходимо участие человека

Основным критерием выбора необходимого уровня детализации является поставленная задача моделирования различных составляющих (энергетической, технологической, материально-технической) технологического процесса ремонта подвижного состава.

Структурно-алгоритмическая модель сопровождается пооперационным перечнем работ, в котором указываются технологические операции, соответствующие позициям модели, используемое оборудование, характеристики режимов работы оборудования и параметры вы-

полнения работ. По полученным данным выполняется построение имитационной модели технологического процесса ремонта подвижного состава.

Преимуществом такого подхода к описанию процесса электропотребления является возможность внесения в имитационную модель корректировок, отражающих изменения в структуре электропотребителя без потери физического смысла, что позволяет априорно оценивать эффект от планируемых к внедрению организационно-технических мероприятий, учитывать структурные изменения технологического процесса. При этом все вносимые в модель изменения характеризуются параметрами, имеющими однозначную, интуитивно понятную привязку к физическим параметрам объектов моделируемой системы.

Разработанный метод определения расхода электрической энергии на технологические процессы ремонта подвижного состава основан на обработке полученных от имитационной модели данных – в первую очередь о продолжительности выполнения каждой технологической операции.

Согласно разработанному методу обоснованный расход электрической энергии на моделируемый технологический процесс ремонта подвижного состава определяется по формуле:

$$W = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} k_{i,j}^{\text{и.н.т}} k_{i,j}^{\text{и.м.т}} K_j^{ut} P_i^{\text{ном}} T_0, \qquad (1)$$

где $k_{i,j}^{\text{и.н.т}}$ и $k_{i,j}^{\text{и.м.т}}$ – коэффициенты использования нагрузки и мощности *i*-го электрооборудования (ЭО) *j*-й технологической операции;

K_j^{ut} – коэффициент использования обслуживающего устройства, имитирующего выполнение *j*-й технологической операции;

$P_i^{\text{ном}}$ – номинальная мощность *i*-го ЭО;

T_0 – общее время моделирования.

При построении имитационных моделей крупных технологических процессов имеет смысл разбить структурно-алгоритмическую модель на блоки и выполнять моделирование каждого блока по отдельности. Степень разбиения имитационной модели определяется принятым агрегатным описанием технологических процессов.

В этом случае формула (1) принимает вид:

$$W = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} k_{i,j}^{\text{и.н.т}} k_{i,j}^{\text{и.м.т}} K_j^{ut} P_i^{\text{ном}} T_s, \quad s = f(j), \qquad (2)$$

где T_s – общее время моделирования *s*-го блока;

s – номер блока, содержащего описание выполнения *j*-й технологической операции.

Коэффициенты использования обслуживающих устройств и общее время моделирования определяются на основании обработки результатов имитационного эксперимента с помощью операционного анализа. Вычисленные значения этих параметров отображаются в программных отчетах, выдаваемых системой имитационного моделирования.

Коэффициент использования нагрузки *i*-го ЭО *j*-й технологической операции характеризует отличие продолжительности выполнения технологической операции и нахождения ЭО во включенном состоянии и определяется по формуле:

$$k_{i,j}^{\text{и.н.т}} = \frac{t_{i,j}^{\text{об}}}{t_j^{\text{оп}}}, \qquad (3)$$

где $t_{i,j}^{\text{об}}$ – время работы *i*-го ЭО при выполнении *j*-й технологической операции;

$t_{i,j}^{\text{оп}}$ – продолжительность *j*-й операции.

Коэффициент использования мощности *i*-го ЭО *j*-й технологической операции характеризует неполную нагрузку ЭО при выполнении рассматриваемой технологической операции, его можно определить по выражению:

$$k_{i,j}^{\text{и.м.т}} = \frac{\overline{P}_{i,j}^{\text{факт}}}{P_i^{\text{ном}}}, \quad (4)$$

где $\overline{P}_{i,j}^{\text{факт}} = \frac{1}{t_2 - t_1}\int_{t_1}^{t_2} p_{i,j}(t)\mathrm{d}t$ – среднее фактическое значение мощности *i*-го ЭО при совершении *j*-й технологической операции;

t_1 и t_2 – начало и конец рабочего интервала;

$p_{i,j}(t)$ – мгновенное значение активной мощности *i*-го ЭО.

Экспериментально среднее фактическое значение мощности *i*-го ЭО при совершении *j*-й технологической операции определяется по формуле:

$$\overline{P}_{i,j}^{\text{факт}} = \frac{W_{i,j}^{\text{факт}}}{\Delta t_j}, \quad (5)$$

где $W_{i,j}^{\text{факт}}$ – фактическое значение потребленной электроэнергии *i*-м ЭО при выполнении *j*-й технологической операции;

Δt_j – продолжительность *j*-й технологической операции.

Выражения (4) и (5) используются для определения коэффициента использования мощности технологической операции на основе статистической обработки данных о потребленной электроэнергии, полученных от счетчика электрической энергии. При отсутствии статистических данных о потреблении электрической энергии каждым исследуемым ЭО значение коэффициента использования мощности технологической операции допускается принять равным единице.

Подтверждение адекватности полученных имитационных моделей необходимо выполнять на основании сравнения выборок их откликов с выборками откликов исследуемой системы. При подтверждении адекватности отображения имитационной моделью процесса электропотребления откликами будут являться значения расхода электрической энергии.

Сравнение двух выборок может быть осуществлено любым статистическим критерием при условии выполнения всех достаточных условий возможности их применения.

Параметрические статистические критерии основываются на предположении, что сравниваемые выборки принадлежат определенному параметрическому семейству. Например, наиболее распространенным критерием для подтверждения равенства генеральных средних двух выборок является критерий Стьюдента, предполагающий, что значения сравниваемых выборок распределены по нормальному закону распределения. Однако проверка закона распределения значений выборки требует достаточно большого ее объема, что, как правило, сложно обеспечить для исследуемой системы, так как связано с невозможностью осуществления экспериментов на действующих технологических процессах ремонта подвижного состава.

Поэтому предпочтительным является использование непараметрических статистических критериев [5]. Проверка адекватности имитационной модели предполагает проверку гипотезы об однородности выборок откликов модели и исследуемой системы.

Состоятельными непараметрическими критериями однородности сравниваемых выборок являются критерии Смирнова и типа ω^2 Лемана-Розенблатта, единственным ограничением которых является необходимость непрерывности функций распределения F(x) и G(x).

Так как при использовании критерия Смирнова реальный уровень значимости может в несколько раз отличаться от номинального (того, при котором определялось критическое значение критерия), для подтверждения адекватности имитационных моделей предпочти-

тельней использовать критерий однородности типа ω^2 Лемана-Розенблатта, расчетное значение которого определяется по формуле:

$$A = \frac{m\sum_{i=1}^{m}(r_i - i)^2 + n\sum_{j=1}^{n}(s_j - j)^2}{mn(m+n)} - \frac{4mn-1}{6(m+n)}, \quad (6)$$

где m и n – объем выборок откликов соответственно исследуемой системы и имитационной модели;

r_i и s_j – ранги i-го и j-го элементов выборок откликов модели и системы в общем вариационном ряду.

Расчетное значение критерия $\omega^2_{\text{расч}}$, полученное по формуле (6), сравнивается с критическим значением $\omega^2_{\text{кр}}$, полученным для классического критерия ω^2 Крамера-Мизеса-Смирнова, которое при уровне значимости 0,05 составляет 0,461 и не зависит от других параметров.

В результате проведенной апробации разработанного метода на структурных подразделениях Западно-Сибирской железной дороги выполнено моделирование технологических процессов заливки баббитом вкладышей моторно-осевых подшипников и среднего ремонта электровозов ВЛ10 в локомотивном ремонтном депо, а также ремонта тележки грузового вагона в вагонном ремонтном депо. Адекватность созданных имитационных моделей была подтверждена на уровне значимости 0,05.

Сравнение результатов определения расхода электрической энергии на технологические процессы ремонта подвижного состава, полученных на основании разработанного и действующего метода определения расхода электрической энергии, показало существенное повышение точности оценки расхода электрической энергии при использовании методов имитационного моделирования. Результаты сравнения отображены на рисунке 5.

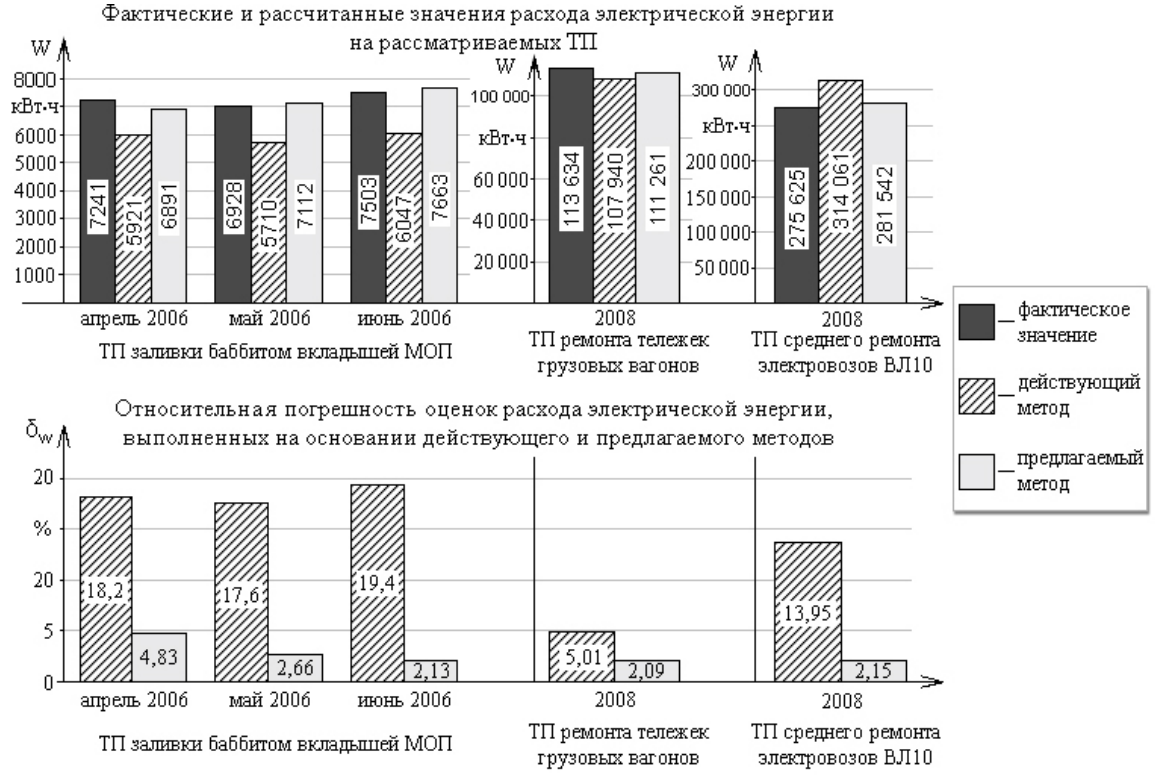


Рисунок 5 – Сравнение результатов оценки расхода электрической энергии на технологические процессы с помощью действующего и предлагаемого методов

Таким образом, использование имитационного моделирования в совокупности с разработанным методом позволяет априорно определять расход электрической энергии на технологические процессы ремонта подвижного состава, повышая эффективность использования электрической энергии. Полученное таким способом значение расхода электрической энергии является технологически обоснованным, имеет слабую привязку к предыстории потребления и учитывает действительные характеристики исследуемого технологического процесса, режимы использования технологического оборудования.

Список литературы

1. Пашков, Д. В. Выявление отклонений параметров электропотребления в рамках исследуемого технологического процесса от оптимальных значений [Текст] / Д. В. Пашков, А. В. Пономарев // Обеспечение экономически целесообразных условий работы железных дорог на основе оптимизации режимов работы электротехнических комплексов: Межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2008. – С. 55 – 58.

2. Пашков, Д. В. Повышение эффективности планирования и нормирования расхода электрической энергии на технологические нужды с применением имитационного моделирования [Текст] / Д. В. Пашков, А. В. Пономарев // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2009. – № 2. – С. 261 – 263.

3. Борщев, А. В. Применение имитационного моделирования в России – состояние на 2007 г. [Текст] / А. В. Борщев // Материалы 3-й всерос. науч.-практ. конф. по имитационному моделированию ИММОД 2007 / Центральный научно-исследовательский институт технологии судостроения. – СПб, 2007. – С. 11 – 16.

4. Сетевое планирование ремонта подвижного состава [Текст] / С. Г. Шантаренко, М. Ф. Капустьян и др. // Железнодорожный транспорт. – 2009. – № 2. – С. 48, 49.

5. Орлов, А. И. Прикладная статистика [Текст] / А. И. Орлов. – М.: Экзамен, 2006. – 672 с.

УДК 004.62:517.98

С. С. Грицутенко

ВВЕДЕНИЕ ПОНЯТИЯ «ДЕЛЬТА-ВЕКТОР» В ПРОСТРАНСТВЕ ГИЛЬБЕРТА ДЛЯ КОРРЕКТНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

В статье вводится понятие дельта-вектора в пространстве Гильберта. Доказывается теорема, что таких векторов в каждом конкретном пространстве не может быть больше одного. Приводится формула для вычисления данного вектора в том случае, если он существует. Доказывается теорема о разложении остальных векторов пространства в ряд смещенных дельта-векторов и показывается взаимосвязь этой теоремы с теоремой Котельникова.

Железнодорожный транспорт является потребителем новейших достижений в фундаментальной науке, которая уделяет большое внимание общетехническим дисциплинам: связи, измерениям, системам управления и контроля. В настоящее время в перечисленных областях науки идет ревизия используемого математического аппарата, так как существующие методики уже не обеспечивают необходимой точности обработки сигналов. В данной статье рассматриваются новые математические подходы к представлению сигналов, позволяющие более адекватно строить алгоритмы связи и измерения.

В математике и физике используется понятие дельта-функции. Это очень удобный математический объект, позволяющий эффективно решать многие научные задачи. К сожалению, при работе с дельта-функцией возникают и серьезные проблемы. Например, нельзя пе-

ремножать дельта-функции. Дифференцирование дельта-функций также приводит к весьма неоднозначным результатам. Иногда применение дельта-функции является причиной появления нескольких взаимоисключающих решений для одной задачи.

В данной статье дельта-функция рассматривается под другим углом – это не есть раз и навсегда заданная функция. Существуют пространства векторов, среди которых можно найти вектор, у которого есть все свойства дельта-функции по отношению к векторам своего пространства. Предположим, что задано пространство Гильберта H. Пусть $x(t)$, $y(t)$ и $z(t)$ – произвольные векторы пространства H, являющиеся действительными функциями переменной t, принадлежащей некому множеству T:

$$\{x(t), y(t), z(t)\} \subset H, \tag{1}$$

где $t \in T$. При этом если $x(t)$ – любой вектор пространства H, то и $x(t-\tau) \in H$ при любом $\tau \in T$.

Следовательно, на множестве H задано также и скалярное произведение двух векторов [1]:

$$(x(t), y(t)). \tag{2}$$

Определим на базе скалярного произведения (2) двух произвольных векторов пространства Гильберта понятие свертки.

Определение 1: сверткой двух произвольных векторов пространства Гильберта является третий вектор этого же пространства, получаемый из соотношения:

$$z(t) = x(t) \cdot y(t) = (x(\tau), y(t-\tau)). \tag{3}$$

Докажем для свертки свойство коммутативности.

Л е м м а 1. В отношении свертки двух произвольных векторов пространства Гильберта истинно соотношение:

$$x(t) \cdot y(t) = y(t) \cdot x(t). \tag{4}$$

Действительно:

$$x(t) \cdot y(t) = (x(\tau), y(t-\tau)) = (y(t-\tau), x(\tau)). \tag{5}$$

С учетом подстановки в уравнение (5) $r = t - \tau$ и $\tau = t - r$ имеем:

$$(y(t-\tau), x(\tau)) = (y(r), x(t-r)) = y(t) \cdot x(t), \tag{6}$$

что и требовалось доказать.

На базе введенного понятия свертки (3) определяем дельта-вектор пространства Гильберта.

Определение 2: дельта-вектором пространства Гильберта H, на котором определена свертка, называется такой вектор $\delta(t)$, в отношении которого выполняется условие:

$$x(t) = x(t) \cdot \delta(t)\ , \tag{7}$$

где $x(t)$ – любой вектор пространства H.

Т е о р е м а 1. Если в пространстве Гильберта, в котором определены ортогональный базис $\{n_i(t)\}$ и свертка, существует дельта-вектор, этот вектор единственный и может быть вычислен по формуле:

$$\delta(t) = \sum_i n_i(t)\, n_i(0). \tag{8}$$

Доказательство. Пусть $x(t)$ – произвольный вектор пространства Гильберта. По определению дельта-вектора (7) имеем:

$$x(t) = x(t)\cdot\delta(t) = \left(x(\tau),\delta(t-\tau)\right). \tag{9}$$

Разложим векторы $x(t)$ и $\delta(t)$ по базису $\{n_i(t)\}$:

$$x(\tau) = \sum_i a_i n_i(\tau); \tag{10}$$

$$\delta(t-\tau) = \sum_i b_i(t) n_i(\tau), \tag{11}$$

где a_i и b_i – коэффициенты разложения. С учетом равенства Парсеваля формула (9) преобразуется следующим образом:

$$x(t) = \left(x(\tau),\delta(t-\tau)\right) = \sum_i a_i b_i(t). \tag{12}$$

Разложим выражение (12) по базису $x(t)$ и получим следующее:

$$\sum_i a_i n_i(t) = \sum_i a_i b_i(t). \tag{13}$$

Так как $x(t)$ – любой вектор, то коэффициенты $\{a_i\}$ могут быть любыми, кроме того, они независимы. Следовательно, равенство (13) может быть истинно только при условии, что

$$n_i(t) = b_i(t). \tag{14}$$

Таким образом, любой вектор $\delta(t-\tau)$ раскладывается единственным образом в любом базисе:

$$\delta(t-\tau) = \sum_i n_i(t) n_i(\tau), \tag{15}$$

а вектор $\delta(t)$ соответственно –

$$\delta(t) = \delta(t-0) = \sum_i n_i(t) n_i(0). \tag{16}$$

Докажем некоторые свойства дельта-вектора пространства Гильберта.

Л е м м а 2: квадрат нормы (или энергия) дельта-вектора пространства Гильберта всегда равен $\delta(0)$:

$$\left\|\delta(t)\right\|^2 = \delta(0). \tag{17}$$

Имеем:

$$\left\|\delta(t)\right\|^2 = \left(\delta(t),\delta(t)\right), \tag{18}$$

вводим подстановку: $f(-t) = \delta(t)$, $f(t) = \delta(-t)$:

$$\left(\delta(t),\delta(t)\right) = \left(\delta(t),f(-t)\right) = \left(\delta(t),f(0-t)\right), \tag{19}$$

используем свойство коммутативности свертки:

$$\left(\delta(t), f(0-t)\right) = \left(f(t), \delta(0-t)\right) = f(0) = \delta(-0) = \delta(0), \tag{20}$$

что и требовалось доказать.

Рассмотрим другое важное свойство дельта-вектора – четность (симметричность). Для доказательства этого сначала докажем свойство свертки, представленной в лемме 3.

Л е м м а 3: для любого произвольного x и T истинно соотношение:

$$\left(x(t), \delta(T-t)\right) = \left(x(t), \delta(t-T)\right). \tag{21}$$

В формулу $\left(x(t), \delta(t-T)\right)$ введем подстановку: $t-T = T-\tau$, $t = 2T-\tau$:

$$\left(x(t), \delta(t-T)\right) = \left(x(2T-\tau), \delta(T-\tau)\right). \tag{22}$$

Исходя из определения дельта-вектора получаем:

$$\left(x(2T-\tau), \delta(T-\tau)\right) = x(2T-T) = x(T) = \left(x(t), \delta(T-t)\right), \tag{23}$$

что и требовалось доказать.

Теперь можно доказать четность дельта-вектора.

Л е м м а 4: для любого произвольного T истинно соотношение:

$$\delta(T) = \delta(-T). \tag{24}$$

Как следствие леммы 3, истинны утверждения, что

$$\left(\delta(t), \delta(t-T)\right) = \delta(T); \tag{25}$$

$$\left(\delta(t-T), \delta(t)\right) = \delta(-T). \tag{26}$$

Однако из определения скалярного произведения

$$\left(\delta(t), \delta(t-T)\right) = \left(\delta(t-T), \delta(t)\right), \tag{27}$$

следовательно,

$$\delta(T) = \delta(-T), \tag{28}$$

что и требовалось доказать.

Введем в рассматриваемое пространство понятие единичного вектора.

Определение 3: Единичным вектором $e(t)$ будем считать такой вектор, для которого справедливо соотношение:

$$x(t) = e(t)\,x(t). \tag{29}$$

Очевидно, что в рассматриваемом пространстве действительных функций единичный вектор является действительной функцией $e(t) = 1$. Для дальнейшего описания свойств дельта-вектора введем понятие площади вектора.

Определение 4: площадью вектора x пространства Гильберта, если в нем определен единичный вектор e, является действительное число S, определяемое соотношением:

$$S = (e, x). \tag{30}$$

Докажем следующее свойство дельта-вектора.

Л е м м а 5. Площадь дельта-вектора всегда равна 1.

Найдем площадь дельта-вектора в соответствии с формулой (30):

$$S = \left(e(t), \delta(t)\right) = \left(e(t), \delta(0-t)\right) = e(0) = 1, \tag{31}$$

что и требовалось доказать.

Теперь рассмотрим интерполяционные возможности дельта-вектора. Для этого предположим, что имеется набор из N «смещенных» по оси t функций вида $\delta(t-nT)$. Предположим, что функции $\delta(t-nT)$ образуют полный ортогональный базис. В этом случае по этим функциям можно разложить любой вектор пространства H.

Т е о р е м а 2. Если в пространстве Гильберта можно задать полный ортогональный базис размерности N, состоящий из функций вида $\delta(t-nT)$, то любой вектор $x(t)$ этого пространства может быть однозначно восстановлен по своим значениям в точках $t=nT$.

Доказательство. Так как, функции $\delta(t-nT)$ образуют полный ортогональный базис, то вектор $x(t)$ можно разложить по этому базису:

$$x(t)=\sum_{n=M}^{n=M+N} x_n\delta(t-nT), \tag{32}$$

где N – размерность базиса рассматриваемого пространства;

$[M, M+N]$ – интервал значений n.

Остается только найти коэффициенты разложения по данному базису:

$$x_n=\frac{1}{\|\delta(t)\|^2}\big(x(t),\delta(t-nT)\big)=\frac{1}{\delta(0)}\big(x(t),\delta(nT-t)\big)=\frac{1}{\delta(0)}x(nT). \tag{33}$$

Таким образом, формула (32) принимает вид:

$$x(t)=\frac{1}{\delta(0)}\sum_{n=M}^{n=M+N} x(nT)\delta(t-nT). \tag{34}$$

Это означает, что имея только отсчеты вектора $x(t)$ в точках $t=nT$, можно полностью восстановить весь вектор, что и требовалось доказать.

Приведем пример пространства, в котором существует дельта-вектор. Таким пространством является множество всех функций со спектром, ограниченным отрезком $[-\Omega,\Omega]$. Скалярным произведением векторов $x(t)$ и $y(t)$ этого пространства выберем известное соотношение [2]:

$$\big(x(t),y(t)\big)=\int_{-\infty}^{\infty} x(t)\,y(t)\,dt. \tag{35}$$

Исходя из формулы (9) получим, что для дельта-вектора $\delta(t)$ данного пространства справедливо соотношение:

$$x(t)=\int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)\delta(t-\tau)\,d\tau, \tag{36}$$

где $x(t)$ – любой вектор рассматриваемого пространства.

Соотношение (36) – классическая свертка двух функций – $x(t)$ и $\delta(t)$. Сразу оговоримся, что классическая дельта-функция Дирака в данном случае дельта-вектором выступать не может, так как ее спектр не ограничен интервалом $[-\Omega,\Omega]$, следовательно, она не является вектором нашего пространства. Необходимо искать дельта-вектор среди функций с ограниченным спектром.

Как известно из теории [2], классическая свертка во временной области соответствует перемножению спектров функций в спектральной области. Подберем такую функцию $\delta(t)$,

спектр $\Lambda(\omega)$ которой в отношении спектра $X(\omega)$ любой функции рассматриваемого пространства имеет такое свойство:

$$X(\omega) = \Lambda(\omega) X(\omega). \tag{37}$$

Очевидно, что

$$\Lambda(\omega) = \begin{cases} 1, \omega \subset [-\Omega, \Omega]; \\ 0, \omega \not\subset [-\Omega, \Omega], \end{cases} \tag{38}$$

а такой спектр имеет функция

$$\delta(t) = \frac{\sin \Omega t}{t}. \tag{39}$$

Известно, что смещенные по оси времени на интервалы $nT = \frac{2\pi}{\Omega} n$ функции вида (39) образуют полный ортогональный базис. С учетом того, что $\delta(0) = \Omega$, а $N \to \infty$, формула (34) приобретает вид широко известной интерполяционной формулы Котельникова [3]:

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT) \frac{\sin \Omega (t - nT)}{\Omega (t - nT)},$$

где $T = \frac{2\pi}{\Omega}$.

В заключение сформулируем основные выводы по проведенной работе.

1. Дельта-функция Дирака не является уникальным математическим объектом. Существуют пространства Гильберта, в которых имеется вектор, обладающий свойствами дельта-функции в отношении всех векторов своего пространства.

2. Площадь дельта-вектора равна единице.

3. Квадрат нормы (энергия) дельта-вектора равен значению этого вектора в точке 0.

4. Если в пространстве Гильберта, в котором определены ортогональный базис и свертка, существует дельта-вектор, этот вектор единственный и может быть стандартно вычислен из любого базиса этого пространства.

5. Дельта-вектор обладает свойством симметрии.

6. В пространстве функций, ограниченных по Котельникову, существует дельта-вектор, определяемый формулой (39).

7. Введение дельта-вектора в различные пространства Гильберта позволяет более адекватно строить информационные системы (в том числе и для железнодорожного транспорта), повышать точность обработки данных и уменьшать вероятность ошибки.

Список литературы

1. Фрид, Э. Элементарное введение в абстрактную алгебру [Текст] / Э. Фрид. – М.: Мир, 1979. – 260 с.

2. Кудрявцев, Л. Д. Курс математического анализа: в 2 т. [Текст] / Л. Д. Кудрявцев; Учебник. – М.: Высшая школа, 1981. – 2 т. – 584 с.

3. Романюк, Ю. А. Основы цифровой обработки сигналов: в 3 т. [Текст] / Ю. А. Романюк / МФТИ. – М., 2005. – 3 т. – 332 с.

УДК 621.316

И. Н. Краснокуцкий

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ОСВЕЩЕНИЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ

В статье рассмотрены вопросы построения распределенной системы управления освещением, для которой требуется измерение уровня естественной освещенности. Для выделения тренда предлагается алгоритм экспоненциального сглаживания. Результаты экспериментальных наблюдений обрабатываются методами спектрального анализа и используются в автоматизированной системе управления наружным освещением.

Освещение железнодорожных станций связано с обеспечением безопасности движения поездов, обслуживающего персонала и пассажиров. С использованием системы автоматизированного диспетчерского управления наружным освещением появляется возможность оперативного управления освещением, отслеживания неисправностей в режиме реального времени, анализа произошедших в системе освещения аварий.

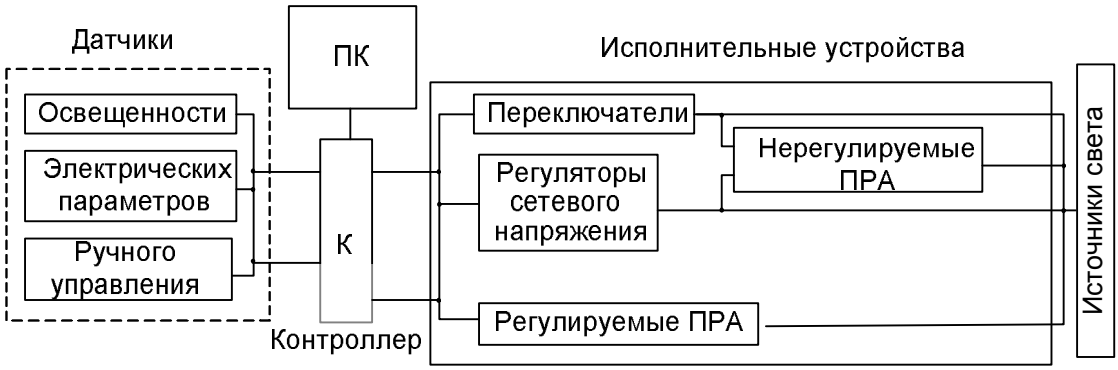
Нормирование освещенности железнодорожных станций и путей осуществляется согласно «Санитарным правилам по организации пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте»: «Освещенность открытых территорий по горизонтальной поверхности должна быть не менее указанной:

– на путях (включая пути горловины приема и отправления) – 5 лк;

– на открытых площадках междупутий и на экипировочных устройствах – 20 лк.

В настоящее время практически все системы, используемые при автоматизации управления электропитанием светильников и прожекторов наружного освещения железнодорожных станций и путей, определяют время включения и отключения исходя из заданного годового расписания, которое не всегда отражает реальную обстановку метеоусловий. Именно поэтому в такие системы необходимо внедрять фотометрические датчики, которые позволят автоматизировать процесс выбора времени включения и отключения электропитания освещения.

