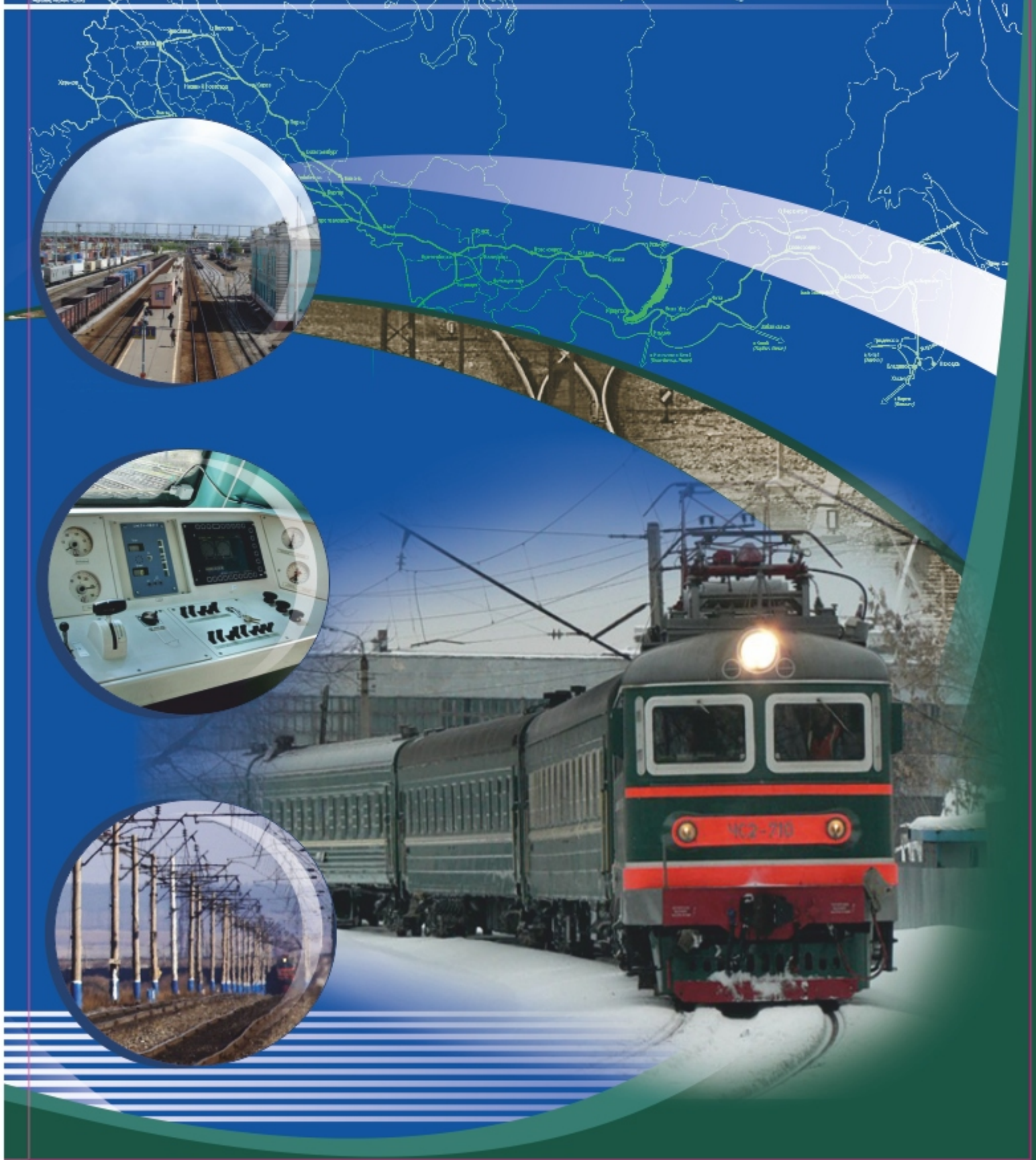
ISSN 2220-4245

научно-технический журнал

ИЗВЕСТИЯ Транссиба

№ 4(8)
2011



ИЗВЕСТИЯ Транссиба
научно-технический журнал
№ 4(8) 2011
Периодичность - 4 выпуска в год