Типовая структурная схема автоматизированной системы управления наружным освещением в общем виде представлена на рисунке 1. В качестве источников информации о параметрах системы управления освещением и состоянии необходимых параметров окружающей среды используются измерительные преобразователи и датчики. Датчик освещенности предназначен для измерения уровня естественной освещенности, в его качестве можно использовать любой светочувствительный элемент. Датчики электрических параметров получают информацию о значениях напряжения, тока, потребляемой мощности в каждой фазе, об обрывах и замыканиях в питающих сетях. Датчик ручного управления определяет информацию о переходе контроллера в местный режим управления, если он необходим при выполнении ремонтных работ на линии, и при этом управление с персонального компьютера (ПК) блокируется.



К – контроллер; ПК – персональный компьютер; ПРА – пускорегулирующая аппаратура

Рисунок 1 – Структурная схема АСУ наружным освещением

Информация от датчиков поступает на контроллер К, в памяти которого содержится расписание режимов работы, поэтому при пропадании связи с центральным постом обеспечивается автономный режим работы системы освещения. Персональный компьютер ПК задает режимы работы системы освещения, собирает и хранит информацию об ее функционировании. После обработки полученных с датчиков данных контроллер вырабатывает управляющие воздействия на исполнительные устройства. Переключатели предназначены для полного или частичного включения или отключения ламповой нагрузки от сети, регуляторы сетевого напряжения – для плавного или дискретного регулирования светового потока источников света. В зависимости от используемых источников света питающее напряжение может подаваться как непосредственно на них, так и через нерегулируемую пускорегулирующую аппаратуру (ПРА). Принцип действия регулируемых ПРА основан на изменении их внутреннего сопротивления, поэтому использование такой аппаратуры позволяет отказаться от регуляторов сетевого напряжения и нерегулируемой ПРА.

При получении измеренных значений естественной освещенности от датчика возможно появление ошибок, которое приведет к неверному принятию решения. Простейшей операцией уменьшающей их влияние является усреднение или вычисление математического ожидания. Введем следующие обозначения. Допустим, что исследуется непрерывный сигнал $u(t)$ и известны его значения $u(n)$, полученные из $u(t)$ с шагом дискретизации T, а результатом обработки или вычислений являются дискретные величины $x(n)$. Под $u(t)$ понимается процесс изменения освещенности $E(t)$ и ее постоянная составляющая $E_0(t)$. Оценка математического ожидания или среднее значение вычисляется по формуле:

$$x(N) = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} u(n), \tag{1}$$

где N – объем обрабатываемой информации или количество измерений.

Выражение (1) можно записать и в рекуррентном виде:

$$x(n) = x(n-1) + \frac{1}{N}u(n)\ ;\ x(0) = 0,\ n = \overline{1,N}. \tag{2}$$

Операция усреднения, или простейшая процедура сглаживания, является частным случаем более общей цифровой фильтрации, описываемой разностным уравнением:

$$x(n) + \sum_{k=1}^{p} a(k)\cdot x(n-k) = b(0)\cdot u(n) + \sum_{k=1}^{q} b(k)\cdot u(n-k). \tag{3}$$

Если коэффициенты $a(k)$ при $k = \overline{1,p}$ и $b(k)$ $k = \overline{1,q}$ постоянные, то модель (3) и соответствующий цифровой фильтр линейны и можно записать передаточную функцию через коэффициенты в виде:

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b(0) + \sum_{k=1}^{q} b(k)\cdot z^{-k}}{1 + \sum_{k=1}^{p} a(k)\cdot z^{-k}}, \tag{4}$$

или через импульсную характеристику:

$$H(z) = \sum_{k=0}^{\infty} h(k)\cdot z^{-k}. \tag{5}$$

В частном случае при $a(k) = 0$ и $k = \overline{1,p}$ формулы (4) и (5) определяют следующее выражение передаточной функции:

$$H(z) = B(z) = \sum_{k=0}^{q} b(k) \cdot z^{-k} = \sum_{k=0}^{q} h(k) \cdot z^{-k}. \quad (6)$$

Импульсная характеристика будет конечной, и такие цифровые устройства называют КИХ-фильтрами, для них справедливо, что $b(k) = h(k),\ k = \overline{0,q}$. В общем случае в формулу (5) входит бесконечное число значений $h(k)$ и передаточная функция (4) описывает БИХ-фильтр.

Основной частотной характеристикой является амплитудная, для которой выполняется условие:

$$\left|H(f)\right|^2 = \left|H(z)H(z^{-1})\right|_{z = e^{j2\pi fT}}. \quad (7)$$

Частотные характеристики дискретных процессов и систем периодичны с периодом, равным частоте дискретизации $f_0 = 1/T$, поэтому, как правило, они рассматриваются либо в основной полосе $f \in [-f_0/2; f_0/2]$, либо в полуполосе $f \in [0; f_0/2]$. Вводится нормированная частота $\tilde{f}$ при $T = 1$ и для нее $\tilde{f} \in [0; 0,5]$.

При проектировании сглаживающих фильтров вводится идеальная амплитудная частотная характеристика $\left|H_n(\tilde{f})\right|$, значение которой в полосе пропускания равны единице, а остальные – нулю. Для М значений нормированной частоты $\tilde{f}_i \in [0; 0,5]$ вводится квадратичный функционал

$$L(a,b) = \sum_{i=0}^{M} [\left|H_n(\tilde{f}_i)\right| - \left|H(\tilde{f}_i, a, b)\right|]^2 \quad (8)$$

и решается задача минимизации:

$$(a,b) = \arg\min L(a,b). \quad (9)$$

Как правило, одним из численных методов оптимизации функции $L(a,b)$ определяются векторы $a = \left|a(1), a(2)...a(p)\right|^T$ и $b = \left|b(1), b(2)...b(q)\right|^T$.

Простейшими являются модели КИХ-фильтров и их коэффициенты $b(k)$ определяют вес, с которым учитываются значения входного сигнала $u(n-k),\ k = \overline{1,q}$ в формировании выхода $x(n)$. Если все коэффициенты одинаковы, то алгоритм определения передаточной функции аналогичен формуле (4). Более естественным является выбор коэффициентов $b(k)$ таким образом, чтобы ближайшие к $x(n)$ значения $u(n-k)$ учитывались с большим весом. В качестве такой убывающей функции может быть выбрана экспонента, поэтому предлагается использовать известный алгоритм экспоненциального сглаживания

$$x(n) = \gamma \cdot x(n-1) + (1-\gamma) \cdot u(n), \quad (10)$$

который, как и рекуррентная процедура (2), является простейшим БИХ-фильтром первого порядка. При обработке экспериментальной информации коэффициент γ выбирается из диапазона:

$$0 < \gamma < 1, \quad (11)$$

но если сравнивать (10) с формулой (2), то численное значение γ следует ожидать более близким к единице.

Передаточная функция для уравнения (10) имеет вид:

$$H_0(z) = \frac{1-\gamma}{1-\gamma \cdot z^{-1}}. \quad (12)$$

Дискретными моделями экспоненциального сглаживания (10) и (12) соответствует непрерывный аналог в виде простейшего фильтра нижних частот (ФНЧ) с передаточной и весовой функциями: $W_0(s)=\dfrac{1}{T_\text{ф}\cdot s+1}$ и $w(t)=\dfrac{1}{T_\text{ф}}\cdot e^{-\frac{t}{T_\text{ф}}}$.

Характеристика $w(t)$ изменяется по экспоненциальному закону. Можно показать, что параметры передаточных функций $H_0(z)$ и $W_0(s)$ связаны выражением:

$$\gamma=\frac{T_\text{ф}}{T_\text{ф}+T}. \tag{13}$$

Введем в рассмотрение относительные постоянную времени фильтра $\tilde{T}_\text{ф}=T_\text{ф}/T$ и частоту сопряжения $\tilde{f}_\text{ф}=1/T_\text{ф}$, тогда формулу (13) можно переписать в виде:

$$\gamma=\frac{1}{f_\text{ф}+1}, \tag{14}$$

для которой график зависимости параметра γ от $\tilde{f}_\text{ф}$ для основной полуполосы нормированной частоты $\tilde{f}\in[0;0,5]$ приведен на рисунке 2.

В соответствии с рисунком 2 диапазон (11) изменения коэффициента γ изменится и будет определяться неравенством:

$$0,67<\gamma<1. \tag{15}$$

На этапе предварительных исследований динамических процессов можно выбрать середину основной полуполосы $\tilde{f}_\text{ф}=0,25$ и соответствующее ей значение параметра экспоненциального сглаживания $\gamma=0,8$.

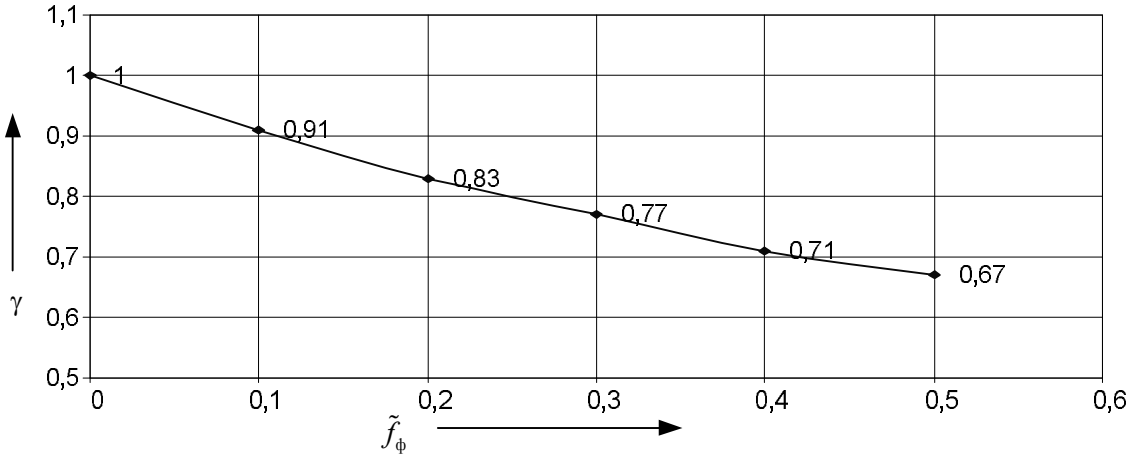


Рисунок 2 – Зависимость параметра γ алгоритма экспоненциального сглаживания от частоты сопряжения $\tilde{f}_\text{ф}$

Анализ процесса изменения естественной освещенности $E(t)$ позволяет выбрать в качестве математической модели аддитивную зависимость вида:

$$E(t)=E_0(t)+\tilde{E}(t). \tag{16}$$

В выражении (16) под $E_0(t)$ понимается трендовое изменение освещенности, а $\tilde{E}(t)$ – ее случайная составляющая. Аналогичную модель можно записать и для дискретных значений:

$$E(n)=E_0(n)+\tilde{E}(n). \tag{17}$$

Для более полного изучения процесса изменения естественной освещенности проводится оценка спектральной плотности мощности, которая в общем виде для дискретного случайного процесса x(n) вычисляется по формуле [4]:

$$\tilde{S}(f) = T \sum_{m=-L}^{L} \tilde{R}(m) e^{(-j2\pi fmT)} . \qquad (18)$$

Спектральные плотности мощности $\tilde{S}(f)$ для процессов естественной освещенности $E(t)$ и тренда $E_0(t)$ показаны на рисунках 3 и 4. Для автоматизации расчетов использовалась процедура psd(x,nfft,Fmax) системы MathLab, описанная в работе [4].

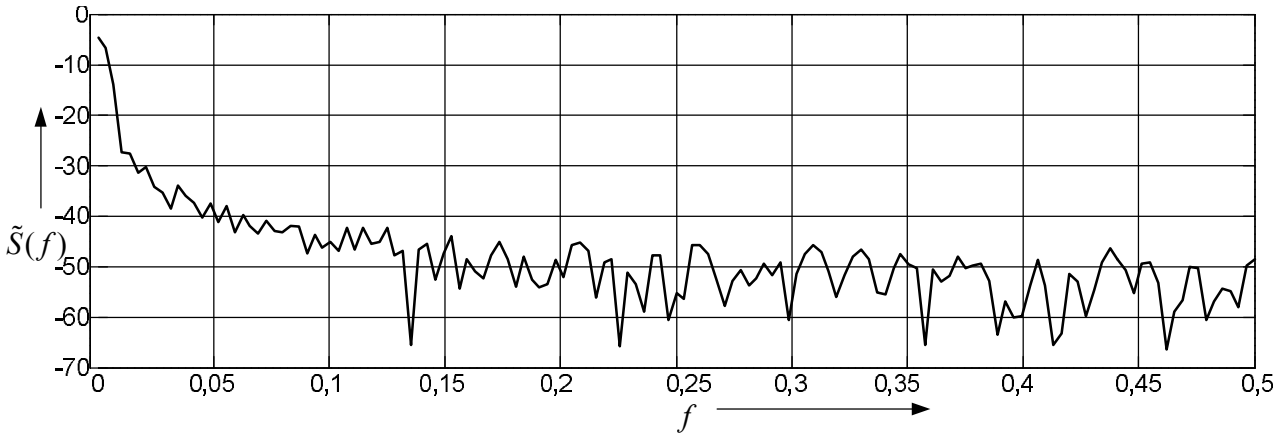


Рисунок 3 – Спектральная плотность мощности полного сигнала

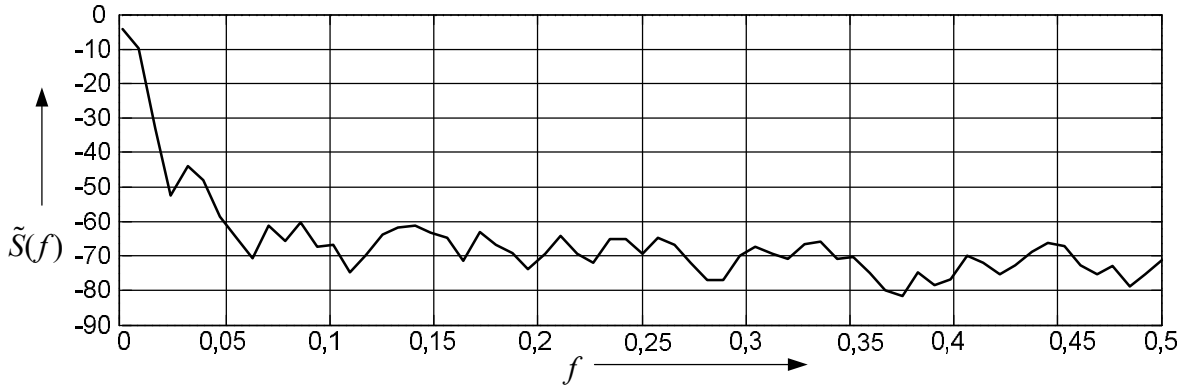


Рисунок 4 – Спектральная плотность мощности тренда

Простой визуальный анализ графиков на рисунках 3, 4 показывает, что для оценок $\tilde{S}(f)$ необходимо осуществлять процедуру сглаживания. Предлагается использовать параметрический подход, который основан на рассмотрении математических моделей исследуемых случайных процессов, как правило, заданного или определенного класса, из которых можно выделить группу методов, получивших название «авторегрессионных» [4]. В этом случае моделью временного ряда является линейное разностное уравнение вида:

$$x(n) + \sum_{k=1}^{p} a(k) \cdot x(n-k) = b(0) \cdot u(n) + \sum_{k=1}^{q} b(k) \cdot u(n-k) . \qquad (19)$$

Входным возбуждающим процессом $u(n)$ является белый шум с нулевым математическим ожиданием и некоторой конечной дисперсией ρ_u, выходной случайный процесс $x(n)$ должен иметь спектральную плотность $G(f)$, близкую или теоретически совпадающую с исходной спектральной плотностью $S(f)$ исследуемого сигнала. В методах цифровой обработ-

ки сигналов [4] разностное уравнение (19) описывает рекурсионный или БИХ-фильтр (с бесконечной импульсной характеристикой). В методах статистического анализа это модель авторегрессии скользящего среднего или АРСС (p,q) [1–3], частными случаями которой является авторегрессия АР(p), если $b(k)=0$ при $k=\overline{1,q}$ и скользящего среднего СС (q), если $a(k)=0$ при $k=\overline{1,p}$. Под p и q понимается порядок АР или СС. При проведении спектрального анализа используется разностное уравнение АР(p), отсюда и название этой группы методов. Простейшим является метод Юла-Уолкера, когда составляется матричное уравнение:

$$R_{xx}\cdot a = R_u . \tag{20}$$

Здесь матрица R_{xx} состоит из $(p+1)\times(p+1)$ элементов, являющихся значениями автокорреляционной функции $R(m)$, причем m выбирается из $m\in[-p,p]$, а $R_u=\left|\rho_u \quad 0 \quad \ldots \quad 0\right|^T$. Неизвестный вектор коэффициентов $a=\left|1 \quad a(1) \quad a(2) \quad \ldots \quad a(p)\right|^T$ определяется путем решения уравнения Юла-Уолкера (20) в матричной форме:

$$a = R_{xx}^{-1}\cdot R_u . \tag{21}$$

Автокорреляционная матрица R_{xx} является теплициевой, и вместо решения уравнения Юла-Уолкера (20) или обращения матрицы (21) разработан рекурсивный алгоритм Левинсона, который связывает АР-параметры выражением:

$$a_p(n) = a_{p-1}(n) + k_p\cdot a_p(p-n), \tag{22}$$

где $n=\overline{1,p-1}$.

В работе предлагается применять параметрический авторегрессионный гармонический алгоритм Берга. После вычисления коэффициентов $a_p(n)$, $n=\overline{1,p}$, формируется вектор а и спектральная плотность мощности определяется по формуле [4]:

$$G(f) = \frac{T\cdot\rho_u}{e^T(f)\,a\cdot a^T e(f)}, \tag{23}$$

где вектор $e(f)$ состоит из элементов $e_k(f)=e^{j2\pi kfT}, k=\overline{0,p}$.

Вычисление спектральной плотности мощности $G(f)$ процессов естественной освещенности $E(t)$ и ее тренда $E_0(t)$ производилось с использованием стандартных средств пакета MATLAB pburg(x,1,[],1). Графики соответствующих зависимостей приведены на рисунках 5 и 6.

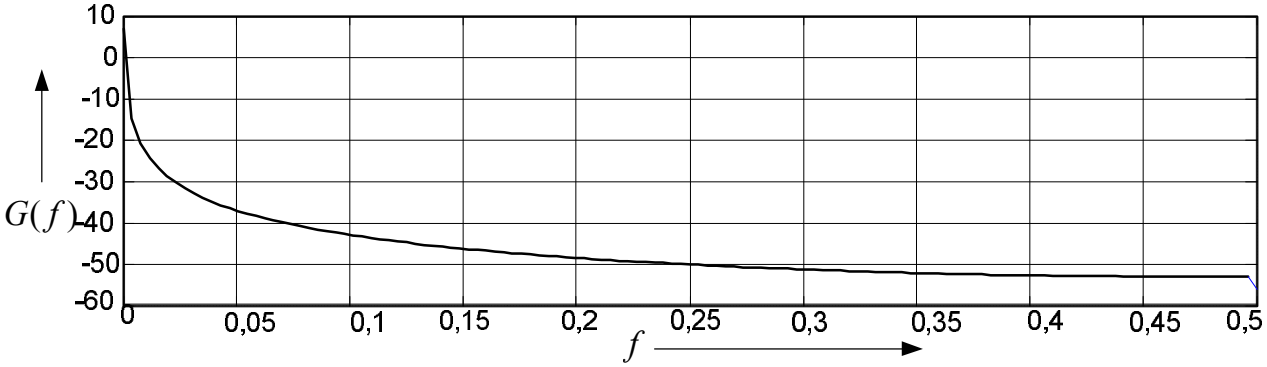


Рисунок 5 – Спектральная плотность мощности полного сигнала за сутки

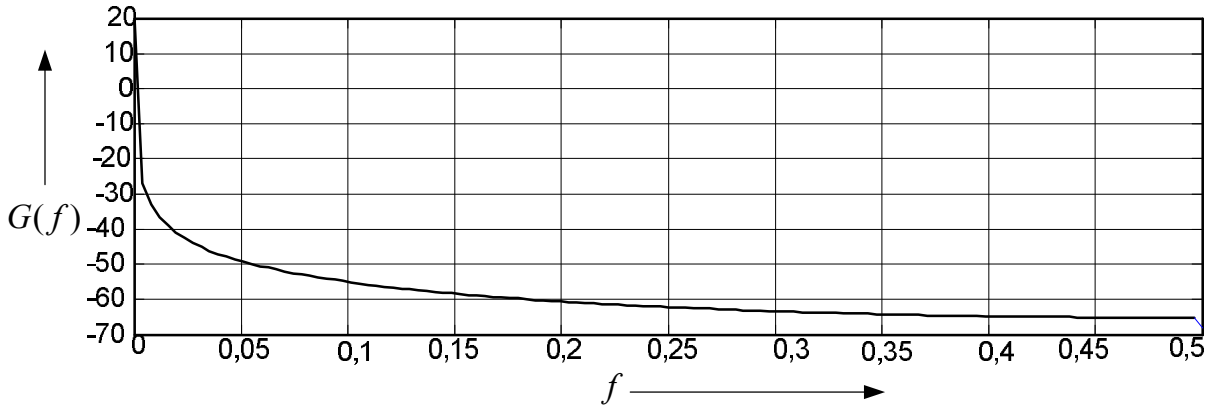


Рисунок 6 – Спектральная плотность мощности тренда за сутки

Анализ приведенных на рисунках 5 и 6 зависимостей подтверждает, что для полного сигнала $E(t)$ и тренда $E_0(t)$ метод Берга дает достаточно хороший результат. Это объясняется тем, что практические результаты параметрических методов, в том числе и аналитические выражения (20) – (22), получены в работе [4] только для моделей авторегрессии, т. е. для инерционных цифровых фильтров, обрабатывающих сигнал белого шума. Исходные спектральные плотности мощности $S(f)$ полной освещенности и ее тренда, показанные на рисунках 3 и 4, являются характеристиками фильтров нижних частот, поэтому и обработка их инерционным фильтром АР(1) приводит к аналогичным спектральным плотностям мощности вида $G(f)$, которые приведены на рисунках 5 и 6. Поэтому для оценивания спектральных плотностей мощности полного сигнала и тренда предлагается использовать метод Берга.

Таким образом, в работе на основе спектрального анализа подтверждена необходимость выделения тренда из процесса изменения естественной освещенности. В качестве алгоритма обработки экспериментальных данных предложено экспоненциальное сглаживание и обосновано оптимальное значение его параметра γ. Постоянная составляющая $E_0(t)$, выделенная из общего сигнала $E(t)$, используется в автоматизированной информационно-измерительной системе управления наружным освещением для принятия решения о необходимом режиме включения.

Список литературы

1. Статистика [Текст] / Под ред. И. И. Елисеевой. – М.: Высшее образование, 2006. – 565 с.

2. Трояновский, В. М. Информационно-управляющие системы и прикладная теория случайных процессов [Текст] / В. М. Трояновский. – М.: Гелиос АРВ, 2004. – 304 с.

3. Бендат, Дж. Измерение и анализ случайных процессов [Текст] / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1974. – 464 с.

4. Марпл-мл., С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения [Текст]: пер. с англ. / С. Л. Марпл-мл. – М.: Мир, 1990. – 584 с.

5. Оптенгейм, А. Цифровая обработка сигналов [Текст] / А. Оптенгейм, Р. Шафер. – М.: Техносфера, 2007. – 856 с.

6. Лазарев, Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB [Текст] / Ю. Лазарев. – СПб: Питер; Киев: Издательская группа BHV, 2005. – 512 с.

УДК 681.32

А. А. Лаврухин

ЭФФЕКТИВНАЯ ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫХ БЛОКОВЫХ КОДОВ СОВРЕМЕННЫМИ МИКРОПРОЦЕССОРНЫМИ СРЕДСТВАМИ

В статье рассмотрены вопросы реализации помехоустойчивых блоковых кодов, в частности, кодов Рида-Соломона, средствами современных микропроцессоров. Описаны способы повышения производительности вычислений за счет архитектурных особенностей одного класса процессоров и предложены рекомендации для получения оптимальной по скорости вычисления программы и предварительного оценивания ее быстродействия. Показано использование предложенных рекомендаций на примере двух наиболее вычислительно затратных участков алгоритмов кодирования и декодирования на базе отечественных процессоров серии «Мультикор». Предложенные рекомендации позволят повысить пропускную способность каналов передачи информации на железнодорожном транспорте за счет принципиальной возможности реализации наиболее эффективных, но алгоритмически сложных кодов.

Помехоустойчивое кодирование широко применяется во многих современных системах передачи информации, в том числе и на железнодорожном транспорте, и способствует повышению качества связи на канальном уровне. Подавляющее большинство наиболее часто используемых корректирующих кодов подразделяется на два типа – сверточные [1], в которых кодирование и декодирование производится непрерывно, и блоковые [1, 2], в которых эти операции осуществляются в пределах конечных информационных блоков. Самыми эффективными кодами (имеющими одновременно хорошую помехоустойчивость и малую избыточность) считаются каскадные [3], последовательно использующие блоковое и сверточное кодирование.

В случаях применения помехоустойчивого кодирования в системах передачи дискретной информации на железнодорожном транспорте выбирались не самые эффективные коды. Это связано с тем, что их реализация требует применения достаточно сложных алгоритмов кодирования и декодирования, а при высоких скоростях передачи данных выбор приходилось делать в пользу простоты кода и в ущерб пропускной способности канала. Достижения в области микропроцессорной техники за последнее десятилетие позволяют реализовывать наиболее эффективные коды при высокой скорости передачи данных и еще более повышать эту скорость по мере дальнейшего развития аппаратно-программных средств.

Один из новейших и в настоящее время активно внедряющихся стандартов беспроводной связи – стандарт IEEE 802.16–2004 (WiMAX), который предусматривает последовательное использование средств, способствующих повышению помехоустойчивости: перемежение, кодирование Рида-Соломона, сверточное кодирование. Помимо этих операций к цифровой обработке данных относится модуляция и демодуляция. При проектировании устройств связи одной из основных задач является минимизация стоимости конечного продукта, что требует использования наиболее дешевых микропроцессорных средств. Другим требованием является простота и надежность устройства.

Современные микропроцессоры имеют разнообразные аппаратные средства повышения производительности вычислений. К ним относятся SIMD- и MIMD-архитектуры, обеспечивающие параллельную синхронную и асинхронную обработку данных на одном кристалле, мультискалярная архитектура, при которой процессор способен автоматически группировать несколько последовательных простых команд для выполнения их в течение одного такта вычислений, и архитектура с системой команд, предусматривающей возможность объединения нескольких простых команд в одну инструкцию еще на этапе программирования [4]. В последнем случае необходимо выработать ряд правил, руководствуясь которыми можно было бы быстро оценить максимально возможную скорость работы алгоритма на определенном типе процессора, а при написании программы – получить оптимальный код программы.

Перечисленные архитектурные особенности современных процессоров позволяют реализовать на базе одного кристалла полный цикл обработки данных для приема и передачи,

включая кодирование, декодирование, модуляцию, демодуляцию и другие функции, не прибегая к использованию в составе аппаратного средства дополнительных модулей, например ПЛИС, что упрощает архитектуру и схемотехнику всей системы.

В статье рассматривается класс процессоров, архитектура которых позволяет группировать несколько команд в одну инструкцию, выполняемую за один такт. Одни из представителей этого класса – процессоры семейства «Мультикор» отечественного производства. Все выводы можно будет обобщить и для других процессоров, имеющих сходное построение архитектуры.

Система команд подразделяется на несколько частей: арифметические операции, команды типа умножение или сдвиг, команды обмена с памятью данных (использующие адресные регистры). Благодаря тому, что разные типы операций задействуют различные устройства ядра процессора, они могут быть сгруппированы и записаны в виде одной инструкции. В процессорах семейства «Мультикор» ядро содержит второе адресное устройство, позволяющее дополнительно выполнять чтение из памяти данных параллельно с любыми другими адресными операциями.

Получение блоковых кодов и их декодирование основано на арифметике в полях Галуа [2]. Операция сложения в поле Галуа имеет смысл операции поразрядного исключающего «или» (сложения по модулю два). Умножение в поле имеет более сложный вид и не может быть заменено операциями обычной битовой или байтовой арифметики. Многие процессоры, к сожалению, не имеют операции умножения в поле Галуа, и в таких случаях вычисления основаны на использовании двух таблиц – степеней и логарифмов. С помощью таблицы логарифмов каждому элементу поля сопоставляется степень, в которую необходимо возвести примитивный элемент, чтобы получить заданный элемент. А таблица степеней, напротив, необходима для сопоставления каждой степени (от 0 до 254) того элемента, который будет получен при возведении в эту степень примитивного элемента поля. Для умножения двух чисел сначала необходимо найти их логарифмы, сложить их, определить остаток от деления полученной суммы на число 255, что даст степень искомого произведения, и, наконец, возвести 2 в полученную степень. Используя общепринятые обозначения, произведение элементов a и b можно записать в виде выражения:

$$a \otimes b = 2^{(\log_2 a + \log_2 b) \bmod 255}, \quad (1)$$

где $\otimes$ – операция произведения в поле Галуа; mod – операция определения остатка от целочисленного деления (она заменяется проверкой, превышает ли сумма значение 254, и вычитанием величины 255 в положительном случае), а возведение в степень и взятие логарифма выполняются табличным способом.

Информационное сообщение представляется полиномом $d(x)$, в котором членами при степенях x являются информационные байты. Порождающим называется полином $g(t)$, зависящий от свойств кода Рида-Соломона, степень которого равняется $2t - 1$, где t – количество ошибок, которое способен исправить код внутри одного блока (в приведенном случае $t = 8$).

Будем рассматривать систематический код Рида-Соломона, когда закодированное сообщение содержит информационную часть в явном виде. В этом случае кодирование представляет собой деление полинома $x^{2t} \cdot d(x)$ на порождающий полином $g(x)$ и получение остатка $b(x)$. Кодовым словом (закодированным сообщением) называется сумма

$$c(x) = x^{2t} \cdot d(x) + b(x). \quad (2)$$

Такой способ кодирования используется наиболее широко, а его реализация, схема которой приведена на рисунке, напоминает схему авторегрессионного фильтра [2, 5]. Значениями g_j и b_j обозначены члены соответствующих полиномов $g(x)$ и $b(x)$. Квадратными блоками обозначены регистры задержки.

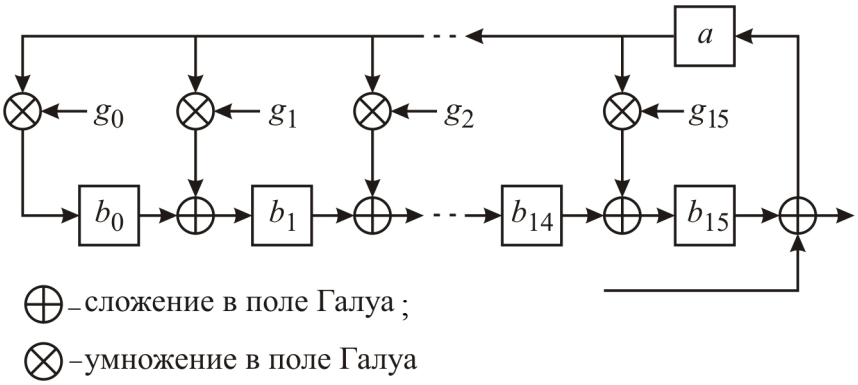
С поступлением каждого информационного байта сначала вычисляется значение a, после чего выполняется цикл, состоящий из элементарных операций кодирования:

$$b_j = b_{j-1} \oplus \left(g_j \otimes a \right). \quad (3)$$

С учетом формулы (1) выражение (3) записывается в виде:

$$b_j = b_{j-1} \oplus 2^{(g_j + \log_2 a) \bmod 255}, \quad (4)$$

где g_j – коэффициенты порождающего полинома в логарифмической форме.



Структурная схема кодера

Разложим выражение (4) на простые операции (арифметические и адресные), каждой из которых соответствует одна команда процессора. К арифметическим командам можно отнести сложение, проверку условия, условное вычитание, исключающее «или». К командам, работающим с адресными регистрами, относятся операции обмена с памятью, а также загрузки номера строки таблицы степеней в индексный регистр (адресация по индексу позволяет загружать значение, расположенное с нужным смещением относительно базового адреса – начала таблицы). Последовательность команд, соответствующая полному вычислительному циклу по формуле (4), приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Разложение элементарной операции кодирования на команды

Номер команды	Арифметические команды	Команды пересылки
1		Загрузка $g_j \rightarrow R0$; $b_{j-1} \rightarrow R4$
2	$[g_j + a]$: $R0 + R2 \rightarrow R6$	
3	Проверка условия $R6 \geq 255$	
4	$R6 - 255 \rightarrow R6$, если условие верно	
5		$R6 \rightarrow$ Номер строки в таблице степеней
6		Загрузка из таблицы степеней $\rightarrow R8$
7	$[b_j = b_{j-1} \oplus (g_j \otimes a)]$: $R4 \oplus R8 \rightarrow R10$	
8		Сохранение $R10$ (b_j)

Как видно из данных таблицы 1, элементарная операция кодирования (4) состоит из четырех арифметических команд (из которых одна – условная, т. е. выполняется не всегда) и пяти адресных. Используя возможность параллельной обработки разного типа команд, требуется сгруппировать их наиболее оптимальным способом так, чтобы количество полученных инструкций было минимальным.

Исходя из архитектуры рассматриваемого процессора граничным минимальным значением количества инструкций можно считать число

$$N_{\min} = \max\left[N_{\text{арифм}},\ N_{\text{умнож}},\ N_{\text{адрес}}\right] + N_{\text{усл}}, \quad (5)$$

где $N_{\text{арифм}}$ – количество безусловных арифметических операций; $N_{\text{умнож}}$ – количество безусловных команд умножения или битового сдвига; $N_{\text{адрес}}$ – количество безусловных операций, которые задействуют адресные регистры (если используется более одной команды загрузки, количество таких операций можно уменьшить на единицу); $N_{\text{усл}}$ – количество условных команд.

В соответствии с выражением (5) приведенная в таблице 1 последовательность команд может быть упакована в виде пяти инструкций, поскольку имеется четыре команды пересылки и одна условная операция исключающего «или».

Для группировки команд в инструкции все простые операции процессора запишем в виде последовательного выполнения в течение нескольких итераций (таблица 2) так, чтобы выполнялись требования:

– общая последовательность команд определяется номером инструкции внутри итерации; после выполнения всех команд (k–2)-й итерации выполняется (k–1)-я, а затем – k-я итерация;

– в одной строке должны группироваться команды разных типов (исключение может быть сделано только для одной команды загрузки);

– условные операции нельзя группировать с безусловными;

– если значение в некоторый регистр помещается в m-й инструкции (k–1)-й итерации, то оно должно быть использовано не позднее чем в m-й инструкции k-й итерации;

– количество итераций должно быть минимально возможным.

Таблица 2 – Группировка команд кодера в инструкции

Номер инструкции	Номер итерации		
	k – 2	k – 1	k
1	Загрузка $g_j \rightarrow R0$	$R0 + R2 \rightarrow R6$	$R6 \rightarrow$ Номер строки в таблице степеней
2		Загрузка $b_{j-1} \rightarrow R4$	Загрузка из таблицы степеней $\rightarrow R8$
3		Проверка условия $R6 \geq 255$	$R4 \oplus R8 \rightarrow R10$
4		$R6 - 255 \rightarrow R6$, если условие верно	Сохранение $R10$ (b_j)
5			

Таким образом, основное тело цикла будет содержать пять инструкций в соответствии с таблицей и будет выполняться за пять тактов. Каждой k-й итерации цикла должны предшествовать две – (k–1)-я и (k–2)-я, но поскольку для первой и второй итераций цикла это не выполняется, перед циклом необходима преамбула, состоящая из команд (k–2)-го и (k–1)-го столбцов.

Декодирование выполняется по более сложному алгоритму и за несколько этапов. Существует около десятка различных методов декодирования [5 – 8], но наиболее популярной до настоящего времени остается схема Питерсона-Горенстейна-Цирлера [2, 5], использующая синдромный способ декодирования. В соответствии с ней на первом этапе определяется синдромный полином (он несет информацию о позициях и величинах ошибок), затем – полином локаторов ошибок, находятся его корни (позиции ошибок), и, наконец, по алгоритму Форни [2] вычисляются значения ошибок. Наиболее вычислительно затратная часть – это определение синдрома, поэтому далее ограничимся только этим элементом алгоритма.

Принятое сообщение по аналогии с кодовым словом (2) представляется в виде полинома $v(x)$ и при наличии ошибок отличается от многочлена $c(x)$. Для вычисления синдромного полинома $s(x)$ необходимо последовательно найти все его j-е компоненты путем определения значений $v(x)$ в точках 2^j [2]:

$$\mathrm{s_j} = \mathrm{v}\left(2^{\mathrm{j}}\right). \tag{6}$$

Если принятое сообщение имеет длину n, то синдром определяется двойным вложенным циклом, состоящим из n и 16 повторений, а тело цикла содержит изменение j-го компонента синдрома:

$$s_j = \oplus\left[v_i \otimes 2^{j(n-i)}\right], \quad i = \overline{1,\, n}, \quad j = \overline{0,\, 15}. \tag{7}$$

Используя выражение (1), элементарную операцию (7) можно записать в виде формулы:

$$s_j = s_j \oplus 2^{(v_i + j(n-i)) \bmod 2}. \tag{8}$$

Последовательность команд процессора, выполняющая эти вычисления, приведена в таблице 3.

Таблица 3 – Разложение элементарной операции вычисления синдрома в декодере на команды

Номер команды	Арифметические команды	Команды пересылки
1	$[v_j = v_j + (n - i)]$: $R2 + R4 \rightarrow R2$	
2	Проверка условия $R2 \geq 255$	
3	$R2 - 255 \rightarrow R2$, если условие верно	
4		$R2 \rightarrow$ Номер строки в таблице степеней
5		Загрузка из таблицы степеней $\rightarrow R6$
6		Загрузка $s_j \rightarrow R0$
7	[Формула (9)]: $R0 \oplus R6 \rightarrow R8$	
8		Сохранение $R8$ (s_j)

В соответствии с выражением (5) количество инструкций для представления формулы (8) не может быть меньше четырех, поскольку имеется одна условная операция, три арифметических и четыре адресных (из которых одна – загрузка, которая может быть объединена с любой другой адресной командой). Сгруппированные инструкции приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Группировка команд подпрограммы вычисления синдрома декодера в инструкции

Номер инструкции	Номер итерации		
	$k - 2$	$k - 1$	k
1	$R2 + R4 \rightarrow R2$	Загрузка из таблицы степеней $\rightarrow R6$	Сохранение $R8$ (s_j)
2	Проверка условия $R2 \geq 255$	Загрузка $s_j \rightarrow R0$	
3	$R2 - 255 \rightarrow R2$, если условие верно		
4	$R2 \rightarrow$ Номер строки в таблице степеней	$R0 \oplus R6 \rightarrow R8$	

На базе процессора NVCom, относящегося к серии «Мультикор», были реализованы кодеры и декодеры Рида-Соломона для нескольких кодов, исправляющих от двух до восьми ошибок, которые используются в стандарте WiMAX (все коды являются частным случаем кода RS(255, 239, 8) и образуются путем стирания разного количества информационных или контрольных байт).

Вычислительные затраты и полученные результаты быстродействия для кодера и трех частных декодеров приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Аналитические и практические результаты работы подпрограмм кодирования и декодирования

Алгоритм	Количество циклов кодирования (4) или вычисления синдрома (8) на один байт	Количество тактов на один байт	
		по формуле (5)	получено при реализации программы
Кодер	16	80	92
Декодер RS(40, 36, 2)	17,7	71	86
Декодер RS(64, 48, 8)	21,3	85	98
Декодер RS(108, 96, 6)	18	72	82

Число элементарных операций кодирования (4) и декодирования (8) и количество тактов указаны в таблице 5 в относительном виде из расчета на один обрабатываемый байт полезной информации. Все приведенные значения для декодирования касаются лишь задачи вычисления синдрома. Определение синдрома при использовании разных кодов занимает от 40 до 65 % всего вычислительного времени декодирования.

Таким образом, в настоящее время существует новая элементная база отечественного производства, которая может применяться для реализации цифровой связи в соответствии с современными стандартами, такими как WiMAX. Цифровая связь может перекрыть все существующие потребности: передачу любой служебной информации, звуковой и видеоинформации, доступ к интернет-ресурсам.

Программирование многоядерных сигнальных контроллеров, например Мультикора, является достаточно трудоемким процессом, поэтому требуется формализовать оценку быстродействия всех программных частей. В настоящей статье сделана попытка такой формализации.

Описанные рекомендации по оценке количества тактов на элементарный вычислительный цикл по формуле (5) и группировке команд при программировании могут быть обобщены и на другие процессоры. Исходя из архитектуры ядра и входящих в него устройств определяются типы команд, которые могут быть сгруппированы, затем – минимальное число инструкций на цикл. После определения количества циклов, что зависит от используемого алгоритма, находится общая оценка вычислительных затрат, которая полезна при выборе вычислительных средств на первом этапе проектирования, при сравнении различных вычислительных алгоритмов решения одной задачи, а также в процессе программирования.

Список литературы

1. Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение [Текст] / Б. Скляр. – М.: Вильямс, 2003. – 1104 с.

2. Блейхут, Р. Теория и практика кодов, контролирующих ошибки [Текст] / Р. Блейхут. – М.: Мир, 1986. – 576 с.

3. Золотарев, В. В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы [Текст] / В. В. Золотарев, Г. В. Овечкин. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 126 с.

4. Сперанский, В. С. Сигнальные микропроцессоры и их применение в системах телекоммуникаций и электроники [Текст] / В. С. Сперанский. – М.: Горячая линия – Телеком, 2008. – 168 с.

5. Кларк, Дж. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи [Текст] / Дж. Кларк, Дж. Кейн. – М.: Радио и связь, 1987. – 391 с.

6. Ning Chen. Complexity analysis of Reed-Solomon decoding over GF(2^m) without using syndromes [Электронный ресурс] / Ning Chen, Zhiyuan Yan : http://arxiv.org/pdf/0803.0731v2

7. Didier, F. Efficient erasure decoding of Reed-Solomon codes [Электронный ресурс] / F. Didier : http://arxiv.org/pdf/0901.1886v1

8. Moon, T. K. Error correction coding. Mathematical methods and algorithms [Текст] / T. K. Moon. – Wiley, 2005. – 800 p.

УДК 624.012.46.001.24

С. А. Бокарев, Д. Н. Цветков

ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МОСТОВ ПО ДИНАМИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ

В статье представлен экспресс-метод оценки технического состояния динамических параметров эксплуатируемых сталежелезобетонных пролетных строений по динамическим параметрам.

Результаты обследования эксплуатируемых сталежелезобетонных пролетных строений железнодорожных мостов свидетельствуют о наличии достаточно большого количества дефектных пролетных строений, имеющих повреждения железобетонной плиты, снижающие их грузоподъемность. Оценку грузоподъемности осуществляют, используя основные положения СНиП 2.05.03-84*. Мосты и трубы [1] и отдельные рекомендации руководств по определению грузоподъемности железобетонных и металлических пролетных строений [2, 3]. Такой подход реализован в НИИ мостов [4] и в Сибирском государственном университете путей сообщения (СГУПСе) [5]. В соответствии с требованиями указанных нормативных документов необходимо проведение значительного комплекса работ по обследованию и испытанию, в процессе которых выявляются дефектные пролетные строения. Перечисленные методики требуют определения прочностных параметров железобетонной плиты и напряжений в поясах металлических балок.

Более оперативно и с меньшими трудозатратами информацию о состоянии конструкций можно получить, применяя экспресс-метод оценки технического состояния сталежелезобетонных пролетных строений по динамическим параметрам, разработанный авторами статьи. Основные положения метода соответствуют требованиям нормативных документов [6, 7].

Метод базируется на сопоставлении параметров расчетного и экспериментального отклика (реакции) сооружения на динамическое воздействие от внешней нагрузки. Признаком наличия неисправностей является уменьшение величины низшей частоты собственных колебаний конструкции по сравнению с ее значением для исправной конструкции. Оценка технического состояния по предлагаемому методу позволяет выявлять изменения в работе пролетного строения в целом, т. е. указывает на наличие повреждений на пролетном строении, связанных с нарушением монолитности плиты.

Необходимо определить значения частоты собственных вертикальных и поперечных горизонтальных колебаний пролетного строения. Рекомендуемой для измерения величиной является ускорение элементов пролетного строения при свободных колебаниях после схода нагрузки с сооружения или после кратковременного динамического воздействия на конструкцию груза малой массы.

Для выполнения измерений целесообразно применять автоматизированные измерительные системы, имеющие в своем составе акселерометры для записи колебаний. В СГУПСе разработан электронный измерительный комплекс «Тензор МС+» [8], в состав которого входят измерительный блок системы, карманный компьютер класса Pocket PC, датчики деформаций и вибродатчики-акселерометры. Комплекс зарегистрирован в Государственном реестре средств измерения и имеет сертификаты Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии RU.C.27.007.A № 31740 и RU.C.34.007.A № 32603. Измерительный блок системы имеет восемь каналов для подключения датчиков и состоит из электронного контроллера и модуля передачи данных Bluetooth. Управление системой и сохранение данных осуществляется командами карманного компьютера.

В качестве первичного преобразователя в акселерометрах комплекса применен пьезоэлектрический однокомпонентный сейсмоприемник А1612 (ЗАО «Геоакустика»), предназначенный для преобразования ускорений, действующих вдоль его измерительной оси, в пропорциональные электрические сигналы. Некоторые технические параметры сейсмоприемника приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические параметры сейсмоприемника

Параметр сейсмоприемника	Значение технического параметра
Число каналов	1
Рабочий диапазон частот	От 0,2 до 400 Гц
Предел допускаемой основной относительной погрешности, не более	2 %
Максимально измеряемое виброускорение (при номинальном коэффициенте преобразования и напряжении питания ±12 В)	5 $м \cdot с^{-2}$
Интегральный шум в рабочем диапазоне частот, не более	$2 \cdot 10^{-5}$ $м \cdot с^{-2}$
Номинальное напряжение питания (диапазон возможных значений)	±12 (от 5 до15) В
Масса	0,1 кг
Длина соединительного кабеля (при исполнении без кабеля – соединитель на корпусе)	1 (от 0,2 до10) м
Положение сейсмоприемника в пространстве	Произвольное
Диапазон значений рабочей температуры	−40 … + 50°С

Акселерометр смонтирован внутри специального прямоугольного корпуса, позволяющего устанавливать его в любом направлении. Один из таких акселерометров показан на рисунке 1,а. Акселерометры, как правило, устанавливают в середине пролета на нижнем (или верхнем) поясе одной из металлических балок (рисунок 1,б).

Для возбуждения процесса колебаний конструкции рекомендуется прикладывать импульсное воздействие сосредоточенного груза малой массы 80 – 100 кг в середине пролетно-

го строения в трех местах – слева и справа – с эксцентриситетом по отношению к оси пролетного строения и по оси пролетного строения внутри рельсовой колеи.

а б

Рисунок 1 – Установка датчиков электронной измерительной системы:
а – акселерометр, смонтированный внутри прямоугольного корпуса;
б – датчики, установленные на элементах балки

Значения собственной частоты определяются по записанным виброграммам ускорений с использованием математического аппарата обработки случайных сигналов. В теории анализа сигналов применяется переход от временной реализации в частотную область, что позволяет определить динамические характеристики конструкции. Представление уже оцифрованного сигнала в частотной области базируется на быстром преобразовании Фурье (БПФ) дискретного сигнала, что является стандартным приемом.

Графическая интерпретация связи между временной и частотной областями представления сигнала приведена на рисунке 2. Получены динамические характеристики конструкции, представленные на рисунке 3 линиями в частотной области.

Наиболее часто при использовании БПФ сигнала применяется способ графического представления функции спектральной плотности мощности (СПМ) для идентификации энергии, содержащейся в каждой моде, что, по сути, является методом оценки мощности колебаний, содержащейся внутри некоторого интервала частот.

Как известно, алгоритм БПФ имеет несколько недостатков. Первый состоит в том, что он может обрабатывать только периодический сигнал. Эта проблема решается искусственным повторением записи сигнала. Вторая проблема – так называемое растекание спектра. Если при периодическом повторении сигнала начальное и конечное значения сигнала существенно различается, на стыках сегментов возникают скачки, из-за которых спектр расширяется.

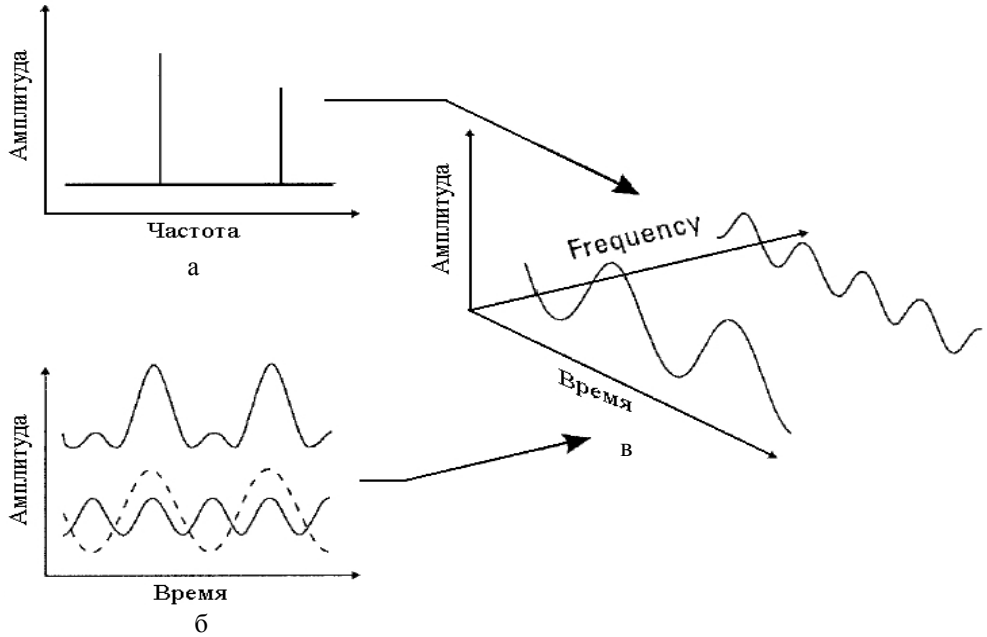
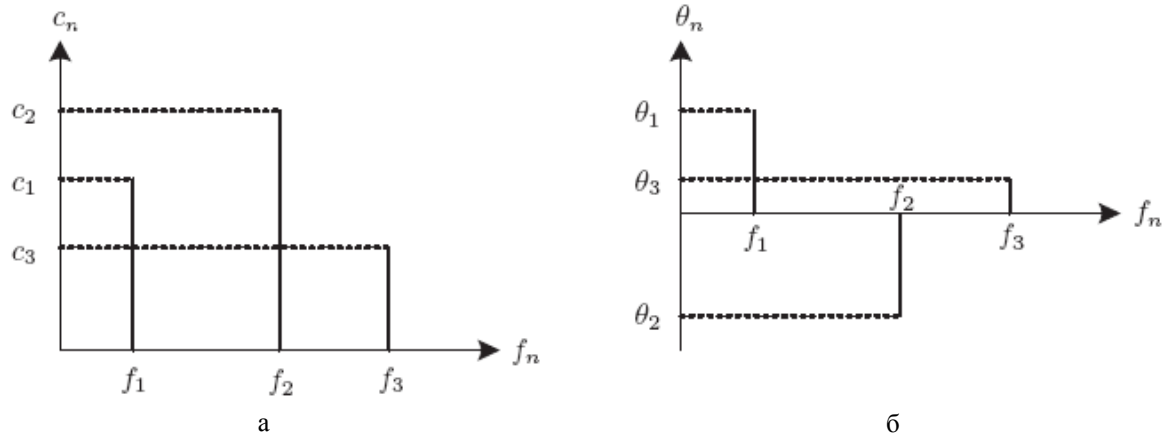


Рисунок 2 – Иллюстрация связи между временной и частотной областями представления сигнала



а б

Рисунок 3 – Результат БПФ дискретного сигнала с амплитудой и фазовым углом

Для определения собственных частот используется так называемый метод пиковых значений (peak picking (PP) method). Собственные частоты определяются по экстремальным значениям графика функции СПМ. Для построения спектральных оценок в литературе по обработке сигналов предлагается много алгоритмов. В рамках данной работы выбраны два метода – метод периодограмм и метод Уэлча (Welch).

Метод периодограмм состоит в вычислении прямого преобразования Фурье для всего выбранного участка сигнала и построения гистограммы по полученным коэффициентам. Так, имея массив амплитуд сигнала *Y* размером *N*, можно получить спектр сигнала *S* по формуле:

$$S[i] = \frac{1}{M}\sqrt{(\sum_{k=1}^{N} Y[k]\cos(\frac{2\pi ki}{N}))^2 + (\sum_{k=1}^{N} -Y[k]\sin(\frac{2\pi ki}{N}))^2},$$

где $i = 1...M,\ M = N/2 + 1.$

Как правило, при вычислении периодограммы по длинному сегменту случайного сигнала она оказывается весьма изрезанной, что вызывает определенные трудности при выделении частот спектра с наибольшей энергией. Для уменьшения изрезанности необходимо применять какое-либо усреднение, реализованное, например, в методе Уэлча (он называется еще методом усреднения модифицированных периодограмм – averaged modified periodogram method). В этом методе – два усовершенствования: использование весовой функции и разбиение сигнала на перекрывающиеся фрагменты. Применение весовой функции позволяет ослабить растекание спектра и уменьшить смещение получаемой оценки спектра плотности мощности ценой незначительного ухудшение разрешающей способности. Перекрытие сегментов введено для того, чтобы увеличить их число и уменьшить дисперсию оценки. Вычисления по методу Уэлча организуются следующим образом.

1. Вектор отсчетов сигнала делится на перекрывающиеся сегменты. Как правило, на практике используется перекрытие на 50 %. Строго говоря, оптимальная степень перекрытия зависит от используемой весовой функции (окна). В литературе приводятся данные о том, что для гауссовских случайных процессов при использовании окна Ханна минимальная дисперсия оценки спектра плотности мощности получается при перекрытии сегментов на 65 %.

В программе длина сегмента равна квадратному корню от длины вектора входных данных, округленному вверх до ближайшей степени числа 2.

2. Каждый сегмент умножается на используемую весовую функцию (окно).

Доступны весовые функции, приведенные в таблице 2.

3. Для взвешенных сегментов вычисляются модифицированные периодограммы.

Выбор весовой функции зависит от характера сигнала и осуществляется по результатам визуального анализа графика функции СПМ.

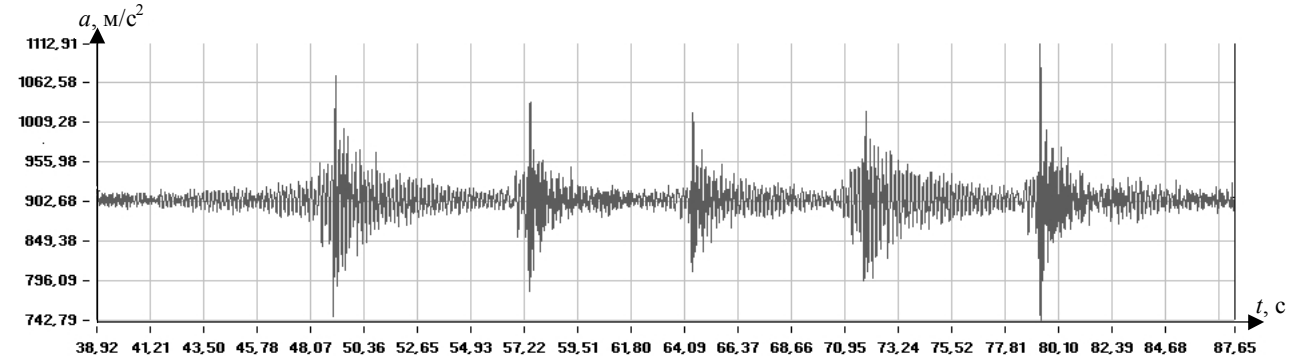
Таблица 2 – Весовые функции

Весовая функция	Значение весовой функции
Прямоугольное окно	$\omega(n) = 1$
Окно Гаусса	$\omega(n) = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{n-(N-1)/2}{\sigma(N-1)/2}\right)^2}$ при $\sigma \le 0,5$
Окно Хэмминга	$\omega(n) = 0,53836 - 0,46164\cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right)$
Окно Ханна	$\omega(n) = 0,5\left(1-\cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right)\right)$
Окно Бартлетта	$\omega(n) = \frac{2}{N-1}\left(\frac{N-1}{2} - \left\lvert n - \frac{N-1}{2}\right\rvert\right)$
Треугольное окно	$\omega(n) = \frac{2}{N}\left(\frac{N}{2} - \left\lvert n - \frac{N-1}{2}\right\rvert\right)$
Окно Блэкмэна	$\omega(n) = a_0 - a_1\cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) + a_2\cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right)$; $a_0 = 0,42$; $a_1 = 0,5$; $a_2 = 0,08$, где N – количество отсчетов в блоке

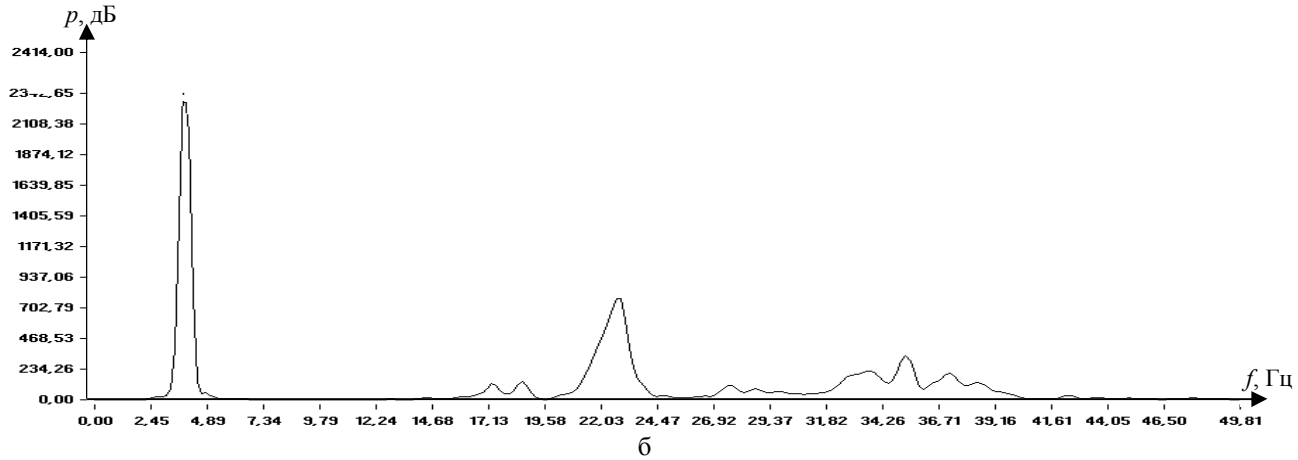
4. Периодограммы всех сегментов усредняются.

Так как идеально чистых сигналов не существует и в них всегда присутствуют составляющие, искажающие сигнал, то записанные виброграммы требуют предварительной обработки перед определением частотных характеристик. Необходимо выполнить удаление тренда, высокочастотных составляющих, шумов и случайных выбросов.

Визуальная обработка графиков СПМ (рисунок 4) позволяет определить значения частоты колебаний, соответствующих колебаниям с наибольшей энергией, которые на графиках отражаются максимумами функции.