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

1. **Галиев Ильхам Исламович** – главный редактор, президент ОмГУПСа, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ.
2. **Черемисин Василий Титович** – зам. главного редактора, проректор по научной работе и инновациям 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. **Серенко Андрей Федорович** – проректор по научной работе ДВГУПСа, д.т.н., доцент (Хабаровск).
10. **Чугуй Юрий Васильевич** – зав. лабораторией конструкторско-технологического института научного приборостроения СО РАН, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ (Новосибирск).
11. **Шантаренко Сергей Георгиевич** – д.т.н., начальник НИЧ ОмГУПСа (Омск).

Михалева Светлана Сергеевна ответственный секретарь (Омск).

СОДЕРЖАНИЕ

Подвижной состав железных дорог

Беляев А. А., Данковцев В. Т., Четвергов В. А. Управление давлением впрыска топлива в цилиндры тепловозных дизелей в зависимости от реживом работы 2
Володин А. И., Балагин Д. В., Комкова Ю. С. Исследование процессов теплопередачи в тепловозном дизеле 6
Дербилов Е. М. Особенности имитационного моделирования взаимодействия токоприемников и контактных подвесок на сопряжениях 10
Кудряшов Е. В., Заренков С. В., Ходунова О. А. Метод расчета эластичности контактной подвески на основе простой конечно-элементной модели. Измерения эластичности 16
Овчаренко С. М., Корнеев П. С. Моделирование расходных характеристик с учетом технического состояния дизель-генераторной установки тепловоза 26
Сковородников Е. И., Анисимов А. С., Гришина Ю. Б. Методика определения физико-химических характеристик топливных смесей различного элементарного состава 31
Смирнов В. А., Талызин А. С. Энергосбережение при ремонте и техническом обслуживании локомотивов 41
Томилов В. В., Беккер А. В., Яковлев В. Н. Особенности устройств токосъема зарубежных монорельсовых транспортных систем 49
Харламов В. В., Шкодун П. К., Долгова А. В. Применение теории подобия при моделировании износа коллекторно-щеточного узла тягового электродвигателя 57
Шантаренко С. Г., Капустьян М. Ф. Технологический аудит как инструмент обеспечения эксплуатационной надежности локомотивов 63
Шилер В. В., Шипилов П. А., Шилер А. В. Исследование динамических свойств колесной пары с гибкими независимо вращающимися бандажами 69

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

Квиткова Е. Б. Метрики, используемые в алгоритмах временной синхронизации OFDM-сигналов 75
Фирсанов К. А. Основные подходы, используемые при создании высокопроизводительных библиотек математических функций для цифровых сигнальных процессоров с фиксированной точкой 79

Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

Егоров С. А., Гребенюк Л. А., Хорунжин С. Ю. Совершенствование методики расчета элементов крепления в статически неопределимых схемах закрепления единичного груза 87
Комсюкова Д. А., Смердин А. Н., Усманов Ю. А. Частные вопросы организации скоростного движения на сибирских железных дорогах 94
Троицкий В. А. Технические требования и стандарты в процессе международной интеграции систем железнодорожного транспорта 99

АННОТАЦИИ 107

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

УДК 629.424.3:621.436

А. А. Беляев, В. Т. Данковцев, В. А. Четвергов

УПРАВЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЕМ ВПРЫСКА ТОПЛИВА В ЦИЛИНДРЫ ТЕПЛОВОЗНЫХ ДИЗЕЛЕЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЕЖИМОВ РАБОТЫ

В статье предложено новое конструктивное решение, улучшающее количественные и качественные показатели протекания процессов впрыскивания топлива в цилиндры тепловозных дизелей. Приведен сравнительный анализ использования штатной топливной аппаратуры и топливной аппаратуры, оборудованной пневматическими догружателями форсунок.

Количественные и качественные показатели протекания процессов впрыскивания топлива в цилиндры тепловозных дизелей во многом зависят от ряда конструктивных особенностей топливной аппаратуры и ее привода.