а



б

Рисунок 4 – Графики сигнала акселерометра и функции спектральной плотности:
а – график сигнала акселерометра от импульсных воздействий;
б – график функции спектральной плотности сигнала акселерометра

Описанный алгоритм определения собственных частот колебаний реализован в виде сервисных программных средств измерительного комплекса «Тензор МС+».

Сталежелезобетонные пролетные строения представляют собой конструкцию с переменными по длине пролета жесткостью и массой. Повреждения в плите приводят к неравномерному изменению жесткости по длине пролетного строения. Для определения расчетных значений собственной частоты ω, соответствующих первой форме собственных колебаний пролетных строений, возникает необходимость численного решения, например, методом конечных элементов (МКЭ). Алгоритм определения значения собственной частоты основан на методе адаптации конечно-элементных моделей и подробно изложен в статье [9]. Используемые для расчета конечно-элементные модели показаны на рисунке 5. Решение задачи об определении собственных частот выполнено в среде COSMOS/M.

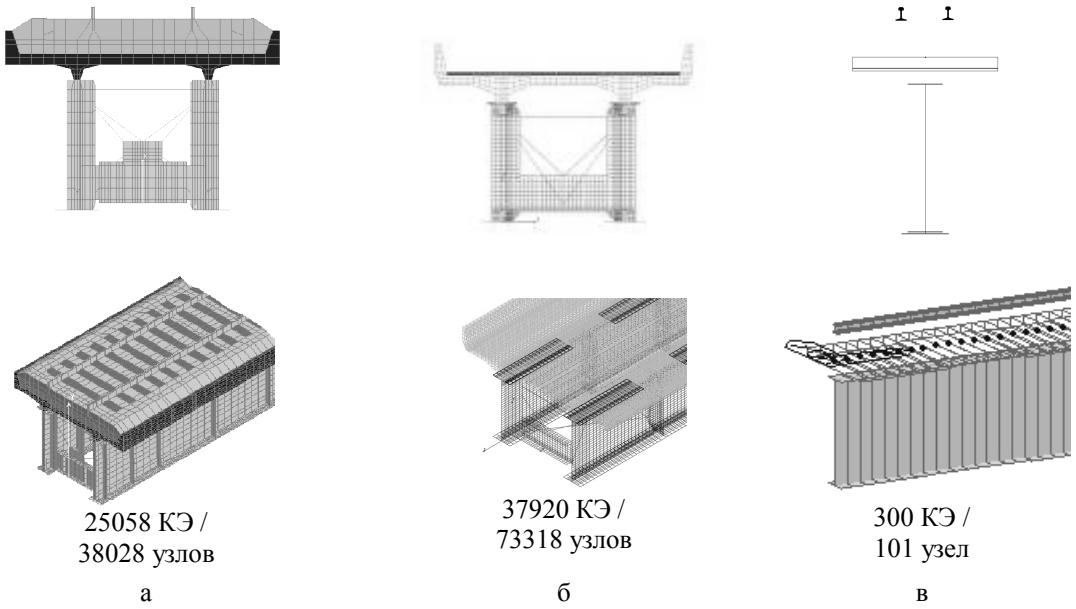


Рисунок 5 – Конечно-элементная модель пролетного строения:
а – модель 1 и 2; б – 3 и 4; в – 5 и 6

Расчетные значения собственной частоты ω получены при двух значениях толщины слоя балласта $h_б$ – 35 и $h_б$ – 65 см. На рисунке 6 приведены расчетные значения частоты ω для пролетных строений, изготовленных по типовому проекту инв. № 739 в зависимости от толщины балласта и технического состояния конструкций. Для промежуточных значений $h_б$ частоту ω следует определять по интерполяции.

На основании изложенного можно коротко перечислить этапы работы по предлагаемой методике экспресс-оценки технического состояния эксплуатируемых сталежелезобетонных пролетных строений железнодорожных мостов.

1. Установка элементов измерительного комплекса на пролетном строении.

2. Определение толщины балласта на пролетном строении.

3. Проведение измерений при импульсных воздействиях малой интенсивности. Запись виброграмм в память компьютера.

4. Обработка результатов измерений. Определение первой собственной частоты.

5. Сравнение величин измеренной и расчетной частоты собственных колебаний с учетом толщины балластного слоя.

6. Заключение о техническом состоянии пролетного строения. Уменьшение первой (низшей) частоты собственных колебаний пролетного строения более чем на 15 % является признаком снижения несущей способности пролетного строения. Обоснование величины граничного значения в 15 % изложено в работе [10].

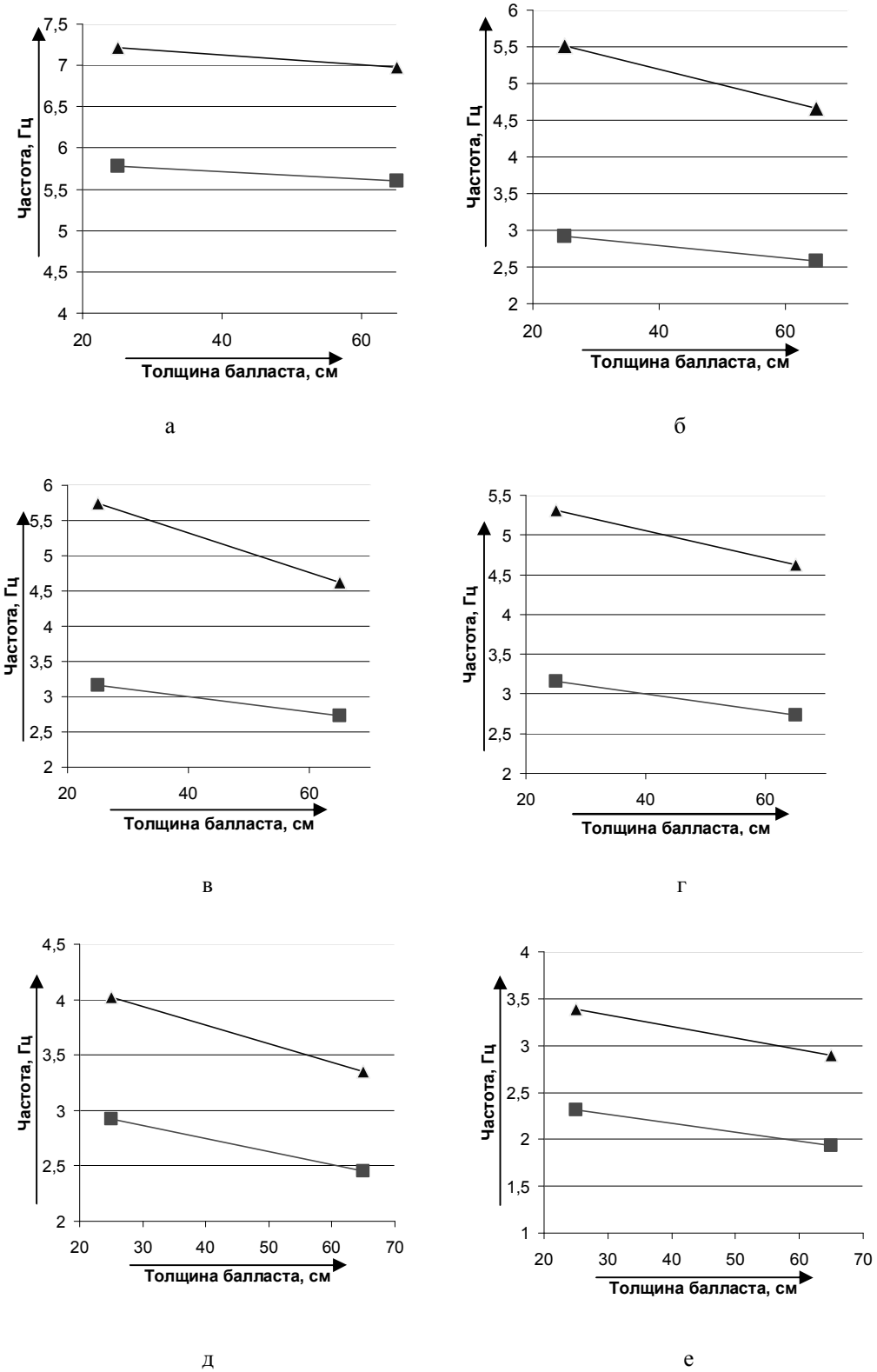


Рисунок 6 – Зависимость частоты от толщины балласта и состояния пролетных строений. Граничные значения частоты, м: а – -18,2; б – -23,0; в – -27,0; г – -33,6; д – -45,0; е – -55,0

Список литературы

1. СНиП 2.05.03-84*. Мосты и трубы [Текст] / Минстрой России – М., 1996. – 214 с.
2. Руководство по определению грузоподъемности металлических пролетных строений железнодорожных мостов [Текст] – М.: Транспорт, 1987. – 272 с.
3. Руководство по пропуску подвижного состава по железнодорожным мостам [Текст]. – М.: Транспорт, 1993. – 368 с.
4. Разработка методики оценки грузоподъемности сталежелезобетонных пролетных строений эксплуатируемых железнодорожных мостов [Текст]: Отчет о НИР (промежуточ.) / НИИ мостов; рук. Кондратов В. В. – СПб, 2002. – 83 с.
5. Рогова, Е. В. Оценка грузоподъемности сталежелезобетонных пролетных строений железнодорожных мостов с учетом их технического состояния и эксплуатационных параметров [Текст]: дис… канд. техн. наук. – Новосибирск, 2009 – 148 с.
6. СНиП 3.06.07-86. Мосты и трубы: Правила обследования и испытаний [Текст] / Госстрой СССР. – М., 1987. – 41 с.
7. Инструкция по содержанию искусственных сооружений (ЦП-628) [Текст] – М.: Транспорт, 1999. – 108 с.
8. Малогабаритные автоматизированные системы для диагностики ИССО [Текст] / С. А. Бокарев, А. Н. Яшнов и др. // Путь и путевое хозяйство. – 2007. – № 9. – С. 25 – 26.
9. Цветков, Д. Н. Определение граничных значений динамических параметров сталежелезобетонных пролетных строений при оценке их технического состояния [Текст] / Д. Н. Цветков // Вестник Сибирского гос. ун-та путей сообщения. – 2009. – Вып. 21. – С. 89 – 95.
10. Результаты полномасштабного обследования и испытания сталежелезобетонных пролетных строений железнодорожных мостов Сибири и Дальнего Востока [Текст] / С. А. Бокарев, Л. Ю. Соловьев и др. // Вестник Томского гос. архитектурно-строительного ун-та. – 2009. – № 2. – С. 160 – 170.

УДК 534.625.2.001:625.1.03:629.4.032

И. И. Галиев, В. А. Нехаев, В. А. Николаев

БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ, ПРОБЛЕМЫ ТЯГИ И ДИНАМИКИ ПОЕЗДА И ИХ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ ФРАКЦИОННОГО АНАЛИЗА

В статье рассмотрены проблемы исследования устойчивости железнодорожного поезда. Указано на необходимость математической проработки получаемых систем дифференциальных уравнений: проведение нормализации, оценка постоянных времени и введение малых параметров. Основным математическим аппаратом служит теорема академика А. Н. Тихонова, позволяющая выполнить разделение движения системы на «быстрые» и «медленные» составляющие. Приведены результаты исследования разброса значений конструктивных элементов рамы тележки вагона на динамическую нагруженность ее узлов и на безопасность движения поезда.

Известно, что с качеством работы железнодорожного транспорта тесно связана экономическая и социальная эффективность развития Российской Федерации в целом. Несмотря на сложные экономические условия железнодорожный транспорт нашей страны обеспечивает транспортировку 80 % промышленных и сырьевых товаров. Вместе с этим существуют проблемы, связанные с недостаточным обеспечением необходимого уровня безопасности движения поездов, а также с накоплением дефектов верхнего строения пути и износом узлов подвижного состава.

Вследствие недостаточной связанности надрессорной балки с боковыми рамами, обусловленной конструктивным несовершенством и завышением фрикционных клиньев, а так-

же часто встречающимися большими (до 20 мм и более) зазорами между буксами и рамами тележки, происходит увеличение угла набегания гребней колес на головки рельсов. Это является причиной возникновения интенсивных колебаний виляния и боковой качки кузова вагона и значительных продольных ускорений его узлов, обусловливающих их повышенное напряженно-деформированное состояние.

Ударное взаимодействие боковых рам с буксовыми узлами в поперечном относительно оси пути направлении приводит к появлению дефектов торцового крепления и задиров на торцах роликов (дефектов типа «елочка»), накоплению продуктов износа и последующему возможному заклиниванию роликов – главным причинам горячего излома шейки оси колесной пары. При этом имеет место интенсивный износ сопрягаемых поверхностей пар трения узлов надрессорной балки, клиновых гасителей колебаний, фрикционных планок и деталей буксовых подшипников и нарушение работоспособности торцового крепления, что приводит к значительным затратам на ремонт вагона в целом и негативно влияет на безопасность движения поезда.

В груженом состоянии вследствие недостаточной гибкости рессорного подвешивания и избытка диссипативных сил вагон оказывает повышенное динамическое воздействие на верхнее строение пути, особенно в кривых его участках, вызывая повышенное сопротивление движению из-за увеличенных углов набегания гребней колес на рельсы. Так, по данным исследований Ассоциации американских железных дорог, всего один миллирадиан перекоса приводит к созданию дополнительной силы сопротивления 0,55 кг на тонну веса поезда. Сотрудниками кафедры «Теоретическая механика» ОмГУПСа в результате опытных поездок экспериментально установлено, что вследствие больших продольных зазоров в челюстных проемах между буксами и боковыми рамами углы набегания гребней колес на рельсы могут достигать семи миллирадиан. Такие явления приводят к значительному перерасходу энергии на тягу поезда, к интенсивному подрезу гребней колес и боковому износу головок рельсов.

Состояние транспортных средств в настоящее время не полностью отвечает современным требованиям по безопасности движения и по грузоподъемности и скорости доставки грузов, что снижает конкурентоспособность российских железных дорог в целом. Именно из-за этого, например, доля перевозки контейнеров по железнодорожному транспортному коридору «Восток – Запад» составляет всего 1 % от мирового грузооборота, несмотря на сложную обстановку в отдельных регионах Мирового океана.

Количество случаев брака особого учета в грузовом движении остается значительным, особенно из-за схода вагонов с рельсов и излома боковых рам тележек: оно ежегодно составляет около 20 – 30 случаев (10 изломов боковых рам тележек и 17 сходов в 2007 г., 9 изломов рам тележек и 24 схода – в 2008 г.). С начала 2009 г. допущено 23 случая брака особого учета. Причиной этого являются неудовлетворительные динамические качества морально устаревших конструкций ходовой части грузовых вагонов.

Известно, что важную роль в динамике подвижного состава играет процесс взаимодействия колеса и рельса, в решающей мере определяющий как тяговые качества локомотива, так и динамику отдельных железнодорожных экипажей (локомотива и вагонов), что и гарантирует безопасность движения поезда в целом. Физическая природа этого процесса до конца не изучена и проблема повышения эффективности эксплуатации подвижного состава все еще не решена окончательно.

Движение рельсовых экипажей главным образом определяется так называемыми силами крипа в точке контакта колес с рельсами [1]. Согласно гипотезам Ф. Картера [2], А. Д. де Патера [3] и Дж. Калкера [4], получившим в настоящее время широкое распространение, силы крипа зависят от «псевдопроскальзывания» в точке контакта. Величины «псевдопроскальзываний» достаточно малы, но силы, ими вызываемые, значительны, следовательно, системы дифференциальных уравнений, описывающие поведение рельсовых экипажей, относятся к системам «жесткого» типа [5]. В ряде работ [6, 7], учитывая малость «псевдопроскальзывания», им совсем пренебрегают, что эквивалентно наложению неголономных связей в точках контакта. Однако такой подход имеет смысл лишь для простейшей системы – одной колес-

ной пары, так как уравнения неголономных связей однозначно определяют ее движение, называемое «кинематическим вилянием». Для систем с числом колес, большим двух, уравнения неголономных связей образуют противоречивую систему [8]. В этом случае обязательно нужно учитывать «псевдопроскальзывание», что резко повышает порядок дифференциальных уравнений. Результаты численного моделирования конкретных экипажей, разброс собственных частот которых достигает трех порядков, приведены в работе [8].

Следовательно, это приводит к появлению составляющих решения, сильно разнесенных по частоте – от «медленных» типа кинематического виляния до «быстрых», определяемых большой жесткостью сил крипа.

На характер поперечных колебаний вагонов поезда оказывают влияние число подвижных единиц в составе и силы взаимодействия между ними. Так, установлен факт существования некоторого критического числа вагонов в составе, превышение которого увеличивает энтропию системы, что нарушает синхронность автоколебаний подвижных единиц и на 20 – 30 % увеличивает горизонтальные силы. Одновременно появляется неравномерность ударов гребней колес последних вагонов о рельсы. Следует предполагать, что дальнейшее увеличение числа подвижных единиц в составе ведет к явлению рассинхронизации их автоколебаний и другим нежелательным режимам. Наличие взаимодействия между вагонами поезда способно превратить неустойчивую подвижную единицу, каковой она является при самостоятельном движении по железнодорожному пути, в устойчивую динамическую систему.

Далее заметим, что теоретическими исследованиями устойчивости локомотива установлено уменьшение критической скорости движения в режиме тяги на 12 – 18 % по сравнению с выбегом. Результаты экспериментальных исследований на катковом стенде [9] привели к следующему «... при развитии колесом тяги возможная поперечная сила сцепления становится меньше, т. е. направляющая способность колеса при его движении уменьшается...». Поэтому сделан вывод о дестабилизирующем влиянии силы тяги локомотива на его динамику. Аналогичный результат получен в Англии А. Р. Реклингтоном [10] путем сопоставления экспериментально измеренных динамических характеристик в горизонтальной плоскости при движении локомотива в тяге и на выбеге. Проведенные натурные экспериментальные исследования горизонтальной динамики подвижного состава подтвердили указанное выше: действительно при движении локомотива в режиме тяги математическое ожидание длины волны виляния колесной пары меньше на 18 – 20 %, чем при его движении на выбеге. Однако поскольку амплитуда виляния в конечном счете ограничивается разбегом колесной пары в рельсовой колее, то уменьшение длины виляния означает увеличение таких кинематических характеристик, как угол набегания, частота виляния и угловая скорость верчения [8].

К сожалению, задача исследования устойчивости поезда мало изучена, а значительно больше внимания уделяется устойчивости движения отдельно взятого конкретного экипажа. Причем для вагона или локомотива применяются все более совершенные расчетные схемы с большим числом степеней свободы. На их основе отыскиваются параметры буксового и кузовного подвешиваний и т. п. Первые работы, посвященные горизонтальной динамике поезда, привели к весьма интересным результатам, но расчетные схемы были достаточно идеализированными. Это касается сил сопротивления движению поезда и силы тяги.

В настоящей работе предпринимается попытка уточнить полученные ранее результаты за счет более точного представления усилий в автосцепках, силы тяги и сопротивления движению подвижной единицы. Для простоты будем изучать поведение однородного поезда, составленного из четырехосных вагонов и ведомого четырехосным локомотивом. В этой статье принимаются во внимание не все эффекты, влияющие на поперечное движение подвижного состава. В частности, исключено рассмотрение гироскопических сил, проявляющихся при скоростях движения 500 км/ч и более, не учитывается и крутильная жесткость оси колесной пары. Указанные выше силы крипа будем вычислять по линейным выражениям, предложенным Дж. Калкером, полагая, что задача исследования буксования колесных пар локомотива при ведении поезда – это самостоятельная задача, да и такой режим движения является нежелательным и недопустимым из-за усиленного износа колесных пар и рельсов.

Рассмотрим одиночный четырехосный локомотив и составим для него уравнения движения, учитывая усилие в автосцепке (рисунок 1).

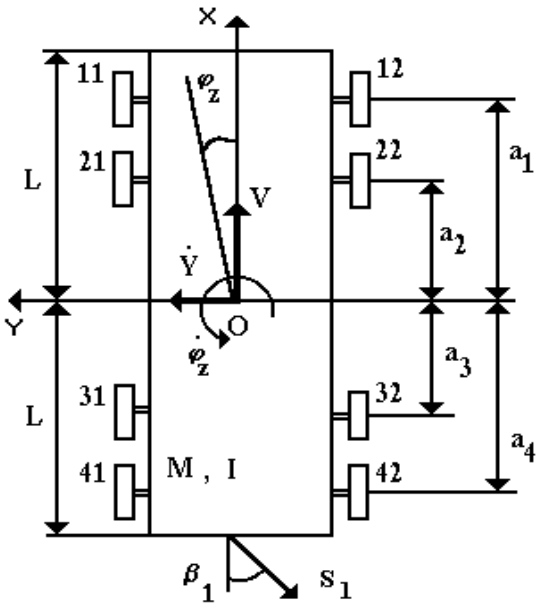


Рисунок 1 – Расчетная схема локомотива

На расчетной схеме и в дальнейшем приняты следующие обозначения: M – масса локомотива; J – момент инерции колесной пары относительно своей оси вращения; $M_{вр}$ – вращающий момент, приложенный со стороны тягового электрического двигателя к колесной паре; $M_{тр}$ – момент трения, действующий на колесную пару; I – момент инерции локомотива относительно вертикальной оси, проходящей через его центр масс; $W(V,X)=[AV^2+BV+C(X)]Mg$ – сопротивление движению локомотива; X и V – перемещение и скорость движения локомотива; X_k и $\mathrm{V_k}$ – перемещение и скорость движения k-го вагона; J_k – момент инерции колесной пары вагона относительно своей оси вращения; I_k – момент инерции вагона относительно вертикальной оси; $W_k(V_k,X_k)=\left(A_kV_k^2+B_kV_k+C_k(X_k)\right)m_kg$ – сопротивление движению k-го вагона; m_k – масса k-го вагона; $S_k\left(\Delta_k,\dot{\Delta}_k\right)$ – усилие в упряжном приборе в k-м сечении поезда; ε_x^{ij} – проекция проскальзывания колеса по рельсу на ось X; ε_y^{ij} – проекция проскальзывания колеса по рельсу на ось Y; $K_x=Gc^2C_{11}$ – коэффициент крипа вдоль оси X; $K_y=Gc^2C_{22}$ – коэффициент крипа вдоль оси Y; G – модуль сдвига; $c=\sqrt{ab}$; a, b – полуоси эллипса контакта; C_{11},C_{22} – безразмерные коэффициенты, зависящие только от коэффициента Пуассона; Y – относ локомотива; φ_z – виляние локомотива; L – база кузова локомотива; $\dot{Y}$ – скорость относа кузова локомотива; $\dot{\varphi}_z$ – угловая скорость вращения кузова локомотива; $2s$ – расстояние между осями рельсов; Y_k и φ_{zk} – относ и виляние k-го вагона; $\dot{Y}_k$ – скорость относа k-го вагона; $\dot{\varphi}_{zk}$ – угловая скорость вращения кузова вагона.

Чтобы получить уравнения движения, следует вначале вычислить скорость на ободьях колес в их точках контакта с рельсом, полагая углы и перемещения малыми величинами, когда косинус угла можно считать равным единице, а синус угла – пропорциональным этому углу. Скорость на ободе j-го колеса i-й колесной пары

$$\overline{V}^{ij}=V\overline{i}+\dot{Y}\overline{j}+\dot{\overline{\varphi}}_z\times\overline{O_1K_{ij}}+\dot{\overline{\varphi}}_{yi}\times\overline{r}_{ij}, \tag{1}$$

отсюда скорость проскальзывания в продольном и поперечном направлениях соответственно будет определяться так:

$$\begin{cases} u_x^{ij}=V+(-1)^j s\dot{\varphi}_z-r_{ij}\dot{\varphi}_{yi}; \\ u_y^{ij}=\dot{Y}+a_i\dot{\varphi}_z, \end{cases} \tag{2}$$

а «псевдопроскальзывания» можно вычислить по формулам:

$$\begin{cases} \varepsilon_x^{ij} = \dfrac{V + (-1)^j s\dot{\varphi}_z - r_{ij}\dot{\varphi}_{yi}}{V}; \\ \varepsilon_y^{ij} = \dfrac{\dot{Y} + a_i\dot{\varphi}_z - V\varphi_z}{V}. \end{cases} \quad (3)$$

Зная величины проскальзываний, можно рассчитать силы крипа:

$$\begin{cases} F_x^{ij} = -K_x\varepsilon_x^{ij}; \\ F_y^{ij} = -K_y\varepsilon_y^{ij}. \end{cases} \quad (4)$$

Кроме того, на колесную пару действует боковая сила, возникающая из-за износа поверхностей катания колеса и рельса:

$$Y_б^i = \frac{Mg}{8}(tg\theta^{i1} - tg\theta^{i2}) = \frac{Mg}{8}\delta(Y + a_i\varphi_z). \quad (5)$$

Определим проекции главного вектора продольных и поперечных сил на координатные оси пути:

$$\begin{cases} R_x = 2K_x\dfrac{r_0(\dot{\alpha}_1 + \dot{\alpha}_2 + \dot{\alpha}_3 + \dot{\alpha}_4)}{V}; \\ R_y = -8K_y\left(\dfrac{\dot{Y}}{V} - \varphi_z\right) - \dfrac{Mg}{2}\delta Y. \end{cases} \quad (6)$$

Вычислим проекцию главного момента относительно оси OZ

$$M_z = -8K_x\left[\frac{s^2 + 0,5(a_1^2 + a_2^2)}{V}\dot{\varphi}_z + \frac{\gamma s}{r_0}Y\right] - \frac{Mg}{4}\delta(a_1^2 + a_2^2)\varphi_z, \quad (7)$$

а также проекцию момента относительно оси OY, действующего на колесную пару:

$$\mathrm{M}_{\mathrm{y}}^{\mathrm{i}} = M_{\text{вр}} - M_{\text{тр}} - 2K_x\frac{r_0^2\dot{\alpha}_i}{V}. \quad (8)$$

Уравнения движения локомотива примут вид:

$$\begin{cases} M\dot{V} = 8K_x\dfrac{r_0\dot{\alpha}}{V} - W(V,l) - S_1(\Delta_1, \dot{\Delta}_1); \\ J\ddot{\alpha} = M_{\text{вр}} - M_{\text{тр}} - 2K_x\dfrac{r_0^2\dot{\alpha}}{V} - J\dfrac{\dot{V}}{r_0}; \\ M\ddot{Y} = -8K_y\left(\dfrac{\dot{Y}}{V} - \varphi_z\right) - \dfrac{Mg}{2}\delta Y - S_1(\Delta_1, \dot{\Delta}_1)\beta_1; \\ I\ddot{\varphi}_z = -8K_x\left[\dfrac{s^2 + 0,5(a_1^2 + a_2^2)}{V}\dot{\varphi}_z + \dfrac{\gamma s}{r_0}Y\right] - \dfrac{Mg}{4}\delta(a_1^2 + a_2^2)\varphi_z + \\ + S_1(\Delta_1, \dot{\Delta}_1)L\beta_1. \end{cases} \quad (9)$$

Совершенно аналогично можно вывести дифференциальные уравнения *k*-го вагона, которые отличаются от системы уравнений (9) только тем, что на вагонную колесную пару не действует вращающий момент:

$$\begin{cases} m_k\dot{V}_k = S_{k-1}\left(\Delta_{k-1},\dot{\Delta}_{k-1}\right)+8K_x\dfrac{r_k\dot{\alpha}_k}{V}-W_k(V_k,l_k)-S_k(\Delta_k,\dot{\Delta}_k); \\ J_k\ddot{\alpha}_k = -M_{\text{тр}k}-2K_x\dfrac{r_k^2\dot{\alpha}_k}{V_k}-J_k\dfrac{\dot{V}_k}{r_k}; \\ m_k\ddot{Y}_k = -8K_y\left(\dfrac{\dot{Y}_k}{V_k}-\varphi_{zk}\right)-\dfrac{m_kg}{2}\delta_kY_k+S_{k-1}(\Delta_{k-1},\dot{\Delta}_{k-1})\beta_{k-1}-S_k(\Delta_k,\dot{\Delta}_k); \\ I_k\ddot{\varphi}_{zk} = -8K_x\left[\dfrac{s^2+0,5(a_1^2+a_2^2)}{V_k}\dot{\varphi}_{zk}+\dfrac{\gamma_ks}{r_k}Y_k\right]-\dfrac{m_kg}{4}\delta_k(a_1^2+a_2^2)\varphi_{zk}- \\ -S_{k-1}(\Delta_{k-1},\dot{\Delta}_{k-1})L\beta_{k-1}+S_k(\Delta_k,\dot{\Delta}_k)L\beta_k. \end{cases} \quad (10)$$

Здесь $k \in [1, n]$, причем для конечного вагона последнее слагаемое равно нулю, так как к нему ничего не присоединено.

Итак, устойчивость невозмущенного движения подвижных единиц поезда зависит от режима его ведения и продольного профиля пути конкретного участка. Усилия в автосцепках определяются деформацией (прогибом) поглощающих аппаратов и ее скоростью. Они описываются существенно нелинейными функциями. Найдем прогиб упругого элемента поглощающего аппарата автосцепного устройства, используя выражение:

$$\Delta_1 = \sqrt{(X-L-X_1-L_1)^2+(Y-L\varphi_z-Y_1-L_1\varphi_{z1})^2}-L_{\text{ст}}. \quad (11)$$

Здесь $L_{\text{ст}}$ – расстояние между экипажами в свободном состоянии. Учитывая, что относы экипажей и углы виляния малы по сравнению с продольной деформацией поглощающих аппаратов, формулу (11) можно упростить так:

$$\Delta_1 = X-L-X_1-L_1-L_{\text{ст}}. \quad (12)$$

Продифференцировав уравнение (12), получим выражение для определения скорости деформации поглощающих аппаратов:

$$\dot{\Delta}_1 = V-V_1. \quad (13)$$

Аналогично выводятся формулы для вычисления деформации и ее скорости между (k – 1)-м и k-м экипажами:

$$\begin{cases} \Delta_k = X_{k-1}-L_{k-1}-X_k-L_k-L_{\text{ст}}; \\ \dot{\Delta}_k = V_{k-1}-V_k. \end{cases} \quad (14)$$

При принятых допущениях и условии линеаризации сил крипа нетрудно видеть, что первое и второе уравнения в системах (9) и (10) выделяются в самостоятельную систему, описывающую продольное движение поезда с учетом вращения колесных пар экипажей. Третьи и четвертые уравнения систем (9) и (10) также образуют отдельную систему дифференциальных уравнений, представляющую поперечные колебания поезда.

Анализ таких систем затруднен высоким их порядком и наличием в решении составляющих со значительно разнесенными частотами. Следовательно, необходимо их предварительно математически обработать, например, опираясь на теорему академика А. Н. Тихонова. Данный метод в применении к исследованию динамического взаимодействия колеса и рельса и продольной динамики железнодорожных экипажей широко используется на кафедре «Теоретическая механика» ОмГУПСа.

Полученные системы дифференциальных уравнений (9) и (10) справедливы в пределах, пока не выбран зазор в рельсовой колее. В противном случае следует ввести ограничители

так, как это было сделано в статье А. Д. де Патера [3], или воспользоваться гипотезой пластического удара гребня бандажа о рельс. Следует напомнить о существовании критического числа вагонов в составе, превышение которого приводит к несимметричным режимам движения поезда, но получен данный результат для однородного поезда, состоящего из двухосных вагонов.

Наличие этих продольных зазоров в буксовых проемах и, тем более, их превышение над нормативными значениями, при замыкании кинематических связей ведет к резкому увеличению продольных ударных нагрузок на боковую раму тележки. Эти продольные силы возникают как при регулировочных горочных торможениях отдельных вагонов или сцепов, так и при тормозных процессах в поезде при его замедлении. К тому же при этом возникает изменение проскальзывания колес по рельсам в продольном направлении, что также значительно усложняет исследование динамического поведения экипажа.

Наиболее характерные результаты расчетов, отражающие влияние продольных зазоров в челюстных проемах боковой рамы тележки на ее динамическую нагруженность при импульсном регулировочном торможении вагона на горке, представлены на рисунках 2 и 3.

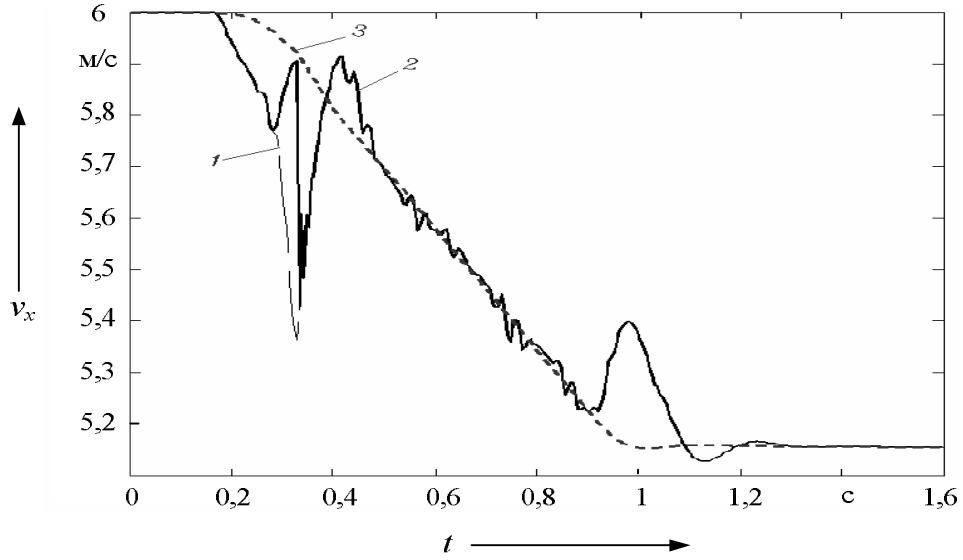


Рисунок 2 – Осциллограммы продольных скоростей отдельных узлов четырехосного груженого полувагона с суммарными продольными зазорами 12 мм при импульсном регулировочном торможении (Скорость подергиваний: 1– буксы; 2 – боковины; 3 – кузова)

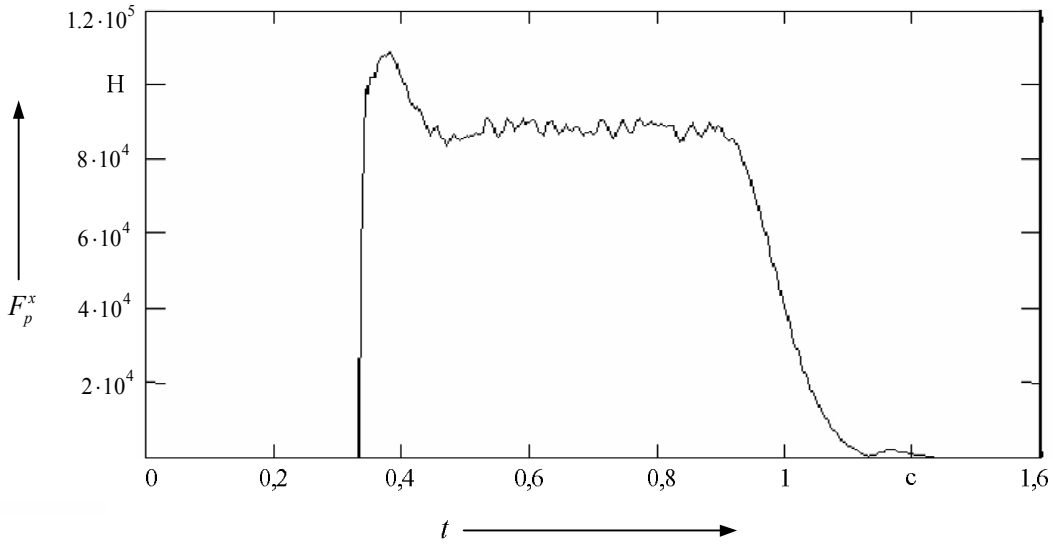


Рисунок 3 – Осциллограмма продольного усилия в контакте буксы и боковой рамы при торможении груженого вагона

Представленные на рисунках 2 и 3 графики наглядно иллюстрирует процессы резкого изменения скорости возникновения быстрых колебаний буксы относительно боковой рамы и этой рамы относительно кузова (зазор между надрессорной балкой и кузовом в пятниковом узле не учитывался), и ударного нагружения конечного участка боковой рамы.

Такие явления указывают на значительное влияние зазоров на ударную нагруженность боковой рамы и подщипников буксового узла, приводящую к возникновению трещин в зоне буксового проема (до 87 % от общего их количества в боковой раме), и на недостаток сил трения в контакте между буксой и рамой тележки, что способствует перекосам колесных пар с вытекающими отсюда последствиями. Кроме того, относительные продольные колебания рамы относительно буксы являются причиной износа контактируемых опорных поверхностей рамы (в основном – потолка буксового проема боковой рамы) и буксы, что также снижает их эксплуатационный ресурс.

Зависимости максимальной ударной нагруженности буксового проема вагона, находящегося в последней трети состава, от начальной скорости при пневматическом торможении представлены на рисунке 4. Здесь наглядно отражается влияние скорости вагона на эффективность торможения композиционными колодками – некоторое снижение коэффициента трения скольжения при увеличении скорости подвижного состава. Важно отметить, что возникающие продольные силы взаимодействия между буксой и боковой рамой дополнительно способствуют снижению силы сцепления между колесом и рельсом.

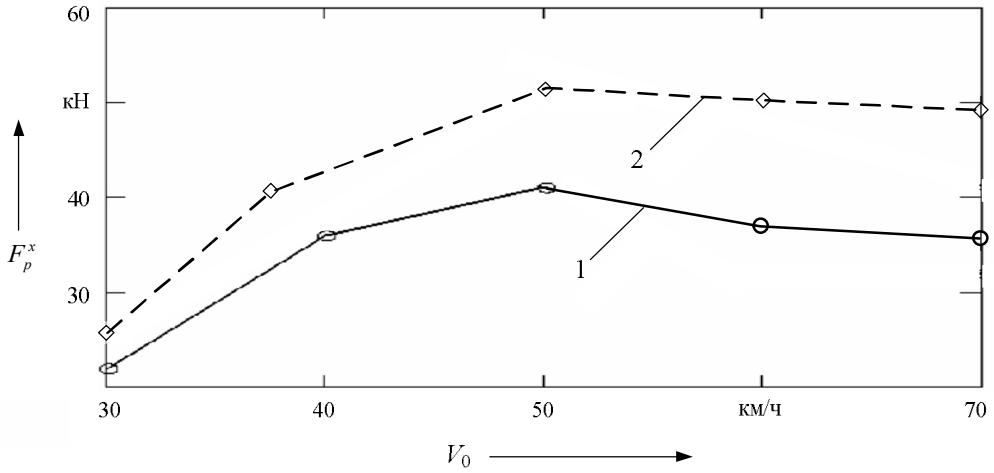


Рисунок 4 – Зависимости максимальной ударной нагруженности буксового проема вагона, находящегося в последней трети состава, от начальной скорости при пневматическом торможении (зазоры, мм: 1 – 12, 2 – 16)

Этот фактор при имеющих место в процессе движения вертикальных колебаниях кузова вагона, обусловленных значительной вертикальной жесткостью рессорного комплекта и дефицитом сил трения в системе обрессоривания порожнего вагона, способствующих значительному разбросу силы вертикального давления колеса на рельс, приводит к превышению момента тормозных сил, обусловленного нажатием колодок, над моментом силы сцепления колеса и рельса. Это и является одной из основных причин образования ползунов колес в порожняковых поездах, на что также влияют несовершенство систем осушки сжатого воздуха и особенности климата железных дорог Сибири и Урала.

Таким образом, сформированная система дифференциальных уравнений описывает продольное движение поезда и поперечные его колебания с учетом продольного профиля пути и усилий в автосцепных устройствах экипажей, которые входят в уравнения поперечных колебаний подвижных единиц и способны стабилизировать их автоколебания. Сами же силы зависят от продольного профиля пути, от конструктивных несовершенств экипажей (отклонений конструктивных параметров от нормативных значений) и от режима ведения поезда машинистом. Используя системы уравнений (9), (10), можно также оценить затраты энергии на паразитные движения, к коим относятся колебания виляния и относа железнодорожного экипажа, связать устойчивость невозмущенного движения поезда с режимами его ведения.

Метод разделения движений является эффективным инструментом оценки динамических подсистем (колебаний кузова, рам тележек и процессов проскальзывания колесных пар), имеющих постоянные времени, отличающиеся друг от друга на несколько порядков.

Полученные результаты свидетельствуют, во-первых, о значительном влиянии величины продольного зазора в буксовых проемах на динамическую нагруженность концевых частей боковых рам вагонов, что в решающей мере и предопределяет возникновение в них трещин, угрожающих безопасности движения поезда, и, во-вторых, еще раз указывают на острую необходимость кардинального улучшения динамических качеств тележки грузового вагона путем отказа от морально устаревшей типовой схемы обрессоривания железнодорожного экипажа.

Список литературы

1. Лазарян, В. А. Устойчивость движения локомотивов и вагонов [Текст] / В. А. Лазарян // Железные дороги мира. – 1978. – № 6. – С. 3 – 8.

2. Carter, F. W. On the action of a locomive driving wheel [Текст] / F. W. Carter – Proc. Roy. Soc., 1926. – V. 112. – P.151.

3. Pater, A. D. Non – linear model of a single wheelset moving with constant speed on a purely straigt [Текст] / A. D. Pater // Int. J. of Non-Linear Mechanics. – 1980. – V. 15. – P. 315.

4. Kalker, J. J. On the rolling contact of two elastic bodies in the presence of dry friction [Текст] / J. J. Kalker // Thesis, Delft. – 1967. – Pp. 7 – 155.

5. Тихонов, А. Н. Системы дифференциальных уравнений, содержащие малые параметры при производных [Текст] /А. Н. Тихонов // Матем. сб. – 1952. – Т. 31(73). – № 3. – С. 575 – 586.

6. Кондратьев, В. Ф. О влиянии неголономных связей на устойчивость и колебания одной механической системы [Текст] / В. Ф. Кондратьев // Изв. АН СССР. – 1975. – № 2. С. 175 – 184.

7. Неймарк, Ю. И. Динамика неголономных систем [Текст] / Ю. И. Неймарк, Н. А. Фуфаев – М.: Наука, 1967. – 519 с.

8. Голубенко, А. Л. Сцепление колеса с рельсом [Текст] / А. Л. Голубенко Киев: Віпол, 1993. – 448 с.

9. Krettek, O. Der Grosswahlprufstand [Текст] / O. Krettek, K. D. Gramatke // ETR - Eisenbahntechnische Rundschau. – 1976. – V.25. – № 5. – S. 271– 272. – Pp. 307 – 310.

10. Recklington, A. R. Effects of lateral forces when propelling round steep curves [Текст]/ A. R. Recklington // Raiway Gas. – 1965. – V. 121. – Pp. 942 – 945.

УДК 656.212.6.073.22

Е. Д. Псеровская, С. Ю. Хорунжин

ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ МНОГОЯРУСНОГО ГРУЗА И ВОСПРИНИМАЕМЫХ КРЕПЛЕНИЕМ НАГРУЗОК ПРИ МАНЕВРОВЫХ СОУДАРЕНИЯХ ВАГОНОВ

Обеспечение безопасности движения поездов и сохранности перевозимых грузов зависит от правильности разработанных технических условий размещения и крепления грузов в вагонах. Исследование в данной области может осуществляться с помощью теоретических и экспериментальных методов. Анализ современных тенденций совершенствования техники показывает, что использование просто экспериментального метода проб и ошибок нерационально, так как требует значительных трудовых и материальных затрат. Более эффективным является системный подход, который позволяет рационально сочетать теоретические и экспериментальные методы исследования [1].

Увеличение объема перевозок грузов ведет к интенсификации маневровых операций и, как следствие, к росту скорости соударения вагонов. Увеличение скорости маневровых со-

ударений вагонов является резервом повышения пропускной способности железных дорог, так как позволяет сократить время нахождения вагонов на сортировочных станциях. Однако соударение вагонов сопровождается значительными продольными и вертикальными колебаниями кузова вагона и транспортируемых грузов, а это может привести к сдвигу груза и, как следствие, к расстройству крепления, повреждению вагонов и грузов.

Продольное ускорение груза, возникающее при соударениях вагонов, зависит от многих факторов – от количества и масс соударяющихся вагонов, типа поглощающих аппаратов автосцепных устройств, жесткости применяемого крепления и перевозимого груза, размещения груза или грузов в вагоне, скорости соударения вагонов, сил сцепления груза с вагоном, климатических условий и др.

В настоящее время расчет крепления грузов при их перевозке на открытом подвижном составе выполняется по методике, изложенной в Технических условиях погрузки и крепления грузов (ТУ), однако данная методика не учитывает многих факторов, оказывающих влияние на достоверность получаемых результатов, а предлагаемые в ней методы расчета крепления грузов требуют корректировки. Так, например, в методике [2] расчет крепления грузов на вагоне основан на решении статически определимой задачи, хотя задача определения усилий в элементах крепления грузов на железнодорожной платформе является статически неопределимой, поскольку закрепление грузов в вагоне от перемещений наиболее часто осуществляется растяжками различных длин и сечений.

Груз при определении усилий, действующих на него и при выборе необходимого крепления, предотвращающего его сдвиг, в ТУ рассматривается только как монолитный, хотя следует отметить, что на вагонах перевозят грузы, в основном размещенные в несколько штабелей по длине вагона, ярусов по высоте и рядов по ширине. В связи с этим при определении усилий в элементах крепления грузов не учитываются возможные перемещения грузов относительно друг друга. Исходя из этого можно отметить, что зависимость усилий, возникающих в креплении грузов при маневровых соударениях вагонов, от ярусности размещения единиц груза является не решенной на требуемом уровне актуальной прикладной задачей.

Определение усилий в креплении представляет собой целый класс достаточно сложных и разнообразных по характеру прикладных задач, которые могут быть решены с помощью расчетных схем и математических моделей, описывающих реальный физический процесс нагружения системы «груз – крепления – вагон», составленных на основе классических методов прикладной механики и современных вычислительных средств. Правильность этих решений может быть подтверждена только экспериментально, после чего могут быть разработаны рекомендации для практического применения.

Рассмотрим многоярусный груз, размещенный на железнодорожной платформе (рисунок 1).

Рисунок 1 – Многоярусная погрузка

Железобетонные плиты размещены в четыре яруса по высоте: нижний ярус уложен на деревянные подкладки, все последующие ярусы уложены на деревянные прокладки. От продольного сдвига груз закреплен растяжками одним концом за монтажные петли верхнего яруса груза, другим – за стоечные скобы платформы. Растяжки имеют предварительный натяг и создают дополнительное давление ярусов друг на друга. При значении сдвигающей силы равной или большей максимальной силы трения происходит перемещение яруса, в противном случае ярус остается неподвижным.

По аналогии с работой [3] предложены расчетная и силовая схемы связей к составлению дифференциальных уравнений движения грузов из четырех ярусов с сухим трением при наличии вертикальной и горизонтальной сил (рисунки 2 и 3) и получены соответствующие дифференциальные уравнения движения элементов многоярусных грузов как упругосвязанных между собой многомассовых систем, на которые действуют внешние силы и силы трения скольжения между грузами.

Примем допущения о том, что перемещение ярусов груза только поступательно, т. е. пренебрегаем их поворотом. На рисунке 2 пружины жесткости $c_{x\,экв}$ и $c_{z\,экв}$ соответствуют эквивалентным пружинам, заменяющим упругие растяжки между верхним ярусом груза и платформой. Пружины жесткости c_{ix} и c_{iz} заменяют упругие деревянные прокладки, работающие на сдвиг и сжатие. Между прокладками и ярусами груза скользящие связи имитируют силы трения.

Аналитическое решение таких задач возможно только для отдельных интервалов движения, в которых направление относительной скорости не изменяется. Решение задачи колебания систем с конечным числом степеней свободы с учетом сухого трения, к чему можно отнести колебания единиц грузов, является чрезвычайно трудоемким из-за специфического поведения силы трения скольжения. Для каждого периода движения при скоростях, близких к нулю,

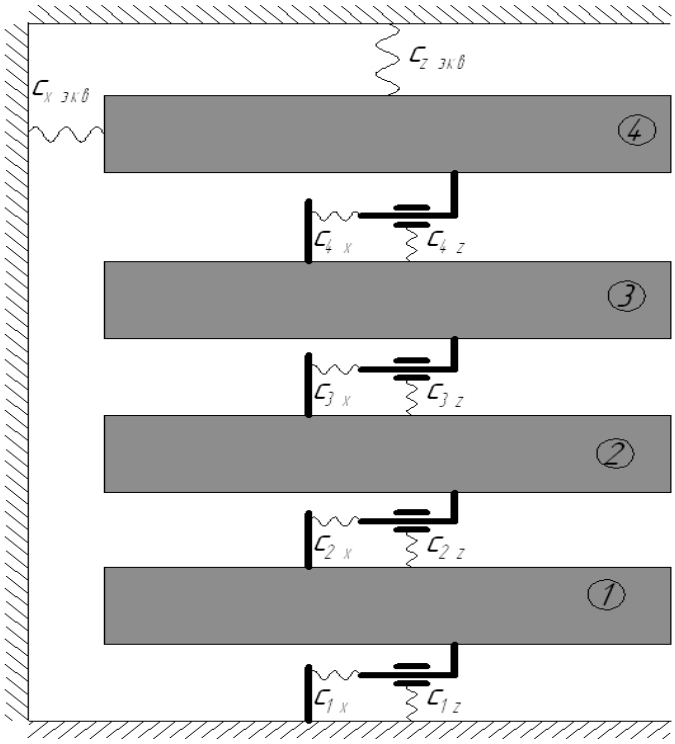


Рисунок 2 – Расчетная схема связей к составлению дифференциальных уравнений движения грузов с сухим трением при наличии вертикальной и горизонтальной сил

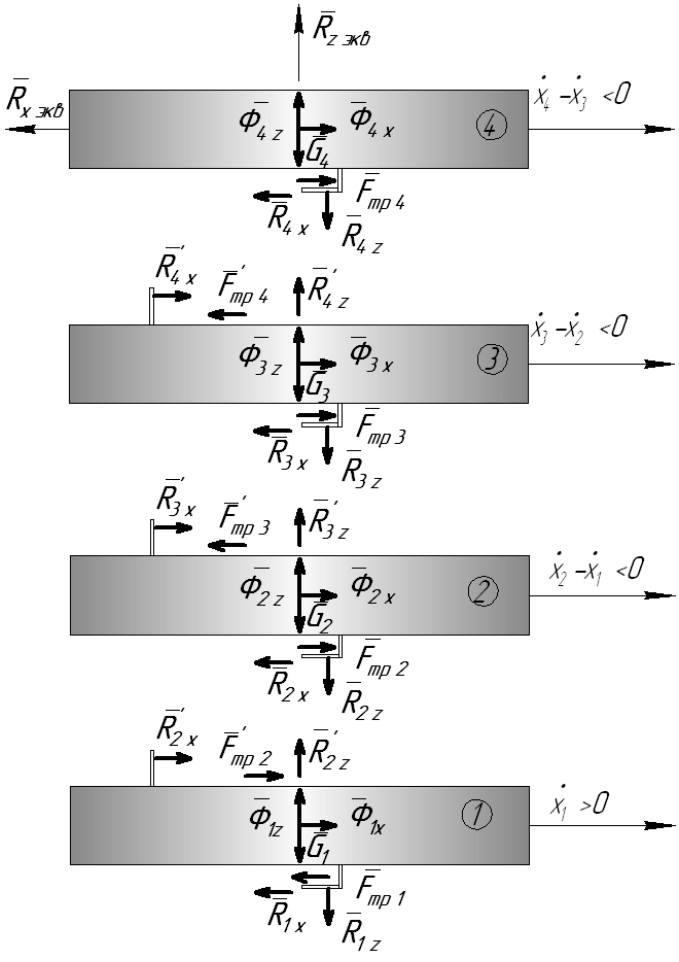


Рисунок 3 – Силовая схема к составлению дифференциальных уравнений движения ярусов

необходима проверка неравенств относительно сдвигающей силы и максимальной силы трения. Для определения перемещений каждого из ярусов и связанных с этим перемещений точек крепления отдельных ярусов, например, верхних, необходимо рассмотрение движения этих ярусов. Таким образом, необходимо составление соответствующих дифференциальных уравнений и их решение.

Методы решения статически неопределимых задач разработаны [4] и заключаются в составлении дополнительных уравнений, учитывающих деформацию упругих связей. В работе [5] предложена удобная интерпретация метода решения статически неопределимых задач.

Центральной частью расчета является определение геометрических соотношений между деформацией растяжек и перемещениями груза как твердого тела относительно вагона. Влияние сил инерции учитывается применением принципа Даламбера (кинетостатики). Задача определения перемещения каждого из элементов штабельных грузов и связанных с этим перемещений точек крепления отдельных элементов, например, верхних, должна решаться рассмотрением движения этих элементов.

При определении усилий в растяжках крепления штабельных грузов непосредственное применение этого принципа сопряжено с дополнительными трудностями, связанными с наличием неконсервативных сил взаимодействия (сил сухого трения между ярусами груза), которые обусловливают для каждого из ярусов различные кинематические состояния (перемещения, ускорения).

Таким образом, в работе составлена система из восьми дифференциальных уравнений. Пропуская промежуточные выводы, представляем конечный вид дифференциальных уравнений равновесия для каждого яруса груза:

$$\begin{aligned} &m_1\ddot{x}_1 + c_{01x}(x_1) - c_{12x}(x_2 - x_1) + fc_{01z}(f_{ст01} - z_1)\operatorname{sgn}(\dot{x}_1) - \\ &- fc_{12z}(f_{ст12} - (z_2 - z_1))\operatorname{sgn}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) = -m_1 a_x^e(t); \end{aligned} \tag{1}$$

$$m_1\ddot{z}_1 + c_{01z}(z_1) - c_{12z}(z_2 - z_1) = -m_1 a_z^e(t); \tag{2}$$

$$\begin{aligned} &m_2\ddot{x}_2 + c_{12x}(x_2 - x_1) - c_{23x}(x_3 - x_2) + fc_{12z}(f_{ст12} - (z_2 - z_1))\operatorname{sgn}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - \\ &- fc_{23z}(f_{ст23} - (z_3 - z_2))\operatorname{sgn}(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) = -m_2 a_x^e(t); \end{aligned} \tag{3}$$

$$m_2\ddot{z}_2 + c_{12z}(z_2 - z_1) - c_{23z}(z_3 - z_2) = -m_2 a_z^e(t); \tag{4}$$

$$\begin{aligned} &m_3\ddot{x}_3 + c_{23x}(x_3 - x_2) - c_{34x}(x_4 - x_3) + fc_{23z}(f_{ст23} - (z_3 - z_2))\operatorname{sgn}(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) - \\ &- fc_{34z}(f_{ст34} - (z_4 - z_3))\operatorname{sgn}(\dot{x}_4 - \dot{x}_3) = -m_3 a_x^e(t); \end{aligned} \tag{5}$$

$$m_3\ddot{z}_3 + c_{23z}(z_3 - z_2) - c_{34z}(z_4 - z_3) = -m_3 a_z^e(t); \tag{6}$$

$$m_4\ddot{x}_4 + c_{34x}(x_4 - x_3) + c_{экв x}x_4 + fc_{34z}(f_{ст34} - (z_4 - z_3))\operatorname{sgn}(\dot{x}_4 - \dot{x}_3) = -m_4 a_x^e(t); \tag{7}$$

$$m_4\ddot{z}_4 + c_{34z}(z_4 - z_3) + c_{экв z}z_4 = -m_4 a_z^e(t). \tag{8}$$

Решение системы дифференциальных уравнений методом Эйлера [6] в инструментальной среде MathCAD со следующими исходными данными: $m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = 3{,}98 \cdot 10^3$ кг – массы каждого яруса; $c_{x\,экв} = 2{,}316 \cdot 10^6$ Н/м и $c_{z\,экв} = 1{,}85 \cdot 10^6$ Н/м – соответственно горизонтальных и вертикальных упругих связей; $R_{03} = 1{,}65 \cdot 10^4$ Н – предварительное натяжение вертикальной эквивалентной упругой связи, позволило установить, что верхний ярус переместился в продольном направлении на 9,9 мм, третий – на 7,4 мм, второй – на 6,6 мм, а нижний – на 5,2 мм.

Для проверки достоверности данных аналитических выводов на испытательном стенде СГУПСа была осуществлена погрузка груза с указанными выше параметрами.

При проведении экспериментального исследования решались следующие задачи:

– изучение динамики изменения усилий, возникающих в креплении при маневровых соударениях, в зависимости от предварительного натяжения растяжек;

– изучение динамики изменения усилий, возникающих в растяжках при закреплении многоярусного и монолитного груза;

– изучение динамики перемещения груза, закрепленного растяжками в процессе удара;

– определение динамики изменения ускорений единиц груза и вагона.

Результаты экспериментальных данных перемещения ярусов груза в зависимости от времени при скорости соударения 4,48 км/ч приведены на рисунке 4. Данные по ярусам представлены в следующей последовательности: сверху вниз – нижний ярус, второй, третий, верхний.

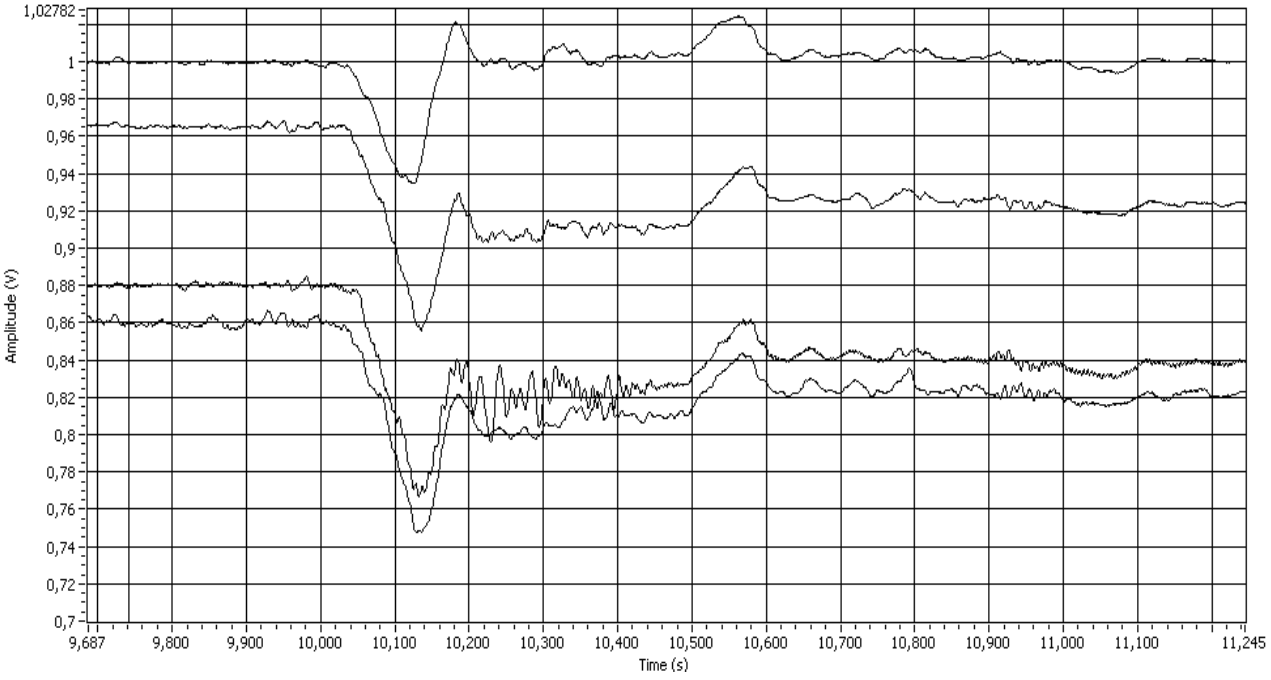


Рисунок 4 – Фрагмент окна программного модуля (с результатами испытаний), характеризующий зависимости перемещения ярусов груза от времени

Анализ зависимостей перемещения ярусов груза от времени показывает, что при аналогичных исходных данных верхний ярус имеет максимальное смещение 10,7 мм, нижний – 6,1 мм. Таким образом, подтверждаются результаты аналитических выводов о закономерностях продольных перемещений единиц многоярусных грузов, что объясняется большим давлением верхних ярусов на нижние, вследствие чего верхние ярусы имеют наибольшие продольные перемещения по отношению к нижним. Незначительные расхождения в результатах, полученных расчетным путем и экспериментально, объясняются тем, что на проведения эксперимента оказывают влияние эксплуатационные условия (температура, сила ветра и др.).