В настоящее время с целью улучшения качества распыливания топлива осуществлены конструктивные мероприятия, такие как повышение скорости перемещения плунжера топливного насоса высокого давления (ТНВД) за счет изменения профиля кулачка вала привода насоса, изменение конструкции нагнетательного клапана ТНВД, отключение на холостом режиме работы дизеля ряда топливных насосов и использование двухрежимных форсунок на дизелях типа 10Д100. Несмотря на достигнутые за счет этого успехи остается ряд существенных недостатков в виде неудовлетворительной работы топливной аппаратуры в режимах холостого хода и на промежуточных нагрузках дизеля, что связано с понижением давления топлива из-за уменьшения цикловой подачи в указанных режима работы дизеля.

С целью повышения качества распыливания топлива при любых режимах работы дизеля разработана автоматическая система регулирования давления впрыска топлива [1], приемлемая для различных типов дизелей. Система представлена в виде схемы на рисунке 1.

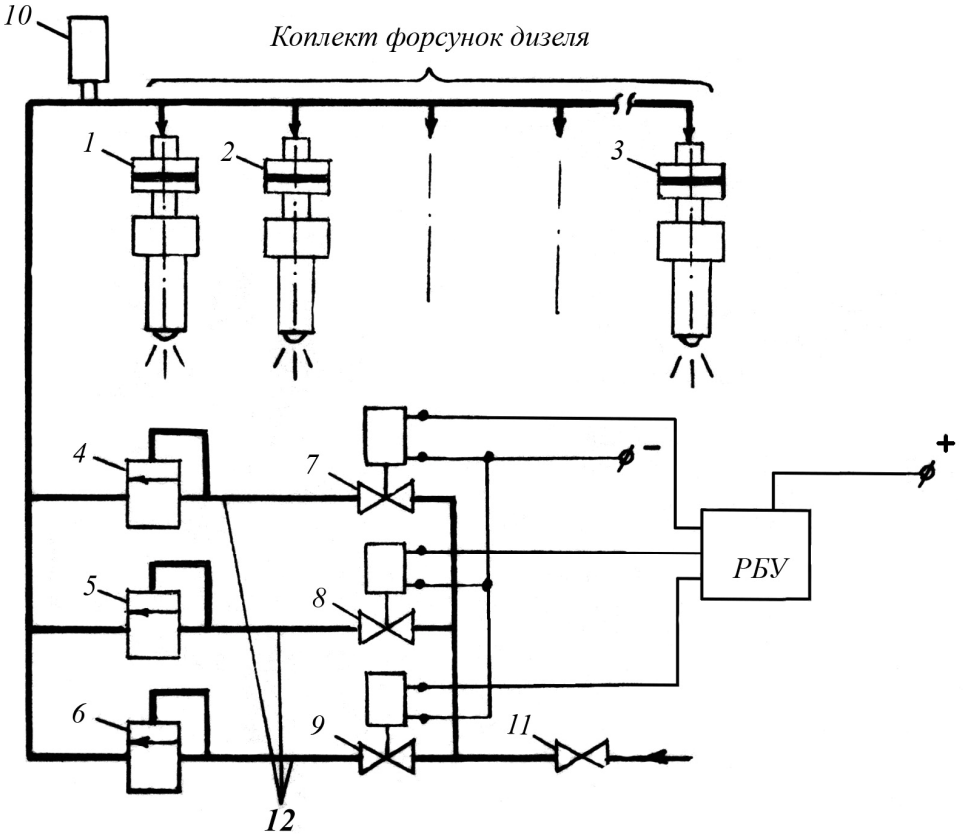


Рисунок 1 - Автоматическая система регулирования давления впрыска топлива в зависимости от режимов работы дизеля

Система включает в себя следующие элементы и узлы: пневматические догружатели форсунок 1, 2, 3, пневматические редукторы 4, 5, 6, электропневматические вентили 7, 8, 9, датчик давления воздуха 10 и релейный блок управления (РБУ). Подвод воздуха к пневмодогружателям форсунок осуществляется от общей воздушной магистрали локомотива через перепускной вентиль 11, перепускные трубопроводы 12, электропневматические вентили 7, 8, 9 и через пневматические редукторы 4, 5, 6.