Для исследования динамики изменения усилий, возникающих в растяжках при закреплении многоярусного и монолитного груза, на железобетонные плиты были установлены металлические стяжки, выполненные из металлических швеллеров № 14 и стержня диаметром 20 мм, предотвращающие сдвиг ярусов груза относительно друг друга, после чего была произведена серия соударений с различной скоростью. На рисунке 5 приведены результаты зависимости перемещений «омоноличенного» груза от времени при скорости соударения 3,8 км/ч.

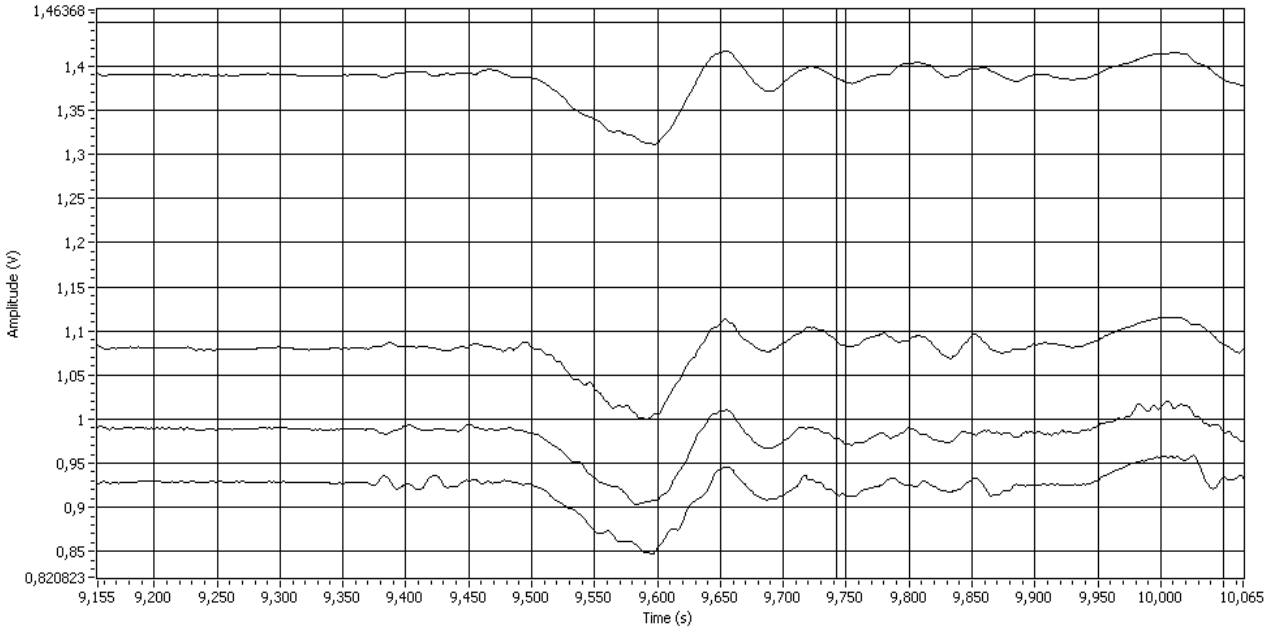


Рисунок 5 – Фрагмент окна программного модуля (с результатами испытаний), характеризующий зависимости перемещения «омоноличенного» груза от времени

Анализ полученных зависимостей перемещения ярусов «омоноличенного» груза от времени показывает, что груз передвигается единым блоком, однако сдвиг всех ярусов груза достигает почти 10 мм, т. е. при меньшем значении скорости соударения, чем в приведенном выше случае, груз сдвигается практически на такое же расстояние. В связи с этим представляют интерес значения усилий, воспринимаемых креплением при многоярусной погрузке и при перевозке «омоноличенного» груза.

На рисунках 6 и 7 приведены результаты зависимости суммарных продольных усилий в креплении соответственно многоярусного и «омоноличенного» груза от скорости соударения.

Анализ полученных зависимостей суммарных продольных усилий в креплении многоярусного и «омоноличенного» груза от скорости соударения показывает, что при перевозке монолитного груза усилия, возникающие в креплении груза, при прочих равных условиях превышают усилия, возникающие при перевозке многоярусного груза.

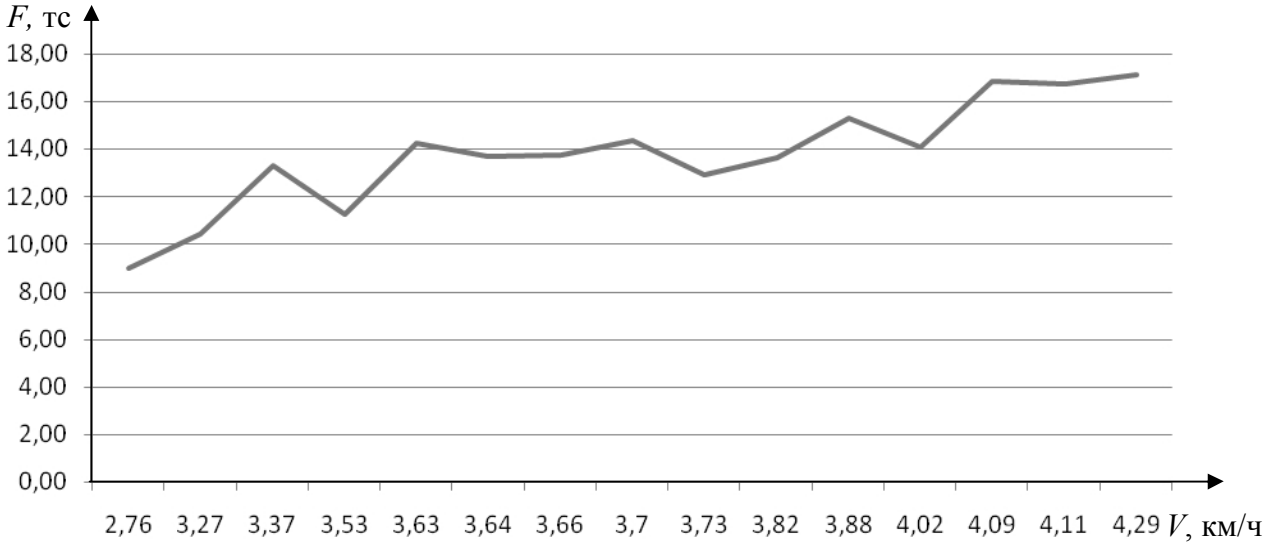


Рисунок 6 – Графическая зависимость суммарных продольных усилий в креплении многоярусного груза от скорости соударения

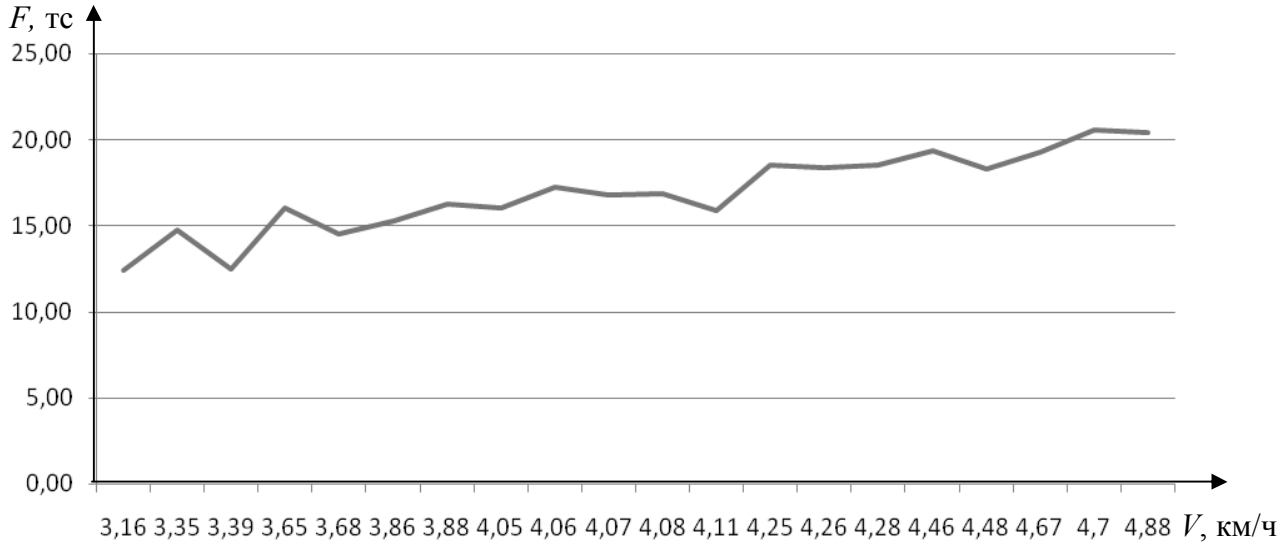


Рисунок 7 – Графическая зависимость суммарных продольных усилий в креплении «омоноличенного» груза от скорости соударения

Аналитический вывод, устанавливает характер продольного перемещения единиц многоярусного груза на вагоне при маневровых соударениях по высоте: чем выше расположен ярус, тем больше он перемещается, что объясняется большим давлением верхних ярусов на нижние ярусы, вследствие чего верхние ярусы имеют наибольшие продольные перемещения по отношению к нижним. Это подтверждается результатами натурных испытаний.

Продольные усилия, возникающие в креплении многоярусного груза при маневровых соударениях вагонов, при прочих равных условиях имеют меньшие значения, чем продольные усилия, возникающие при перевозке монолитного груза, за счет сил сухого трения, зависящих от вертикальных сил взаимодействия между ярусами. Таким образом, «омоноличивание» груза при подготовке его к перевозке приводит к дополнительным затратам на крепление груза.

Список литературы

1. Псеровская, Е. Д. Способы проведения исследований по оценке надежности крепления груза [Текст] / Псеровская Е. Д., Вяжева Н. Н. // Материалы четвертой науч.-практ. конф. «Транспорт Евразии XXI века» / Казахская академия транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. – Алматы, 2006.

2. Технические условия погрузки и крепления грузов [Текст] – М.: Транспорт, 1988. – 408 с.

3. Бондаренко, А. Н. Моделирование взаимных продольных перемещений ярусов штабельных грузов с учетом сил трения [Текст] / А. Н. Бондаренко, Х. Т. Туранов, Е. Д. Псеровская // Сб. к междунар. конф. «Механика и трибология транспортных систем-2003» / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. – Ростов-на-Дону, 2003. – Т. 2.

4. Филин, А. П. Прикладная механика твердого деформируемого тела [Текст] / А. П. Филин. – М.: Наука, 1975. – Т. 1. – 832 с.

5. Бондаренко, А. Н., Общая формулировка и решение статически неопределимых задач при определении усилий в креплениях грузов [Текст] /А. Н. Бондаренко, Х. Т. Туранов, Е. Д. Псеровская // Сб. трудов / Сибирский гос. ун-т путей сообщения. – Новосибирск, 2001. – 178 с.

6. Жилкин, В. А. Динамика материальной точки: учебное пособие [Текст] / В. А. Жилкин / Челябинский гос. агроинженерный ун-т. – Челябинск, 1998. – 332 с.

УДК 656.259

С. С. Сероштанов, А. Г. Ходкевич, И. В. Дремин

СОКРАЩЕНИЕ ВРЕМЕНИ ПРОСТОЕВ ПОЕЗДОВ ПУТЕМ МОДЕРНИЗАЦИИ УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ СХОДА ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

В статье рассматривается задача сокращения времени простоев поездов при срабатывании устройств контроля схода подвижного состава (УКСПС). Сокращение времени достигается за счет модернизации существующей системы УКСПС путем внедрения аппаратно-программного комплекса подсчета подвижных единиц в составе проходящего поезда.

Одной из основных задач на железнодорожном транспорте является обеспечение безопасности движения поездов. Эта задача решается с применением различных автоматизированных систем, в том числе устройств автоматики и телемеханики, одним из них является устройство контроля схода подвижного состава (УКСПС). По указанию института «Гипротранссигналсвязь» (ГТСС) УКСПС устанавливают на предвходной и предыдущей сигнальных точках (рисунок 1) [1, 2].

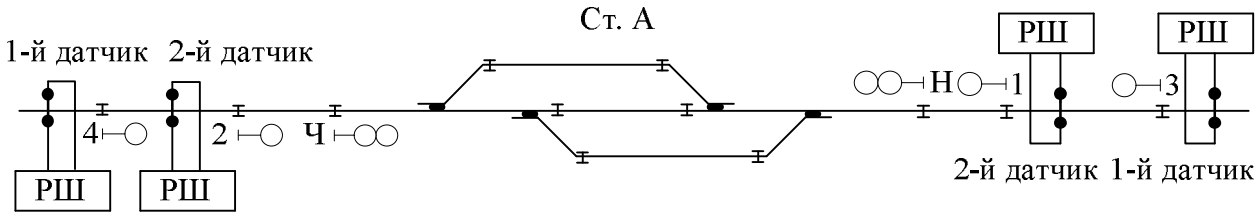


Рисунок 1 – Размещение устройств УКСПС на подходах к станции

Устройства представляют собой металлические скобы, вставленные в специальные разъемы на шпале. Разъемы имеют между собой электрическое соединение и используются в качестве линии передачи сигнала в релейный шкаф об отсутствии частей поезда, нарушающих снизу габарит подвижного состава. При изломе скобы по причине воздействия на нее волочащихся деталей или сошедших с рельсов колес подвижного состава размыкается цепь включения реле контроля схода (КС) (рисунок 2), оно обесточивается и передает на пост электрической централизации (ЭЦ) информацию о необходимости остановки поезда перед станцией для проведения предварительного осмотра. Разрешающее показание входного светофора перекрывается автоматически, у дежурного по станции (ДСП) срабатывает звуковая и световая сигнализация неисправности приближающегося подвижного состава, и к поезду направляется осмотрщик вагонов [3].

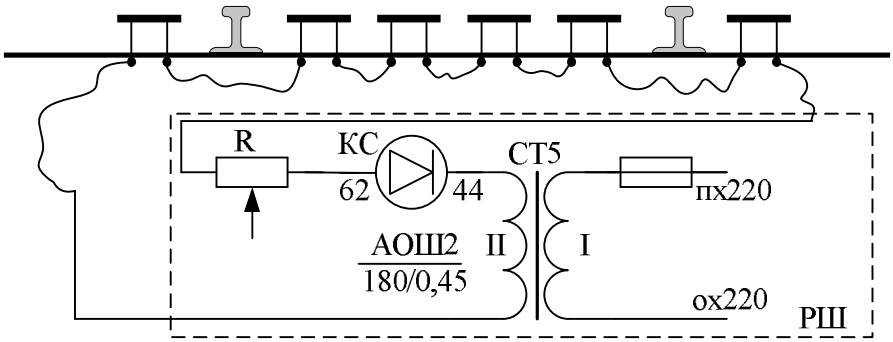


Рисунок 2 – Схема включения реле КС

Согласно регламенту по эксплуатации и обслуживанию УКСПС в случаях повреждения планки нижнего габарита после остановки состава помощник машиниста направляется для

осмотра поезда с обеих сторон с целью обнаружения волочащихся деталей или сошедших с рельсов колесных пар подвижного состава.

Продолжительность осмотра в среднем составляет от 30 до 60 мин, что неминуемо влечет за собой экономические убытки от простоя подвижного состава и нарушения графика движения поездов. Это, в свою очередь, противоречит стратегической программе научно-технического развития ОАО «Российские железные дороги» на период до 2015 г., в которой заложено увеличение средней участковой скорости грузовых и пассажирских поездов на 4 %. В случае ложного срабатывания УКСПС, которое возможно по многим причинам, простой поезда будет необоснованным, сокращение времени таких простоев невозможно без модернизации УКСПС.

Авторы предлагают дооборудовать УКСПС датчиками счета осей. Применение данных систем в совокупности позволит существенно сократить время осмотра поезда и, соответственно, время необоснованных простоев. Для реализации поставленной задачи разработан аппаратно-программный комплекс подсчета подвижных единиц в составе проходящего поезда. В непосредственной близости от установки устройств УКСПС с внутренней стороны колеи на рельс устанавливаются два датчика счета осей (рисунок 3), так как использование одного датчика не дает достаточного количества информации, необходимой для определения номера подвижной единицы в составе поезда. Аналоговый сигнал, поступающий от датчиков, передается по линии связи на блок обработки информации, расположенный на посту электрической централизации.

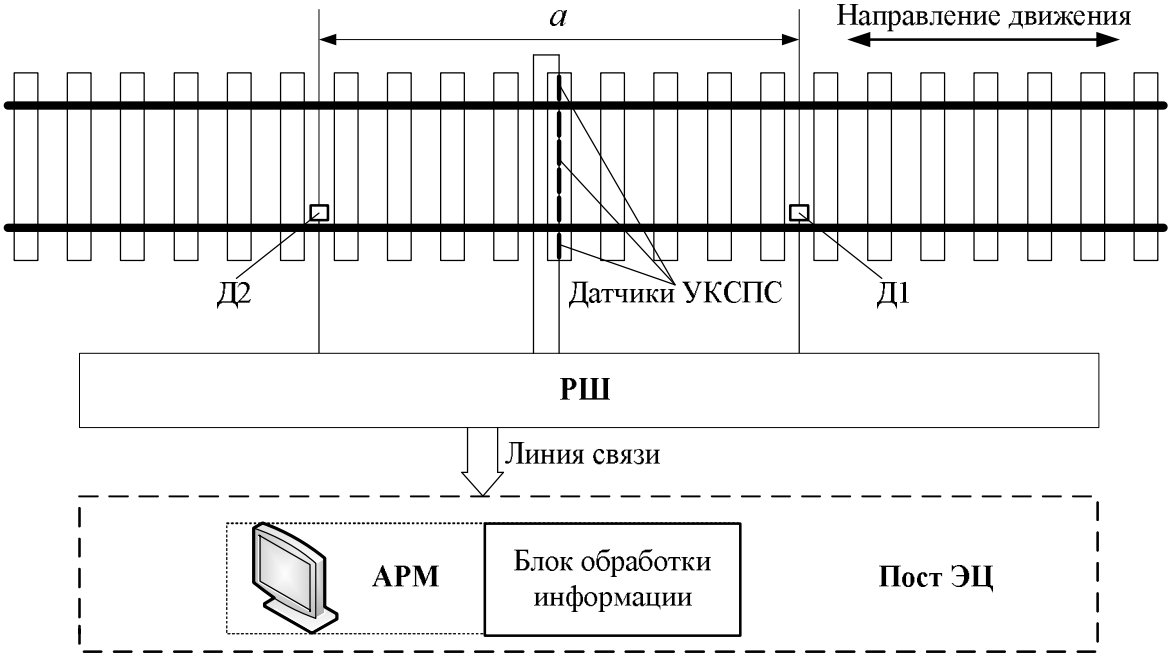


Рисунок 3 – Структурная схема комплекса модернизации УКСПС

В состав блока обработки информации, представляющего собой системный блок ПК, входит плата аналогово-цифрового преобразователя (АЦП), необходимая для обработки аналоговых сигналов, поступающих с датчиков счета осей. Остальные элементы блока обработки информации, такие как таймер-счетчик для реализации временной задержки, «счетчик вагонов» для подсчета количества подвижных единиц в проследовавшем подвижном составе и устройство памяти для хранения информации (количества подвижных единиц в проследовавшем поезде), аппаратным и программным образом реализованы в системном блоке ПК.

Принцип работы системы основан на определении количества осей тележки подвижной единицы, находящейся в зоне между датчиками Д1 и Д2. С помощью этой информации определяется тип подвижной единицы и, соответственно, ее номер в подвижном составе. Одним из условий распознавания подвижных единиц по этому принципу является симметрич-

ность расположения тележек относительно центра подвижной единицы. Это условие соблюдается для всех типов грузовых и пассажирских вагонов, для секций электровозов и тепловозов, эксплуатируемых на территории Российской Федерации.

Датчики Д1 и Д2 размещаются на расстоянии *a* (см. рисунок 3), которое меньше минимально возможного расстояния *c* между тележками подвижной единицы и больше максимально возможного расстояния *b* между крайними осями тележки подвижной единицы (рисунок 4), т. е. при выборе значения *a* должно соблюдаться условие:

$$b_{\max} < a < c_{\min}. \quad (1)$$

Проанализировав геометрические размеры (*c*, *b*) вагонов, эксплуатируемых на железных дорогах Российской Федерации, расстояние *a* между датчиками Д1 и Д2 выбираем равным 3600 мм [4, 5].

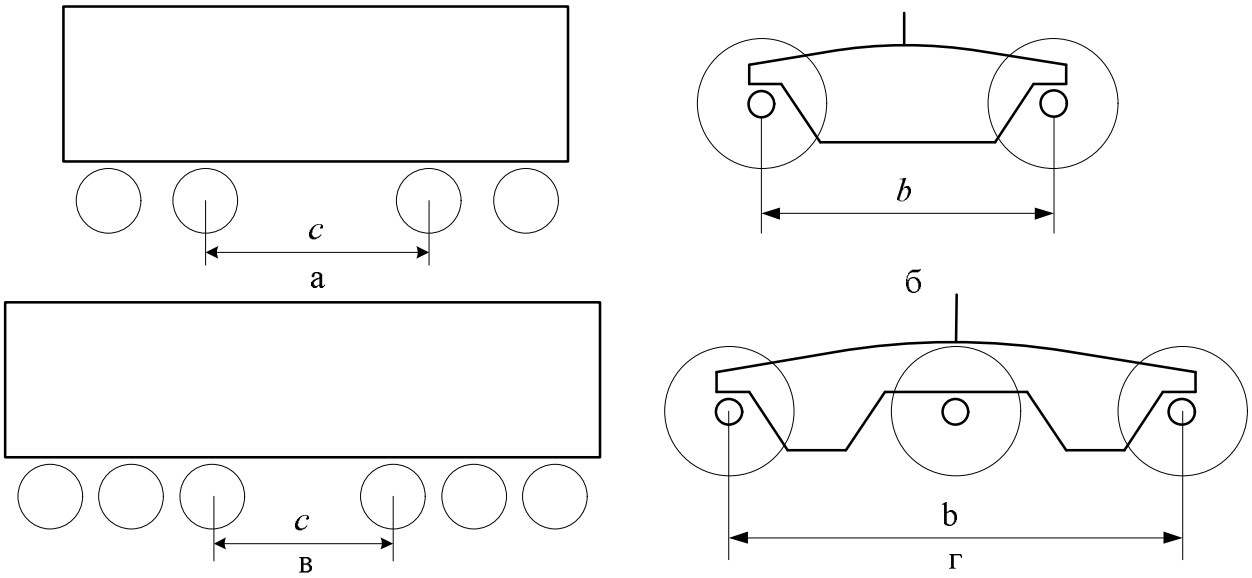


Рисунок 4 – Упрощенные схемы подвижных единиц и тележек

Условие (1) не выполняется для 8-осных вагонов, у которых расстояние *b* больше расстояния *c*, поэтому подсчет осей этих подвижных единиц осуществляется с введением дополнительных параметров.

Для реализации алгоритма подсчета подвижных единиц в проходящем подвижном составе необходимо дополнительное устройство «счетчик вагонов», реализованное с помощью программного кода в блоке обработки информации. «Счетчик вагонов» состоит из реверсивного счетчика набегающих осей (РСНО), реверсивного счетчика базы вагонов (РСБВ), реверсивного счетчика сбегающих осей (РССО). Реверсивный счетчик набегающих осей выполняет подсчет нарастающим итогом количества осей первой половины вагона, проходящих над первым датчиком Д1. После прохода половины вагона РСНО меняет знак на вычитание и в момент появления последней оси вагона над первым датчиком он обнуляется, вырабатывая отметку прохода подвижной единицы. Реверсивный счетчик сбегающих осей функционирует аналогично РСНО, только подсчет осей ведется со второго датчика Д2. Реверсивный счетчик базы вагонов осуществляет подсчет количества осей, находящихся в данный момент между датчиками. В момент обнуления, т. е. во время прохода половины вагона, РСБВ формирует сигнал, переключающий РСНО и РССО в режим вычитания (рисунок 5).

В момент срабатывания УКСПС подсчитанный «счетчиком вагонов» номер подвижной единицы записывается в устройство памяти. При этом счетчик продолжает считать вагоны до конца проследования подвижного состава. По сигналу освобождения блок участка происходит обнуление «счетчика вагонов», после чего он готов к подсчету подвижных единиц следующего поезда.

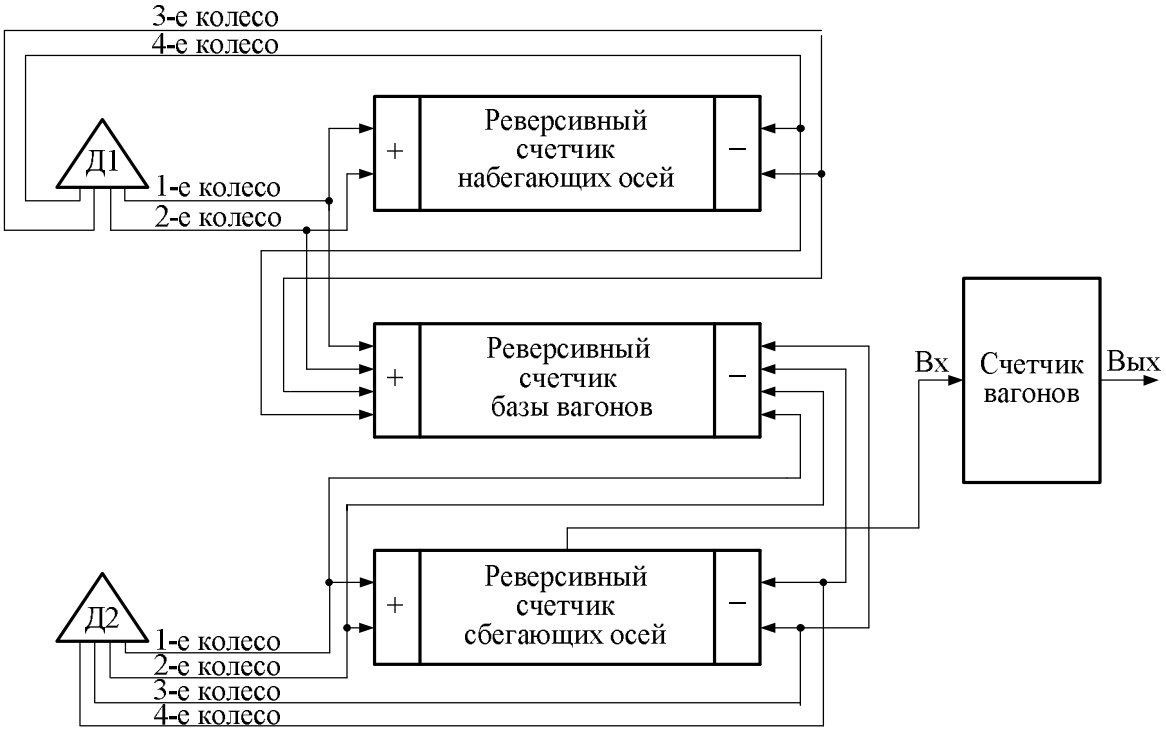


Рисунок 5 – Функциональная схема работы «счетчика вагонов»

На рисунке 6 представлен упрощенный алгоритм подсчета осей подвижной единицы, рассчитанный только на четырехосные вагоны. Полная версия алгоритма учитывает все возможные варианты расположения осей подвижной единицы.