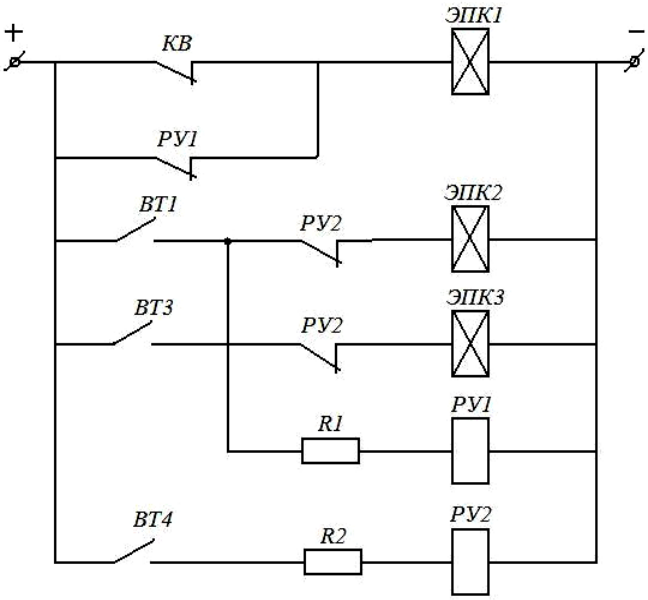


Рисунок 2 - Структурная схема релейного блока управления РБУ

Схема релейного блока управления (рисунок 2), подключенного к контактам контроллера машиниста и контактору КВ, включает в себя электропневматические клапаны ЭПК1, ЭПК2, ЭПК3 и реле управления РУ1 и РУ2 [2].

Автоматическая система на примере дизеля ПД1М функционирует следующим образом.

На режиме холостого хода при всех частотах вращения коленчатого вала дизеля контактор КВ (см. рисунок 2) в цепи возбуждения тягового генератора будет включен, и тогда через электропневматический клапан ЭПК 1 включится электропневматический вентиль 7 (см. рисунок 1), который обеспечит подвод воздуха к пневмодогружателям форсунок через пневморедуктор 4.

При переводе рукоятки контроллера машиниста в первое и второе положение блокировка контактора КВ (см. рисунок 2) отключается и от РУ1 включаются электропневматический клапан ЭПК 1 и электропневматический вентиль 7 (см. рисунок 1), который обеспечит подвод воздуха к пневмодогружателям форсунок через пневморедуктор 4.

При третьем и четвертом положении включается контактор ВТ 1 (см. рисунок 2) и питает реле РУ1, которое размыкает его блокировку контактора РУ1. Так как контакты КВ и РУ1 разомкнуты, то ЭПК 1 обесточивается и через замкнутый контактор РУ2 и электропневматический клапан ЭПК 2 включится электропневматический вентиль 8 (см. рисунок 1), который обеспечит подвод воздуха к пневмодогружателям форсунок через пневморедуктор 5.

При переводе рукоятки контроллера машиниста в пятое положение контроллера размыкается ВТ 1 (см. рисунок 2), перестают работать ЭПК 2 и пневморедуктор 5, но на пятой позиции включается контакт ВТ 3 и, следовательно, ЭПК 3. Затем включится электропневматический вентиль 9 (см. рисунок 1), который подведет воздух к пневмодогружателям форсунок с помощью пневморедуктора 6.

При всех последующих положениях контроллера за счет контакта ВТ 4 и включения реле РУ 2 пневморедукторы перестают подавать сжатый воздух к пневмодогружателям форсунок. Порядок включения катушек, вентилей и реле релейного блока управления в зависимости от позиции контроллера машиниста приведен в таблице 1.

Таким образом, управление автоматической системой регулирования давления впрыска топлива дизеля ПД1М позволяет пневматически воздействовать на пневмодогружатели форсунок при работе дизеля без нагрузки на всех позициях контроллера машиниста, при малых нагрузках на первой и второй позициях и при средних нагрузках дизеля на третьей, четвертой и пятой позициях.

Необходимое давление воздуха в пневмодогружателях форсунок предварительно регулируется в зависимости от режимов работы дизеля, т. е. посредством пневморедукторов 4 – 6, давление устанавливают опытным путем исходя из требуемого качества распыливания топлива. Более мелкое распыливание топлива резко увеличивает суммарную поверхность капель

жидкости, что ускоряет процессы тепло- и массообмена между воздухом высокой температуры и каплями топлива. При этом уменьшение размеров частиц топлива обеспечивает их нагрев и испарение за более короткие промежутки времени, что повышает эффективность процессов рабочего цикла дизеля и уменьшает расход топлива на режимах, где действует пневмодогружатель.

Для оценки экономической эффективности автоматической системы были проведены испытания топливной аппаратуры дизеля ПД1М, оборудованного форсунками с пневмодогружателями.

Таблица 1 – Порядок включения катушек, вентилей и реле

Позиция контроллера	Холостой ход		Режим нагрузки							
			электропневматический вентиль			реле управления		электропневматический клапан		
	ЭПК1	КВ	ВТ1	ВТ3	ВТ4	РУ1	РУ2	ЭПК1	ЭПК2	ЭПК3
0	+	+						+		
1	+	+						+		
2	+	+						+		
3	+	+	+			+			+	
4	+	+							+	
5	+	+		+						+
6	+	+			+		+			
7	+	+			+		+			
8	+	+			+		+			

Результаты измерения часового расхода топлива при различных режимах работы приведены в таблице 2 и на рисунках 3 и 4.

Таблица 2 – Расход топлива на холостом ходу и в режиме нагрузок

Позиция контроллера машиниста i	Время работы на i-й позиции t_i, %	Мощность ДГУ на i-й позиции N_{ei}, кВт	Часовой расход топлива на i-й позиции без пневмодогружателя $B_{чi}$, кг/ч	Часовой расход топлива на i-й позиции с пневмодогружателем $B'_{чi}$, кг/ч	Экономия топлива, %	Годовой эффект $Э_{год}$, р.
Холостой ход						
0+1	48	–	11,90	10,95	8	60995,25
2	3	–	14,00	12,88	8	4484,94
3	1,5	–	16,00	14,72	8	2562,83
4	5	–	20,00	18,40	8	10678,44
5	9	–	24,00	22,08	8	23065,43
6	2	–	27,00	24,84	8	5766,36
7	1	–	31,00	28,52	8	3310,32
8	0,5	–	36,00	33,12	8	1922,12
Режим нагрузок						
1	6	40	12,40	11,66	6	5958,57
2	5,5	85	22,10	20,77	6	9734,73
3	4,5	140	32,20	30,59	5	9670,66
4	5	220	48,40	45,98	5	16151,14