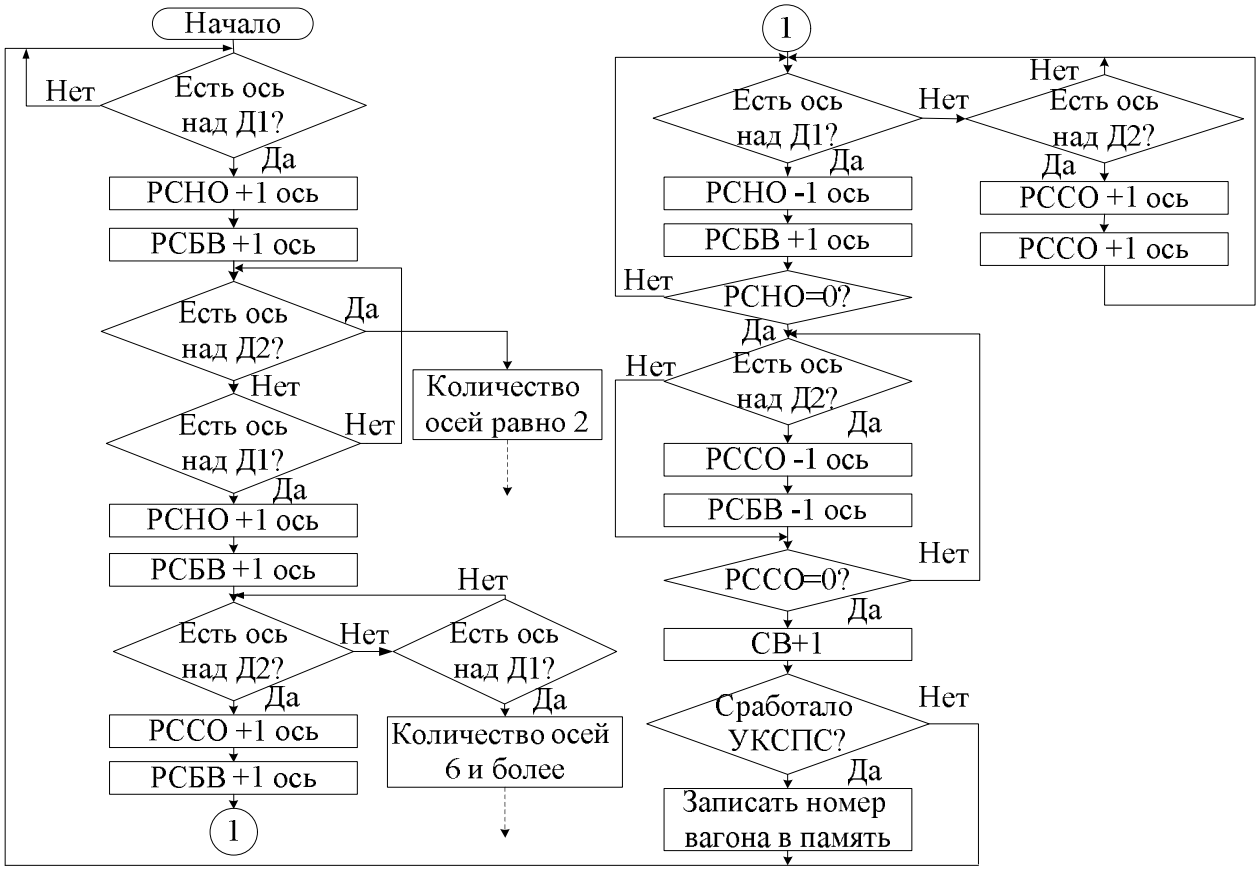


Рисунок 6 – Алгоритм счета осей четырехосного вагона

Программная реализация алгоритма счета осей подвижного состава по сравнению с аппаратной обладает рядом преимуществ, к которым относятся надежность, экономичность и гибкость. Более высокая надежность в первую очередь обусловлена отсутствием элементов транзисторно-транзисторной логики в непосредственной близости от железнодорожного пути, поскольку эти элементы подвержены множеству отказов, таким как короткое замыкание, обрыв, пробой, спаивание ножек микросхем и т. д. Надежность программной реализации обеспечивается также за счет того, что все ошибки, допущенные во время написания программного кода, обнаруживаются во время отладки программы, а также при ее тестировании. После их устранения вероятность сбоя в работе программы сводится к минимуму.

Программная реализация является более экономичной, так как не предусматривает наличия обширной элементной базы и проведения большого объема монтажных работ.

Программный способ реализации дает возможность в режиме реального времени сравнивать временные характеристики, что немаловажно для безошибочного счета вагонов, позволяет осуществлять непрерывный контроль датчиков на наличие сбоев, является более простым в реализации по сравнению с аппаратным способом. Удобный и простой интерфейс позволяет пользователю без дополнительного обучения работать с системой.

При реализации алгоритма счета подвижных единиц программным способом появляется ряд дополнительных возможностей, таких как фиксация времени прохода состава, контроль пропускной способности станции и т. д.

При срабатывании УКСПС, модернизированного за счет внедрения системы счета колесных пар, на экран монитора АРМ ДСП выводится не только информация о том, что устройство сработало, но и номер подвижной единицы в составе поезда, находившейся в зоне действия УКСПС во время его срабатывания. Дежурный по станции передает эту информацию машинисту поезда по радиосвязи. Помощник машиниста, зная номер вагона, осматривает его, затем два вагона по ходу движения и два вагона против хода.

Предложенная модернизация УКСПС позволит существенно сократить время простоев поездов, вызванных ложным срабатыванием УКСПС и, как следствие, уменьшит экономические потери, которые неизбежны при решении задач по обеспечению безопасности движения поездов.

Список литературы

1. Кириленко, А. Г. Счетчики осей в системах железнодорожной автоматики и телемеханики [Текст]: Учеб. пособие / А. Г. Кириленко, А. В. Груша / Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения. – Хабаровск, 2003. – 75 с.

2. Теткин, А. Ю. Единая аппаратно-программная платформа систем ИРДП [Текст] / А. Ю. Теткин, И. Р. Гимальтинов, О. Э. Наринян // Автоматика, связь, информатика. – 2007. – № 8. – С. 12 – 13. – ISSN 0005-2329.

3. Щиголев, С. А. Путевой датчик ДПЭП [Текст] / С. А. Щиголев // Автоматика, связь, информатика. – 2007. – № 3. – С. 9 – 11. – ISSN 0005-2329.

4. Шелухин, В. И. Датчики измерения и контроля устройств железнодорожного транспорта [Текст] / В. И. Шелухин. – М.: Транспорт, 1995. – 119 с.: ил. – Библиогр.: с. 117, 118. – ISBN 5-277-00963-9.

5. Галкин, О. В. Многофункциональный датчик счета осей [Текст] / О. В.Галкин, А. Н. Шабалин // Автоматика, связь, информатика. – 1995. – № 7. – С. 21. – ISSN 0005-2329.

УДК 385:658.012.2

М. М. Никифоров, Р. С. Симак

ЭНЕРГОЭКОНОМИЧЕСКАЯ ПАСПОРТИЗАЦИЯ В СИСТЕМЕ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

В статье рассматривается новое направление оценки эффективности использования топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) на предприятиях железнодорожного транспорта через призму энергоэкономических показателей, связывающих воедино номенклатуру расходов железных дорог и формы статистической отчетности о потреблении ТЭР. Описывается механизм планирования расхода и затрат на ТЭР в рамках системы бюджетного управления, обобщается опыт проведения энергоэкономической паспортизации структурных подразделений нескольких железных дорог в 2008 г., предлагается внедрение разработанной программы «АРМ «Энергоэкономика» для повышения достоверности планирования расхода и затрат на топливно-энергетичекие ресурсы.

Составление энергетических паспортов предприятий является частью системы организационно-технических мер, направленных на энергосбережение. Необходимость построения системы управления затратами и снижения потребления топливно-энергетических ресурсов обусловлена «Энергетической стратегией ОАО «РЖД» на период до 2010 года и на перспективу до 2030 года».

Энергоэкономический паспорт (ЭЭП) в отличие от просто энергетического паспорта предназначен не только для формирования сведений о потреблении топливно-энергетических ресурсов структурного подразделения (СП) железной дороги – филиала ОАО «Российские железные дороги», но и для создания базы для планирования расходов и затрат на топливно-энергетические ресурсы для будущих периодов в системе бюджетного управления ОАО «Российские железные дороги».

Основной акцент в ЭЭП сделан на представление показателей деятельности структурного подразделения в разрезе статей действующей номенклатуры доходов и расходов, а также изменений и дополнений к ней, поэтому энергоэкономические паспорта являются важным дополнением к обычным энергетическим и позволяют детально спланировать объемы потребления ТЭР как в целом, так и по отдельным видам работ, видам деятельности, на уровне структурного подразделения, службы, а также железной дороги – филиала ОАО «Российские железные дороги».

Методика заполнения и типовые формы энергоэкономического паспорта структурного подразделения утверждены приказом центрального управления планирования и нормирования материально-технических ресурсов (ЦУНР) ОАО «РЖД» от 3 октября 2008 г. как результат выполнения договора, заключенного между ОмГУПСом и ЗАО «Отраслевой центр внедрения новой техники и технологии» (ОЦВ). В разработке названных документов принимали участие кафедры ОмГУПСа «Теоретическая электротехника», «Экономика железнодорожного транспорта и управление качеством», «Электрические машины и общая электротехника», «Теплоэнергетика», а также две лаборатории – «Энергосберегающие технологии и электромагнитная совместимость» и «Энергоаудит и энергетическая паспортизация предприятий».

ЭЭП состоит из 11 типовых форм, функциональная взаимосвязь между которыми показана на рисунке 1.

Особенность процесса планирования затрат на топливно-энергетические ресурсы с использованием энергоэкономических паспортов заключается в том, что они заполняются в конце базового периода (года) в течение одного – двух месяцев, поэтому определенную сложность представляет консолидация данных за базовый период, так как в процессе заполнения еще нет фактических значений расхода ТЭР за IV квартал базового периода. Вместо этого используются прогнозные значения, которые вносят определенную погрешность в рассчитываемые плановые показатели будущего периода.

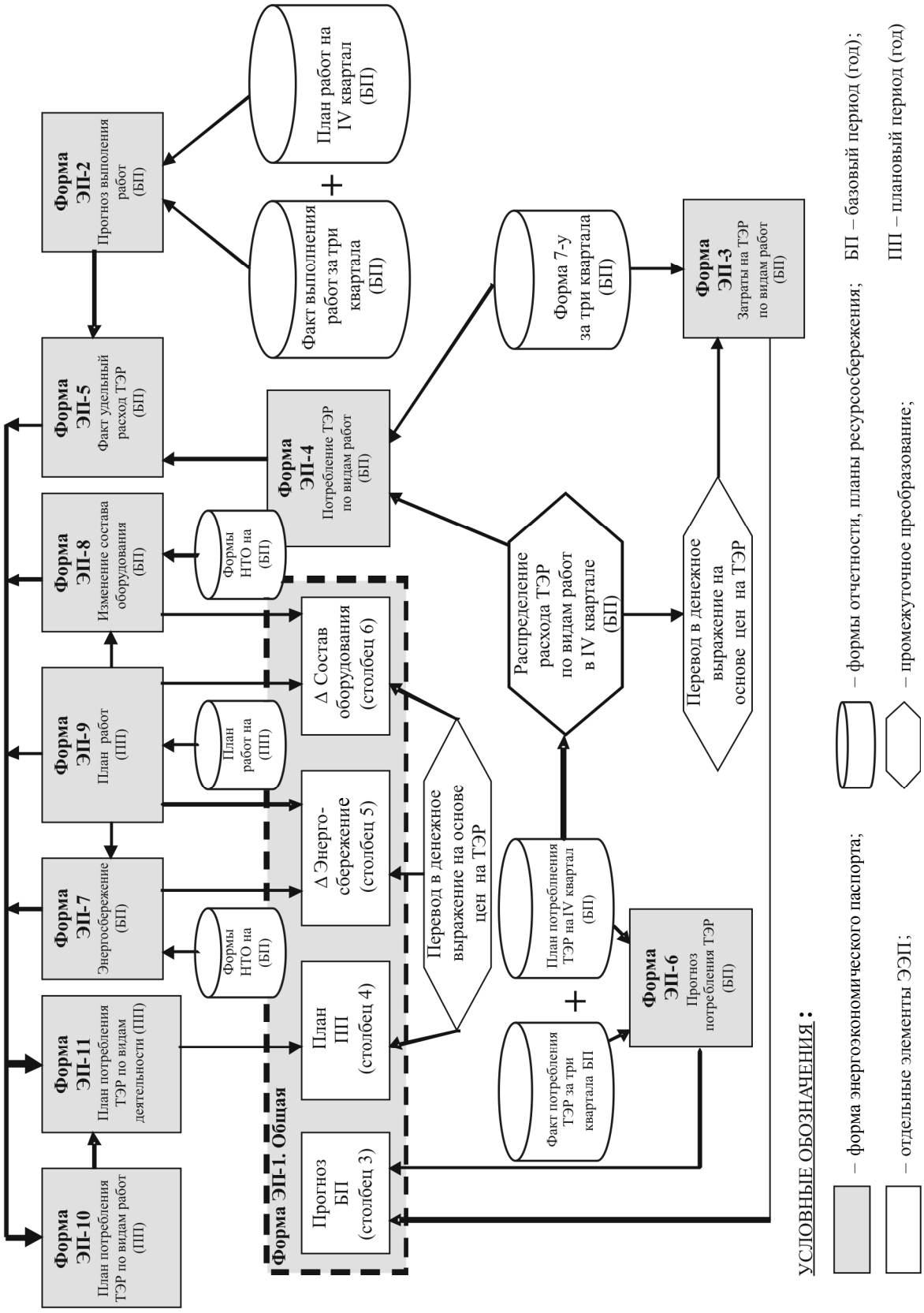


Рисунок 1 – Функциональная взаимосвязь между формами ЭЭП

Форма ЭП-1 включает в себя общие сведения о структурном подразделении железной дороги, в том числе информацию о наименовании и реквизитах структурного подразделения, данные об основных показателях его деятельности (объеме производства продукции, годовых объемах потребления и доле затрат на ТЭР в стоимости выпускаемой продукции) до конца базового периода (прогноз) и ожидаемом уровне потребления топливно-энергетических ресурсов в плановом периоде.

Форма ЭП-2 содержит сведения о прогнозируемых объемах работ в натуральных единицах до конца базового периода по видам работ и видам деятельности структурного подразделения.

Заполнение формы ЭП-2 осуществляется на основании утвержденных форм первичной отчетности (форма ПУ-74, справка о технической оснащенности и т. д.) о фактически выполненных объемах работ за девять месяцев базового периода и утвержденном плане работ на четвертый квартал базового периода.

Форма ЭП-3 содержит сведения о прогнозируемых затратах структурного подразделения на ТЭР по видам работ до конца базового периода.

Форма ЭП-4 содержит сведения о прогнозируемых объемах потребления структурным подразделением ТЭР по видам работ до конца базового периода. Исходными источниками информации для заполнения форм ЭП-3, ЭП-4 являются управленческая отчетность по форме 7-у, утвержденные тарифы (цены) по видам ТЭР, счета-фактуры за оказанные услуги по тепло-, водоснабжению, планируемый объем по видам работ на базовый период, утвержденный прогноз потребления ТЭР на четвертый квартал базового периода и другие документы.

Форма ЭП-5 содержит рассчитанные значения удельных расходов ТЭР на единицу измерителя по конкретной статье расходов из номенклатуры. Данная форма является расчетной и заполняется на основе данных форм ЭП-4 и ЭП-2.

Форма ЭП-6 является сводной формой, где отражаются итоговые расходы с разбивкой по видам ТЭР.

Форма ЭП-7 отражает снижение удельного расхода ТЭР по видам работ за счет внедрения в структурном подразделении в базовом периоде энергосберегающих технических средств и технологий.

Форма ЭП-8 отражает изменение удельного расхода ТЭР по видам работ за счет изменения в структурном подразделении в базовом периоде состава основного энергопотребляющего оборудовании. В форме ЭП-8 не учитывается изменение удельного расхода ТЭР по видам работ, связанное с внедрением в базовом периоде энергосберегающих технических средств и технологий, влияние которых отражено в форме ЭП-7.

Форма ЭП-9 содержит сведения о плановых объемах работ в натуральных единицах на плановый период (год) по видам работ и видам деятельности структурного подразделения.

Заполнение данной формы осуществляется на основании утвержденного плана работ структурного подразделения.

В форме ЭП-10 определяется плановый уровень потребления по видам ТЭР на плановый период в натуральных показателях по статьям расходов (видам работ) и в целом по структурному подразделению.

Форма ЭП-11 включает в себя информацию о планируемом потреблении видов ТЭР по видам деятельности структурного подразделения в плановом периоде. Исходными данными для заполнения данной формы ЭП-11 являются формы ЭП-5, ЭП-7, ЭП-8, ЭП-9, ЭП-10. Данная форма является итогом заполнения ЭЭП структурного подразделения и представляет наибольший интерес, так как включает плановые значения расхода ТЭР на следующий период.

В 2008 г. силами сотрудников ОмГУПСа и других организаций была проведена комплексная паспортизация предприятий сети железных дорог. Полученный опыт свидетельствует о сложности заполнения энергоэкономических паспортов, о большом количестве ошибок, которые допускают ответственные лица структурных подразделений.

Первоначальные формы паспортов, отправленные на железные дороги, не обладали защитой от необоснованного внесения показателей, поэтому их заполнение часто сводилось к

вводу данных в форму ЭП-1, без проявления должного внимания к другим формам, вследствие чего структурные подразделения игнорировали планирование расходов по статьям и видам деятельности и вся суть работы терялась. Причинами этого являются сложность модели энергоэкономического паспорта и взаимоувязанность его элементов, поэтому для обеспечения качества и достоверности заполнения паспортов необходимо автоматизировать этот процесс с использованием современных информационных технологий.

В процессе комплексной паспортизации предприятий сети железных дорог сотрудниками ОмГУПСа была разработана программа «АРМ «Энергоэкономика» (зарегистрирована в отраслевом фонде алгоритмов и программ, свидетельство № 12084 от 11.01.2009). Данная программа позволила сформировать энергоэкономические паспорта на уровне структурных подразделений и дороги для нескольких филиалов ОАО «РЖД», а также провести оперативную оценку правильности заполнения паспортов структурными подразделениями в процессе работы.

Основные возможности программы «АРМ «Энергоэкономика»:

1) формирование паспорта структурного подразделения (по одному из 18 видов предприятий, с возможностью создания нового вида при его отсутствии в списке) с защитой от необоснованного внесения показателей;

2) консолидация паспортов структурных подразделений по группам учета (отделения дорог, службы, дирекции и т. д.);

3) анализ паспортов структурных подразделений:

– по общему потреблению топливно-энергетических ресурсов в разрезе их видов;

– по изменению объема работ в разрезе статей и предприятий;

– по удельному расходу ТЭР в разрезе статей и предприятий;

4) аудит правильности заполнения паспортов структурными подразделениями с автоматическим формированием замечаний;

5) преобразование энергоэкономических паспортов подразделений старой формы в новую защищенную автоматизированную форму с одновременным формированием замечаний по ним.

«АРМ «Энергоэкономика» может применяться на следующих нескольких уровнях управления (рисунок 2).

Рисунок 2 – Схема взаимодействия различных уровней управления в процессе энергоэкономической паспортизации

1) Структурные подразделения дороги заполняют и передают ЭЭП в топливно-энергетические центры дорог.

2) Топливно-энергетические центры

– собирают паспорта структурных подразделений;

– осуществляют аудит паспортов;

– формируют паспорт железной дороги.

3) Центральное управление планирования и нормирования материально-технических ресурсов ОАО «РЖД»

– планирует расход ТЭР;

– производит анализ удельного расхода в разрезе служб, отделений в по отдельным структурным подразделениям, с последующим выполнением управляющих и корректирующих воздействий.

На основании изложенного выше можно сделать следующие выводы:

1) без внедрения программы «АРМ «Энергоэкономика» практически невозможно организовать постоянное достоверное планирование затрат на ТЭР в рамках системы бюджетного управления в ОАО «РЖД», о чем свидетельствует полученный в 2008 г. опыт формирования паспортов на сети дорог;

2) другая перспектива применения данной программы заключается в возможности формирования единой базы данных всех энергоэкономических паспортов структурных подразделений и филиалов ОАО «РЖД» для обеспечения обоснованного централизованного планирования расхода ТЭР на основе объемов производства в разрезе видов деятельности по номенклатуре доходов и расходов.

УДК 629.424.1

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОЗА

Анисимов Александр Сергеевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы».
Тел.: (3812) 32-08-97.

Гришина Юлия Борисовна
Аспирант кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 43-81-41.

Михеев Владислав Александрович
Аспирант кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 30-27-68.
E-mail: Micheev_V_A@mail.ru

В статье рассмотрен подход к исследованию взаимовлияния параметров функционирования тепловоза, основанный на использовании аппарата теории графов и алгебры логики. Приведена методика поэтапного построения граф-модели с применением метода обращения функциональных схем и ее обработки с использованием практических алгоритмов минимизации графов применительно к системе охлаждения тепловоза.

Ключевые слова: *параметры функционирования, граф-модель, алгоритмы оптимизации графов, моделирование, система охлаждения тепловоза.*

METHODS OF AN EXPLORING OF INTERFERENCE OF PARAMETERS OF FUNCTIONING OF A DIESEL LOCOMOTIVE

Anisimov Alexander Sergeevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of chair «Locomotives».
Phone: (3812) 32-08-97.

Grishina Julia Borisovna
The post-graduate student of chair «Locomotives», OSTU.
Phone: (3812) 43-81-41.

Miheev Vladislav Aleksandrovich
The post-graduate student of chair «Locomotives», OSTU.
Phone: (3812) 30-27-68.
E-mail: Micheev_V_A@mail.ru

In clause the approach to an exploring of interference of parameters of functioning of a diesel locomotive based on use of the device of the graphs theory and Boolean algebra is viewed. The technique of stage-by-stage construction of columns-models of system of cooling of a diesel locomotive with use of a method of a treatment of function charts is yielded, results of its treatment with use of practical graphs minimization algorithms are presented.

Keywords: *parameters of functioning, columns-models, algorithms of optimization the graphs, modeling, system of cooling of a diesel locomotive.*

УДК 629.424.3: 621.436.03.001.42

АВТОМАТИЗАЦИЯ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ТОПЛИВНОЙ И РЕГУЛИРУЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ ТЕПЛОВОЗНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Блинов Павел Николаевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Декан теплоэнергетического факультета, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент.
Тел.: (3812)-310409, 8-913-964-40-08.
E-mail: blinovpn@omgups.ru

Блинов Александр Павлович
Локомотивное мотор-вагонное депо Омск.
Электромеханик.
Тел.: (3812)-761928, 8-923-678-68-07.
E-mail: blinovap@mail.ru

В статье приводятся теоретические и практические подходы к автоматизации диагностирования на специальном оборудовании некоторых ответственных узлов тепловозных дизелей, таких как топливные насосы высокого давления, форсунки, нагнетательные трубопроводы и регуляторы частоты вращения и мощности. Предлагаемые инновации позволят значительно повысить качество настройки топливной аппаратуры, исключив человеческий фактор, повысить производительность и условия труда работников ремонтных локомотивных депо, создать на стендах условия работы аппаратуры, максимально приближенные к реальным условиям их эксплуатации на тепловозе.

Ключевые слова: *дизели тепловозов, топливная аппаратура, регуляторы частоты вращения, гидравлические характеристики, точность измерений, стенды, автоматизация испытаний.*

AUTOMATION OF THE BENCH TESTS OF THE FUEL AND REGULATED EQUIPMENT OF THE DIESELS

Blinov Pavel Nikolaevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
The dean of faculty «Heat power», Cand.Tech.Sci., the senior scientific employee, the senior lecturer.
Phone: (3812)-310409, 8-913-964-40-08.
E-mail: blinovpn@omgups.ru

Blinov Alexander Pavlovich
Locomotive motorcarload depot Omsk.
The electromechanic.
Phone: (3812)-761928, 8-923-678-68-07.
E-mail: blinovap@mail.ru

In the article are given theoretical and practical approaches to the automation of diagnosis in the special equipment of some critical units of the diesel diesels, such as the fuel high-pressure pumps, sprayer, pressure lines and frequency regulators of rotation and power.The proposed innovations will make it possible to considerably increase the quality of tuning fuel equipment, after excluding human factor, to increase productivity and working conditions of the workers of repair locomotive depot, to create on the stands of the condition for the work of equipment their maximally approximating actual conditions operations on the diesel locomotive.

Keywords: *diesels, fuel apparatus, speed reducers, hydraulic performance, accuracy, stands the test automation.*

УДК 621.815

ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ СОПРЯЖЕНИЯ НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ СОЕДИНЕНИЯ С НАТЯГОМ

Бородин Анатолий Васильевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теория механизмов и детали машин».
Тел.: (3812) 31-06-18.
E-mail: tmdm@omgups.ru

Рязанцева Ирина Леонидовна
Омский государственный технический университет (ОмГТУ).
644050, г. Омск, пр. Мира, 11.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теория механизмов и машин».
Тел. (3812). 23-62-46.
E-mail: tmdm@omgtu.ru

Показано влияние параметров модификации на величину контактного давления, несущую способность деформационной волны и соединения. Приведены данные, свидетельствующие об эффективности предлагаемого решения.

Ключевые слова: *соединение, натяг, модификация, деформационная волна.*

INFLUENCE OF UPDATING OF SURFACES OF INTERFACE ON BEARIING ABILIITY OF CONNECTION WITH THE TIGHTNESS

Borodin Anatoly Vasilievich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr.Sci.Tech., professor, head of the chair «Theory of mechanisms and machine elements».
Phone: (3812) 31-06-18.
E-mail: tmdm@omgups.ru

Ryazantseva Irina Leonidovna
Omsk State Tecnical University (OSTU).
11, Mira av., Omsk, 644050, Russia.
Cand.Tech.Sci. the senior lecturer of chair «Theory of mechanisms and machine elements».
Phone: (3812.) 23-62-46 .
E-mail: tmdm@omgtu.ru

The interference fit loading capacity restoration method by contact surface modification is described. Modification parameters influence on contact pressure value and loading capacity of strain wave is showed. Adduced data affirm suggested technical solution effect.

Keywords: *connection, tightness, updating, deformation wave.*

УДК 621.336

АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ТОКОПРИЕМНИКОВ СКОРОСТНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Маслов Геннадий Петрович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта».

Дятлова Марина Анатольевна
Омский техникум железнодорожного транспорта (ОТЖТ).
644005, г. Омск, ул. Академика Павлова, 24.
Преподаватель, ОТЖТ; аспирант заочной формы обучения, ОмГУПС.
Тел.: 8-904-583-93-02.
E-mail: marad2104@mail.ru

В статье рассматриваются аэродинамические свойства токоприемников 17РР, ТП-250, ТАсС-11, Сп-6М, предназначенных для скоростного движения электрического подвижного состава. Приводятся их спектры обтекания. Определены аэродинамические коэффициенты, необходимые для расчета аэродинамических характеристик. Построены аэродинамические характеристики токоприемников.

Ключевые слова: *токоприемники, полозы, основания, подвижные рамы, спектры обтекания, аэродинамические характеристики.*

THE AERODYNAMIC PERFORMANCE OF HIGH-SPEED CURRENT COLLECTORS OF ELECTRIC STOCK

Maslov Gennady Petrovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr.Sci.Tech., professor of the chair «Railway transportation Electrical supply».

Dytlova Marina Anatolevna
Omsk Railway College (ORC).
24, Academician Pavlov st., Omsk, 644005, Russia.
The teacher, ORC; the post-graduate student of a correspondence mode of study, OSTU
Phone: 8-904-583-93-02.
E-mail: marad2104@mail.ru

The article deals with the aerodynamic properties of current collector 17PP, ТП-250, ТАсС-11, Сп-6М, designed for high-speed operation electric stock. We give them the spectra of flow. Determined aerodynamic coefficients necessary for calculating the aerodynamic characteristics. Construct the aerodynamic characteristics of current collectors.

Keywords: *current collectors, skids, bases, moving frame, flow spectra, aerodynamic characteristics.*

УДК 629.001.1

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОСНАЩЕННОСТИ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЛОКОМОТИВОВ

Овчаренко Сергей Михайлович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Локомотивы».
Тел.: (3812) 31-34-17.
E-mail: ovcharenkosm@mail.ru

На основе анализа составляющих затрат на поддержание работоспособного состояния локомотивного парка предложен критерий оценки эффективности оснащенности диагностического процесса. Критерий может быть использован для оптимизации параметров системы диагностирования локомотивов.

Ключевые слова: *диагностика, ремонт, затраты, достоверность диагностирования.*

ESTIMATION OF THE QUALITY OF THE EXTENT OF OUTFITTING OF THE DIAGNOSTIC PROCESS OF THE LOCOMOTIVES

Ovcharenko Sergey Mihajlovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr.Sci.Tech., the senior lecturer, professor of chair «Locomotives».
Phone: (3812) 31-34-17.
E-mail: ovcharenkosm@mail.ru

On the basis of the analysis of making expenses for maintenance of an efficient condition of locomotive park the criterion of an estimation of efficiency of equipment of diagnostic process is offered. The criterion can be used for optimization of parameters of diagnostic system.

Keywords: *diagnostics, repair, expenditure, the authenticity of the diagnosis.*

УДК 621.336

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТОКОПРИЕМНИКОВ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Павлов Вячеслав Михайлович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая механика».
Тел.: (3812) 31-34-67.
E-mail: pavlovvm@omgups.ru

Финиченко Василий Николаевич
Кандидат технических наук, преподаватель кафедры «Теоретическая механика», ОмГУПС.

Тел.: 8-913-650-05-00.
E-mail: finichenko@mail.ru

В статье рассмотрена усовершенствованная методика расчета взаимодействия токоприемников с контактной подвеской с учетом различного исполнения верхнего узла токоприемника, предложены виды конструкции верхних узлов токоприемников и приведены результаты их экспериментальных исследований.

Ключевые слова: *токоприемник, контактная подвеска, взаимодействие, контактное нажатие, верхний узел, полоз, контактный элемент, подрессоривание, испытание.*

THE ELECTROROLLING STOCK CURRENT COLLECTORS PERFECTION

Pavlov Vyacheslav Mihajlovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of chair «Theoretical mechanics».
Phone: (3812) 31-34-67.
E-mail: pavlovvm@omgups.ru

Finichenko Vasily Nikolaevich
Cand.Tech.Sci.,the teacher of chair «Theoretical mechanics».
Phone: 8-913-650-05-00.
E-mail: finichenko@mail.ru

There is an advanced design methodic of current collectors and a overhead contact line interaction in view of various the pantograph top unit execution in the article, there are current collectors top units designs and their experimental researches results.