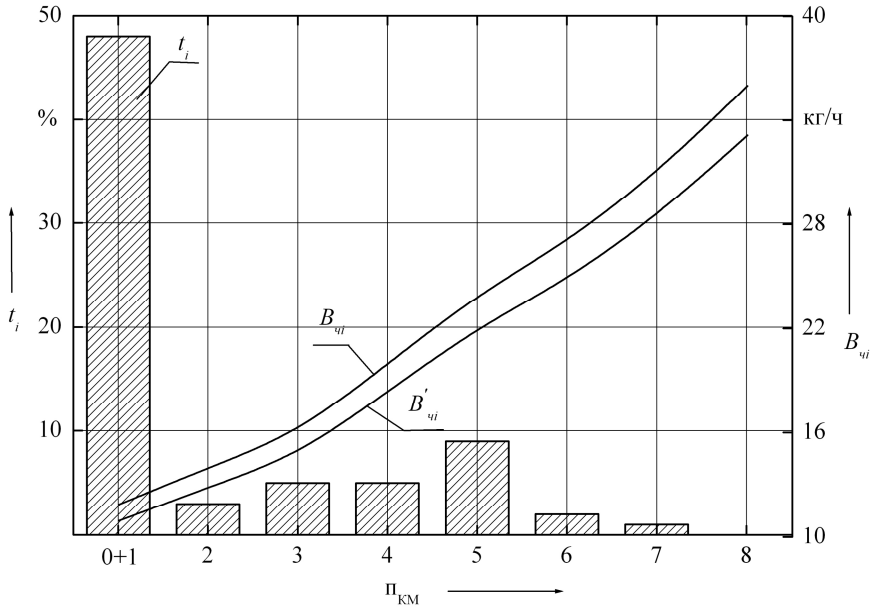


Рисунок 3 – Расход топлива на холостом ходу

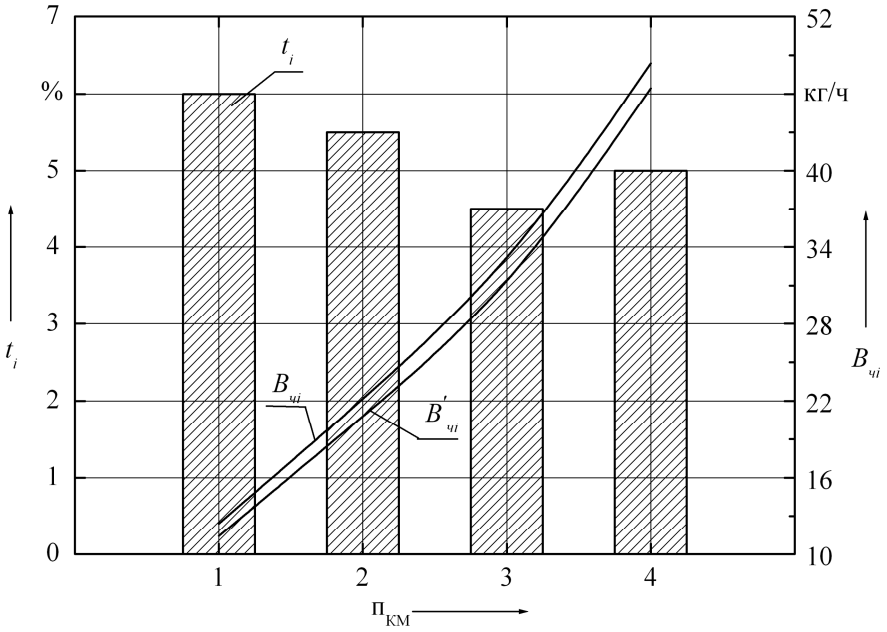


Рисунок 4 – Расход топлива на режимах нагрузки

Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения форсунки с пневмодогружателем определялся по формуле:

$$Э_{год} = 365 t_М Ц_Т \sum_{i=0}^{n} (B_{чi} - B'_{чi}) \frac{t_i}{100},$$

где 365 – количество дней в году;

$t_М$ = 23,0 – 23,5 ч – время работы маневрового локомотива в сутки;

$Ц_Т$ =15,9 р/кг – цена дизельного топлива;

$B_{чi}$ – часовой расход топлива на i-м режиме работы дизеля без пневмодогружателя, кг/ч;

$B'_{чi}$ – часовой расход топлива на i-м режиме работы дизеля при наличии пневмодогружателя, кг/ч;

t_i – доля времени работы на i-й позиции контроллера машиниста за сутки, %.

Расчет годового эффекта также сведен в таблицу 2.

Ожидаемый годовой эффект $Э_{год}$ от внедрения форсунок с пневмодогружателем при цене на дизельное топливо 15,9 р/кг составит 162,7 тыс. р. на один тепловоз.

Данная система впрыска топлива может применяться для установки на тепловозах ТЭМ2 (дизель ПД1М), а также ЧМЭ3 (дизель К6S310DR).

Список литературы

1. Беляев, А. А. Автоматическая система регулирования давления впрыска топлива в зависимости от режима работы дизеля [Текст] / В. А. Четвергов, В. Т. Данковцев, А. А. Беляев // Труды всерос. науч.-практ. конф. «Транспорт-2008»: В 3 ч. / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. Ростов-на-Дону, 2008. – Ч. 3. – 303 с.

2. Беляев, А. А. Регулирование давления впрыска топлива в зависимости от режимов работы тепловозных дизелей [Текст] / В. А. Четвергов, В. Т. Данковцев, А. А. Беляев // Труды всерос. науч.-практ. конф. «Транспорт-2009»: В 3 ч. / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. Ростов-на-Дону, 2009. – Ч. 3. – 423 с.