Keywords: *pantograph, overhead contact line, interaction, contact pressing, top unit, runner, contact element, cushioning, test.*

УДК 621.313

ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПУТЕМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИИ ОБРАБОТКИ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КОЛЛЕКТОРОВ

Петроченко Сергей Валерьевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Преподаватель кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава».
Тел.: (3812) 31-34-67.
E-mail: c.o.r.d@mail.ru

В статье дан краткий анализ основных неисправностей коллекторов тяговых электродвигателей, обозначены проблемы, связанные с операцией по обточке рабочей поверхности коллекторов, выявлены факторы, в значительной степени влияющие на качество обработанной поверхности, дана оценка влияния этих факторов на качество рабочей поверхности коллектора. Получена математическая модель, описывающая влияние режимов резания на шероховатость рабочей поверхности коллекторов.

Ключевые слова: *тяговый электродвигатель, коллектор, дефект, технология, обточка, шероховатость поверхности, режущий инструмент.*

RECOVERY OF ELECTROMOTOR CAPACITY BY DEVELOPMENT OF COMMUTATORS SURFACE WORKING OPERATION TREATMENT

Petrochenko Sergey Valeryevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
The teacher of chair «Technology of transport mechanical engineering and repair of a rolling stock».
Phone: (3812) 31-34-67.
E-mail: c.o.r.d@mail.ru

In article the brief analysis the basic lacks of electromotor commutators is given, the problems with commutators surface turning operation are identified, factors extensively influenced on commutators surface quality are discovered and an estimate of influence these factors on commutators surface quality are given. Mathematical model describes cutting conditions influence on commutators surface roughness are received.

Keywords: *electromotor, commutator, defect, technology, turning operation, surface roughness, cutting tool.*

УДК 621.336.7

ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗНОСА КОНТАКТНЫХ ПАР УСТРОЙСТВ ТОКОСЪЕМА МОНОРЕЛЬСОВОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

Сидоров Олег Алексеевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение железнодорожного транспорта».
Тел.: (3812) 31-34-46, факс: (3812) 44-28-31.
E-mail: armsid@mail.ru

Ступаков Сергей Анатольевич
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная математика и механика», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-46, факс: (3812) 44-28-31.
E-mail: stupakov1@yandex.ru

Филиппов Виктор Михайлович
Аспирант, ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-46, факс: (3812) 44-28-31.

В статье представлены результаты экспериментальных исследований и расчета износа элементов системы токосъема монорельсового электрического транспорта.

Ключевые слова: *монорельсовый транспорт, устройства токосъема, износ, износоусталостные испытания, моделирование, математическая модель, прогнозирование износа.*

THE RESEARCH OF CURRENT COLLECTOR UNITS CONTACT PAIRS WEAR OF MONORAIL ELECTRIC TRANSPORT

Sidorov Oleg Alekseevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr.Sci.Tech., professor, head of the chair «Railway transportation Electrical supply».
Phone: (3812) 31-34-46, fax: (3812) 44-28-31.
E-mail: armsid@mail.ru

Stupakov Sergey Anatolevich
Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of chair «Applied mathematics and mechanics», OSTU.
Phone: (3812) 31-34-46, fax: (3812) 44-28-31.
E-mail: stupakov1@yandex.ru

Philippov Victor Mihajlovich
The post-graduate student, OSTU.
Phone: (3812) 31-34-46, fax: (3812) 44-28-31.

In the article are presented results of experimental researches and calculation of current collector system elements wear of monorail electric transport.

Keywords: *monorail transport, current collector units, wear, weariness tests, modeling, mathematical model, forecasting of wear.*

УДК 621.316.97

ПОЛЕ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА ВБЛИЗИ СИСТЕМЫ ПРОВОДНИКОВ, РАСПОЛОЖЕННЫХ НА ПОВЕРХНОСТИ ОДНОРОДНОЙ ЗЕМЛИ

Кандаев Василий Андреевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Системы передачи информации».
Тел.: (3812) 31-06-94.
E-mail: kandaev_va@mail.ru

Карпова Лилия Андреевна
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы передачи информации», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-06-94.
E-mail: avdeeva_kv@mail.ru

Авдеева Ксения Васильевна
Преподаватель кафедры «Системы передачи информации», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-06-94, 8-950-798-25-26.
E-mail: avdeeva_kv@mail.ru

В статье изложен метод расчета распределения электрических величин в системе проводников, расположенных на поверхности однородной земли, в поле точечного источника. Если количество проводников больше одного, то расчет электрических величин в земле и проводниках осуществляется с использованием численных методов.

Ключевые слова: *точечный источник, потенциал поверхности земли, плотность тока, проводник, однородная земля.*

FIELD OF THE POINT SOURCE, CLOSED TO THE SYSTEM OF CONDUCTORS, DISPOSED ON A HOMOGENEOUS GROUND SURFACE

Kandaev Vasily Andreevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr.Sci.Tech., professor of the chair «Information transmission systems».
Phone: (3812) 31-06-94.
E-mail: kandaev_va@mail.ru

Karpova Lilia Andreevna
Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of chair «Information transmission systems», OSTU.
Phone: (3812) 31-06-94.
E-mail: kandaev_va@mail.ru

Avdeeva Ksenia Vasiilevna
The teacher of chair «Information transmission systems», OSTU.
Phone: (3812)31-06-94, 8-950-798-25-26
E-mail: avdeeva_kv@mail.ru

This paper presents method of computation of electrical quantities distribution in the system of conductors, located on a homogeneous ground surface in a point source field. If the number of conductors is more then one then electrical quantities are computed with numerical methods.

Keywords: *point source, ground surface potential, current density, conductor, homogeneous ground.*

УДК 669.662.76

К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОТЫ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПРЕДПРИЯТИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Парамонов Александр Михайлович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика».
Тел.: (3812)310-623, (3812) 319-674.
E-mail: amparamonov@mail.ru

Черемисин Василий Титович
Проректор по научной работе, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-13-44.
E-mail: nauka@omgups.ru

Рыжкова Елена Николаевна
Инженер, ОмГУПС.
Тел.: (3812)310-623, 89609906535.
E-mail: ryzhkova_e@mail.ru

В статье рассматриваются пути повышения эффективности и экономичности пламенного нагрева металла. Предложены методика и алгоритм технико-экономической оптимизации рекуперации тепла уходящих газов для конкретного значения их температуры на выходе из рабочего пространства нагревательной печи. Обоснована целесообразность применения разработанного алгоритма для определения экономически выгодной температуры подогрева в рекуператоре воздуха, идущего на горение топлива, при проектировании и эксплуатации нагревательных печей. Применение предлагаемых рекомендаций позволяет повысить тепловую эффективность и экономичность работы нагревательных печей.

Ключевые слова: *нагревательная печь, металл, удельный расход топлива, эффективность, оптимизация, рекуперация.*

TO THE QUESTION OF OPTIMIZATION OF USE OF WARMTH SMOKE GASES OF HEAT-TECHNOLOGICAL INSTALLATIONS THE RAILWAY TRANSPORTATION ENTERPRISES

Paramonov Alexander Mihajlovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr.Sci.Tech., professor of the chair «Power system».
Phone: (3812)310-623, (3812) 319-674.
E-mail: amparamonov@mail.ru

Cheremisin Vasily Titovich
Pro-rector on scientific work, Dr.Sci.Tech., professor, head of the chair «Rolling stock of electric railways», OSTU.
Phone: (3812) 31-13-44.
E-mail: nauka@omgups.ru

Ryzhkova Elena Nikolaevna
Engineer, OSTU.
Phone: (3812)310-623, 89609906535.
E-mail: ryzhkova_e@mail.ru

Ways of increase of efficiency and profitability of flaming heating of metal are considered. The technique and algorithm of technical and economic optimization of recuperation of heat of waste gases for concrete value of their temperature on an exit from working space of the heating furnace is offered. The expediency of application of the developed algorithm for definition economically the optimal temperature of heating of air in a recuperator, fuel going on burning is proved, at designing and operation of heating furnaces. Use of the given workings out allows to raise thermal efficiency and profitability of their work.

Keywords: *the heating furnace, metal, the specific expense of fuel, efficiency, optimization, recuperation.*

УДК 658.26:656.2:519:673

МЕТОД АПРИОРНОЙ ОЦЕНКИ РАСХОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ РЕМОНТА ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Пономарев Антон Витальевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Преподаватель кафедры «Теоретическая электротехника».
Тел.: 8-923-693-20-84, 8-(3812) 41-23-02.
E-mail: antony-mps@mail.ru

В статье рассматриваются возможности повышения эффективности использования электрической энергии. Показаны способы совершенствования существующего подхода к определению расхода электрической энергии на квазидетерминированные технологические процессы ремонта подвижного состава путем выявления отклонений в процессе электропотребления. Представлен также разработанный метод технологически обоснованного определения расхода электрической энергии с использованием имитационного моделирования технологических процессов.

Ключевые слова: *технологический процесс, ремонт подвижного состава, метод определения расхода электрической энергии, имитационное моделирование.*

METHOD OF APRIORI ELECTRIC POWER EXPENDITURE CALCULATION FOR THE TECHNOLOGIC PROCESSES OF A ROLLING STOCK REPAIR

Ponomaryov Anton Vitalevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
The teacher of chair «Theoretical the electrical engineer».
Phone: 8-923-693-20-84, 8-(3812) 41-23-02.
E-mail: antony-mps@mail.ru

In the article the abilities of electric power using efficiency increasing are considered. There is shown the method that allows improving an existing method of electric power expenditure calculation with a help of electric power consumption deviations defining. This way can be used at quasidetermine technologic processes of a rolling stock repair. Also, in this article the developed method of technologically well-founded electric power expenditure calculation with the using simulation modeling is presented.

Keywords: *technological process, rolling stock repair, method of electric power expenditure calculation, simulation modeling.*

УДК 004.62:517.98

ВВЕДЕНИЕ ПОНЯТИЯ «ДЕЛЬТА-ВЕКТОР» В ПРОСТРАНСТВЕ ГИЛЬБЕРТА ДЛЯ КОРРЕКТНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Грицутенко Станислав Семенович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы передачи информации».
Тел.: +960-9838-111.
E-mail: st256@mail.ru

В статье вводится понятие дельта-вектора в пространстве Гильберта. Доказывается теорема, что таких векторов в каждом конкретном пространстве не может быть больше одного. Приводится формула для вычисления данного вектора в том случае, если он существует. Доказывается теорема о разложении остальных векторов пространства в

ряд смещенных дельта-векторов и показывается взаимосвязь этой теоремы с теоремой Котельникова.

Ключевые слова: *линейная алгебра, пространство Гильберта, сверка, дельта-функция, теорема Котельникова.*

INTRODUCTION OF CONCEPT «DELTA-VECTOR» IN HILBERT'S SPACE FOR CORRECT DATA PRESENTATION IN INFORMATION SYSTEMS

Gritsutenko Stanislav Semenovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of chair «Information transfer system».
Phone: +960-9838-111.
E-mail: st256@mail.ru

Definition of the Delta Vector in Hilbert space is discussed in this article. The theorem is proved that number of such vectors is equal or less than one. The formula for this vector calculation is given if this vector is. Theorem about presentation of any vectors of the space by a sequence of shifted Delta Vectors is proved. Correlation of this theorem and Kotelnikov's theorem is shown.

Keywords: *linear algebra, Hilbert space, convolution, Delta function, Kotelnikov theorem.*

УДК 621.316

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ОСВЕЩЕНИЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ

Краснокуцкий Иван Николаевич
Научно-производственное объединение «Мир» (НПО «Мир»).
644105, г. Омск, ул. Успешная, 51.
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Инженер отдела автоматизации НПО «Мир», соискатель кафедры «Радиотехнические и управляющие системы», ОмГУПС.
Тел.: 8-905-099-2334.
E-mail: krasnyii@mail.ru

В статье рассмотрены вопросы построения распределенной системы управления освещением, для которой требуется измерение уровня естественной освещенности. Для выделения тренда предлагается алгоритм экспоненциального сглаживания. Результаты экспериментальных наблюдений обрабатываются методами спектрального анализа и используются в автоматизированной системе управления наружным освещением.

Ключевые слова: *железнодорожная станция, освещение, автоматизированная система, нормирование освещенности.*

THE AUTOMATED INFORMATION-MEASURING CONTROL SYSTEM OF ILLUMINATION OF RAILWAY STATIONS

Krasnokutsky Ivan Nikolaevich
Research-and-production association «WORLD» (RPA «WORLD»).
51, Successful st., Omsk, 644105, Russia.
Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
The engineer of department of automation, RPA «WORLD»; the competitor, OSTU.
Phone: 8-905-099-2334.
E-mail: krasnyii@mail.ru

In work, questions of construction of the distributed control system are considered by illumination for which it is required measurements of level of natural light exposure. For trend allocation the algorithm exponential smoothings is offered. Results of experimental supervision are processed by methods of the spectral analysis and used in the automated control system of external illumination.

Keywords: *railway station, the illumination, the automated system, light exposure rationing.*

УДК 681.32

ЭФФЕКТИВНАЯ ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫХ БЛОКОВЫХ КОДОВ СОВРЕМЕННЫМИ МИКРОПРОЦЕССОРНЫМИ СРЕДСТВАМИ

Лаврухин Андрей Александрович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехнические и управляющие системы».
Тел.: 31-16-72 , 8-903-982-78-48.
E-mail: lavruhinaa@gmail.com

В статье рассмотрены вопросы реализации помехоустойчивых блоковых кодов, в частности, кодов Рида-Соломона, средствами современных микропроцессоров. Описаны способы повышения производительности вычислений за счет архитектурных особенностей одного класса процессоров и предложены рекомендации для получения оптимальной по скорости вычисления программы и предварительного оценивания ее быстродействия. Показано использование предложенных рекомендаций на примере двух наиболее вычислительно затратных участков алгоритмов кодирования и декодирования на базе отечественных процессоров серии «Мультикор». Предложенные рекомендации позволят повысить пропускную способность каналов передачи информации на железнодорожном транспорте за счет принципиальной возможности реализации наиболее эффективных, но алгоритмически сложных кодов.

Ключевые слова: *помехоустойчивый код, цифровая связь, микропроцессор, ассемблер, эффективное программирование.*

EFFICIENT PROGRAM IMPLEMENTATION OF CORRECTION BLOCK CODES BY MEANS OF MODERN MICROPROCESSORS

Lavruhin Andrey Alexandrovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of chair «Radio engineering and operating systems».
Phone: 31-16-72 , 8-903-982-78-48.
E-mail: lavruhinaa@gmail.com

The article is devoted to the implementation of correction block codes, especially Reed-Solomon codes, by means of modern microprocessors. The methods of increasing of calculate performance using architecture features of one processor class are describes. The recommendations

for optimal coding and preliminary performance estimation are suggested. Two examples are showed with high cost calculations fragments of coding and decoding algorithms. The proposed recommendations permits increasing of channel traffic in the railway transport due to fundamental possibility of embedding the most efficient but complicated codes.

Keywords: *correction code, digital communication, microprocessor, assembler, efficient programming.*

УДК 624.012.46.001.24

ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МОСТОВ ПО ДИНАМИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ

Бокарев Сергей Александрович
Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).
630023, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191.
Проректор по научной работе, доктор технических наук, профессор кафедры «Мосты».
Тел.: (383) 328-04-73.
E-mail: armsid@mail.ru

Цветков Дмитрий Николаевич
Старший научный сотрудник лаборатории «Мосты» научно-исследовательского дорожного центра, СГУПС.
Адрес: 630023, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191/3, НИДЦ СГУПС, лаб. «Мосты».
Тел.: (383) 328-03-24, 8-903-901-64-03.
E-mail: cdn@stu.ru

В статье представлен экспресс-метод оценки технического состояния динамических параметров эксплуатируемых сталежелезобетонных пролетных строений по динамическим параметрам.

Ключевые слова: *сталежелезобетонные пролетные строения, метод конечных элементов, динамические параметры, оценка технического состояния, частота собственных колебаний.*

THE EXPRESS TRAIN THE ESTIMATION OF THE TECHNICAL CONDITION MAINTAINED STEEL-FERRO-CONCRETE FLYING STRUCTURES OF RAILWAY BRIDGES ON DYNAMIC PARAMETERS

Bokarev Sergey Alexandrovich
Siberian Transport University (STU).
191, D. Kovalchuk st., Novosibirsk, 630023, Russia.
The pro-rector on scientific work, Dr.Sci.Tech., the professor of chair «Bridges».
Phone: (383) 328-04-73

Tsvetkov Dmitriy Nikolaevich
The senior researcher of laboratory «Bridges», STU.
Address: 191/3, D. Kovalchuk st., a lab. «Bridges», Novosibirsk, 630023, Russia.
Phone: (383) 328-03-24, 8-903-901-64-03.

In work the express train a method of an estimation of a technical condition of dynamic parametres maintained stee-lferro-concrete flying structures on dynamic parametres is presented.

Keywords: *steel - ferro-concrete flying structures, method of final elements, dynamic parametres, estimation of a technical condition, frequency of own fluctuations.*

УДК 534.625.2.001:625.1.03:629.4.032

БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ, ПРОБЛЕМЫ ТЯГИ И ДИНАМИКИ ПОЕЗДА И ИХ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ ФРАКЦИОННОГО АНАЛИЗА

Галиев Ильхам Исламович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Ректор, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая механика».
Тел.: (3812) 31-42-19.

Нехаев Виктор Алексеевич
Доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая механика», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-16-88.
E-mail: nehaevVA@omgups.ru

Николаев Виктор Александрович
Доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая механика», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-16-88.
E-mail: nikolaevVA@omgups.ru

В статье рассмотрены проблемы исследования устойчивости железнодорожного поезда. Указано на необходимость математической проработки получаемых систем дифференциальных уравнений: проведение нормализации, оценка постоянных времени и введение малых параметров. Основным математическим аппаратом служит теорема академика А. Н. Тихонова, позволяющая выполнить разделение движения системы на «быстрые» и «медленные» составляющие. Приведены результаты исследования разброса значений конструктивных элементов рамы тележки вагона на динамическую нагруженность ее узлов и на безопасность движения поезда.

Ключевые слова: *безопасность движения, динамика железнодорожного экипажа, скорость проскальзывания колеса по рельсу, дифференциальные уравнения, продольные силы.*

TRAFFIC SAFETY PROBLEMS OF DRAUGHT AND DYNAMICS OF THE TRAIN AND THEIR RESEARCH BY THE METHOD OF THE FRACTIONAL ANALYSIS

Galiev Ilham Islamovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Rector, Dr.Sci.Tech., professor, head of the chair «Theoretical mechanics».
Phone: (3812) 31-42-19.

Nehaev Victor Alekseevich
Dr.Sci.Tech., professor of the chair «Theoretical mechanics», OSTU.
Phone: (3812) 31-16-88.
E-mail: nehaevVA@omgups.ru

Nikolaev Victor Aleksandrovich
Dr.Sci.Tech., professor of the chair «Theoretical mechanics», OSTU.
Phone: (3812) 31-16-88.
E-mail: nikolaevVA@omgups.ru

In work problems of research of stability of a railway train are considered. It is specified in necessity of mathematical study of received systems differentsialnyh the equations: normalisation carrying out, an estimation of constants of time and introduction of small parametres. As the basic mathematical apparatus the theorem of academician A. N. Tikhonov serves, allowing to execute division of movement of system into "fast" and "slow" components. Results of research of disorder of values of constructive elements of a frame of the cart of the car on dynamic congestion of its knots and on traffic safety of a train are resulted.

Keywords: *traffic safety, dynamics of railway crew, speed of sliding of a wheel on a rail, the differential equations, longitudinal forces.*

УДК 656.212.6.073.22

ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ МНОГОЯРУСНОГО ГРУЗА И ВОСПРИНИМАЕМЫХ КРЕПЛЕНИЕМ НАГРУЗОК ПРИ МАНЕВРОВЫХ СОУДАРЕНИЯХ ВАГОНОВ

Псеровская Елена Дмитриевна
Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).
630023, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191.
Кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав».
Тел.: 8-923-226-77-86.
E-mail: pserovskaya@stu.ru

Хорунжин Сергей Юрьевич
Инженер-технолог НИЛ «ДЦГР», СГУПС.
Тел.: 8-(383)-328-06-66, 8-923-222-51-71.
E-mail: khorunhinsu@mail.ru

Обеспечение безопасности движения поездов и сохранности перевозимых грузов зависит от правильности разработанных технических условий размещения и крепления грузов в вагонах. Исследование в данной области может осуществляться с помощью теоретических и экспериментальных методов. Анализ современных тенденций совершенствования техники показывает, что использование просто экспериментального метода проб и ошибок нерационально, так как требует значительных трудовых и материальных затрат. Более эффективным является системный подход, который позволяет рационально сочетать теоретические и экспериментальные методы исследования.

Ключевые слова: *безопасность движения, груз, крепление, вагон.*

STUDYING OF DYNAMICS OF MANY-TIER CARGO AND LOADINGS PERCEIVED BY FASTENING AT SHUNTING IMPACTS

Pserovskaya Elena Dmitrievna
Siberian Transport University (STU).
191, D. Kovalchuk st., Novosibirsk, 630023, Russia.
Cand.Tech.Sci., the senior lecturer, the head of the chair of chair «Logistics, commercial work and rolling stock».

Phone: 8-923-226-77-86.
E-mail: pserovskaya@stu.ru

Khorunhin Sergey Jurevich
The process engineer NIL «DCGR», STU.
Phone: 8-(383)-328-06-66, 8-923-222-51-71.
E-mail: khorunhinsu@mail.ru

The safety of traffic and the integrity of cargo directly depend on the correctness of the developed technical conditions of location and lashing of cargo in wagons. Research in this area can be carried out by means of theoretical and experimental methods. The analysis of modern tendencies of perfection of technique shows that the use of simply experimental method of tests and errors inefficiently, because requires considerable labour and material expenses. More effective is approach of the systems, which allows rationally to combine the theoretical and experimental methods of research.

Keywords: *traffic safety, cargo, fastening, car.*

УДК 656.259

СОКРАЩЕНИЕ ВРЕМЕНИ ПРОСТОЕВ ПОЕЗДОВ ПУТЕМ МОДЕРНИЗАЦИИ УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ СХОДА ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Сероштанов Сергей Сергеевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика».
Тел.: 8-903-981-69-85.
E-mail: seroshtanovSS@mail.ru

Ходкевич Антон Геннадьевич
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика», ОмГУПС.
Тел.: 8-923-672-68-85.
E-mail: hodkevichAG@omgups.ru

Дремин Иван Владимирович
Аспирант, программист кафедры «Автоматика и телемеханика», ОмГУПС.
Тел.: 8-960-988-80-28.
E-mail: ivan-dremin@yandex.ru

В статье рассматривается задача сокращения времени простоев поездов при срабатывании устройств контроля схода подвижного состава (УКСПС). Сокращение времени достигается за счет модернизации существующей системы УКСПС путем внедрения аппаратно-программного комплекса подсчета подвижных единиц в составе проходящего поезда.

Ключевые слова: *модернизация, сигнальная точка, система УКСПС, аппаратно-программный комплекс, колесная пара, датчик счета осей, аналоговый сигнал, блок обработки информации, подвижная единица, подвижной состав.*

TIME DECREASING OF TRAIN STANDING IDLE BY MODERNIZATION OF THE TRAIN DESCENT CONTROL FACILITY

Seroshtanov Sergey Sergeevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of chair «Automatics and telemechanics».
Phone:8-903-981-69-85.
E-mail: seroshtanovSS@mail.ru

Hodkevich Anton Gennadevich
Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of chair «Automatics and telemechanics», OSTU.
Phone: 8-923-672-68-85.
E-mail: hodkevichAG@omgups.ru

Dremin Ivan Vladimirovich
The post-graduate student, programmer of the chair «Automatics and telemechanics», OSTU.
Phone: 8-960-988-80-28.
E-mail: ivan-dremin@yandex.ru

In this article is considered the problem of train standing idle time decreasing when the train descent control facility is actuated. Time decreasing is reached by modernization of exploited system by hardware-software system implementation. This system is intended for counting of rolling units of the train.

Keywords: *modernization, signal point, the train descent control facility, hardware-software system, wheel pair, axis counting sensor, analog signal, information processing unit, rolling unit, train.*

УДК 385:658.012.2

ЭНЕРГОЭКОНОМИЧЕСКАЯ ПАСПОРТИЗАЦИЯ В СИСТЕМЕ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Симак Роман Сергеевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат экономических наук, доцент кафедры «Экономика железнодорожного транспорта и управление качеством».
Тел.: 8-913-965-0208.
E-mail: ronad@mail.ru

Никифоров Михаил Михайлович
Кандидат технических наук, начальник научно-производственной лаборатории «Энергосберегающие технологии и электромагнитная совместимость», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 44-39-23.
E-mail: nikiforovmm@rambler.ru

В статье рассматривается новое направление оценки эффективности использования топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) на предприятиях железнодорожного транспорта через призму энергоэкономических показателей, связывающих воедино номенклатуру расходов железных дорог и формы статистической отчетности о потреблении ТЭР. Описыва-

ется механизм планирования расхода и затрат на ТЭР в рамках системы бюджетного управления, обобщается опыт проведения энергоэкономической паспортизации структурных подразделений нескольких железных дорог в 2008 г., предлагается внедрение разработанной программы «АРМ «Энергоэкономика» для повышения достоверности планирования расхода и затрат на топливно-энергетичекие ресурсы.

Ключевые слова: *АРМ «Энергоэкономика», номенклатура расходов, бюджетное управление, топливно-энергетические ресурсы, энергоэкономический паспорт, затраты на ТЭР, удельный расход ТЭР.*

POWER ECONOMIC CERTIFICATION IN SYSTEM THE MANUFACTURE ORGANIZATIONS ON THE RAILWAY TRANSPORTATION

Simak Roman Sergeevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Cand.Econ.Sci., the senior lecturer of chair «Economy of a railway transportation and quality management».
Phone: 8-913-965-0208.
E-mail: ronad@mail.ru

Nikiforov Michael Mihajlovich
Cand.Tech.Sci., the chief of research-and-production laboratory «Power-saving up technologies and electromagnetic compatibility», OSTU.
Phone: (3812) 44-39-23.
E-mail: nikiforovmm@rambler.ru

The new direction of evaluating efficiency of fuel and energy resources utilization at railway transport facilities through energy saving indices bringing together railways' expense nomenclature and forms of statistic reports on fuel and energy resources consumption. The mechanism of planning fuel and energy resources consumption and corresponding expenses is presented, the experience of energy efficiency certification of structural branches of some railways in 2008 is summarized.

Keywords: *ARM Energoeconomy, expense nomenclature, budget management, fuel and energy resources, energy efficiency certificate, expenses on fuel and energy resources, specific consumption of fuel and energy resources.*

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 Комяковой Ольге Олеговне по электронной почте: izvestia_transsiba@mail.ru

Правила представления рукописей научных статей в научно-технический журнал «Известия Транссиба»

В редакцию предоставляются:

текст статьи на белой бумаге формата А4 в 2 экз., а также в электронном виде (на любом носителе или по e-mail), имя файла определяется по фамилии первого автора: фамилия.doc;

название статьи, аннотация, ключевые слова, название тематического раздела журнала, в который представляется статья (в отдельном файле – на русском и английском языках);

сведения об авторах в отдельном файле на русском и английском языках (фамилия, имя, отчество, ученая 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.

Требования к рукописи статьи:

рукопись статьи должна содержать УДК (в левом верхнем углу, обычный, 12 пт), инициалы и фамилию (по центру, 11 пт), название статьи (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на русском 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 алфавита, математические символы такие, например, как cos, sin, max, min, – прямым шрифтом;

текст в таблицах, подрисуночные 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;

ссылки на литературу в тексте статьи указываются в квадратных скобках, список литературы имеет заголовок *Список литературы* (не более 10 наименований), библиографическое описание источников оформляется по требованиям ГОСТ 7.1-2003.

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 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.

По всем вопросам, связанным с подготовкой, представлением и публикацией материалов, необходимо обращаться в редакцию.

Редколлегия оставляет за собой право литературной редакции содержания статьи без согласования с авторами.

Научное издание

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Авилов Валерий Дмитриевич – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Бородин Анатолий Васильевич – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Ведрученко Виктор Родионович – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Горюнов Владимир Николаевич – д.т.н., ОмГТУ (Омск);
Гончар Игорь Иванович – д.ф.-м.н., ОмГУПС (Омск);
Демин Юрий Васильевич – д.т.н., НГАВТ (Новосибирск);
Ермоленко Дмитрий Владимирович – д.т.н., ВНИИЖТ (Москва);
Исмаилов Шафигула Калимуллович – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Кандаев Василий Андреевич – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Костюков Владимир Николаевич – д.т.н., НПЦ «Динамика» (Омск);
Кузнецов Андрей Альбертович– д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Лебедев Виталий Матвеевич – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Маслов Геннадий Петрович – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Медведев Владимир Ильич – д.т.н., СГУПС (Новосибирск);
Митрохин Валерий Евгеньевич – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Мочалин Сергей Михайлович – д.т.н., СибАДИ (Омск);
Нехаев Виктор Алексеевич – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Николаев Виктор Александрович – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Овчаренко Сергей Михайлович – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Парамонов Александр Михайлович – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Рауба Александр Александрович – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Сафронов Эдуард Алексеевич – д.т.н., СибАДИ (Омск);
Сидоров Олег Алексеевич – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Сковородников Евгений Иванович – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Харламов Виктор Васильевич – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Четвергов Виталий Алексеевич – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Шпалтаков Владимир Петрович – д.э.н., ОмГУПС (Омск).

Компьютерная верстка – Комякова О. О.

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 ПИ № ФС77-36469.

Адрес редакции: 644046, г. Омск, пр. Маркса, д. 35;
тел./факс: (3832) 31-13-44; e-mail: izvestia_transsiba@mail.ru

Подписано в печать 20.01.2010.
Тираж 500 экз.