УДК 629.424.3:621.436

А. И. Володин, Д. В. Балагин, Ю. С. Комкова

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ТЕПЛОВОЗНОМ ДИЗЕЛЕ

В статье рассматриваются вопросы математического моделирования нестационарных температурных полей на поверхности цилиндропоршневой группы тепловозного дизеля.

В настоящее время отечественной и зарубежной промышленностью освоена большая номенклатура инфракрасных термометров, тепловизоров и пирометров, которые практически безынерционны, работают в реальном масштабе времени, позволяют измерять температуру от – 40 до 3000 ^{o}С. Эти приборы обеспечивают непрерывное, быстрое и безопасное измерение температуры объектов, которые двигаются, имеют очень высокую температуру или находятся в труднодоступном месте. Приборы обладают высокой оптической разрешающей возможностью (погрешность 0,01 ^{o}С) и широким набором функций [2].

При тепловой диагностике основным источником информации о температурном поле и его градиентах служит инфракрасное излучение. Сложность процессов, формирующих тепловые поля узлов и деталей подвижного состава, требует разработки адекватных математических моделей физических процессов, характеризующих различного рода взаимодействия составных частей подвижного состава не только друг с другом, но и с внешними системами, а также разработки и адаптации диагностических систем ИК-радиометрического контроля в условиях реальной эксплуатации.

Подвижной состав генерирует собственное инфракрасное излучение за счет работы дизеля, электрических машин (400 К), торможения локомотивов и вагонов (400 – 800 К), нагрева буксовых узлов (340 К) и т. п. В результате происходит формирование внешних тепловых полей, отражающих процессы, происходящие внутри объектов в зависимости от их технического состояния [1].Разработка общих форм математических моделей теплоэнергетической визуализации технических объектов в зависимости от внутренних термодинамических процессов с последующей реализацией в виде прикладных программ для использования их в системах технического диагностирования решит проблему широкого использования методов тепловой диагностики для целей диагностирования.

Основным источником теплоты на тепловозах является дизель-генераторная установка (ДГУ). Характер тепловых полей на внешней поверхности дизеля отражает качество протекания рабочего процесса в цилиндрах и работы ДГУ в целом. Таким образом, термодинамическая визуализация внутренних тепловых процессов позволит не только произвести тепловизионную диагностику, но и сформировать в дальнейшем энергетический паспорт дизеля.

На первом этапе исследований необходимо рассмотреть процессы выделения теплоты при сгорании рабочей смеси, ее передачи через стенку цилиндра в систему охлаждения, крышке цилиндра (при ее наличии), головке поршня и т. д. Прежде всего для этого необходимо составить внешний тепловой баланс для номинального режима работы и исследовать процессы распространения теплоты через стенки дизеля.

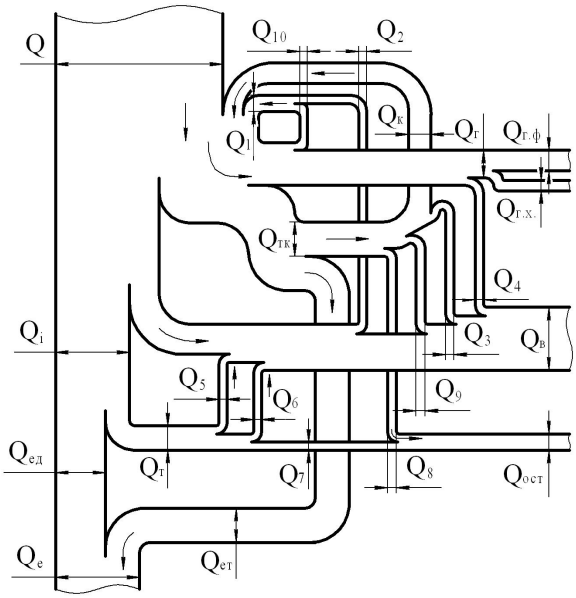


Рисунок 1 – Схема теплового баланса дизеля

Внешний тепловой баланс двигателя удобно представить через схему внутреннего теплового баланса (рисунок 1), из которой видно, как формируются составляющие внешнего теплового баланса [3].

Теплота, выделившаяся при сгорании топлива, обозначена Q. Теплота Q_i эквивалентна индикаторной работе в цилиндре двигателя. Теплота, эквивалентная эффективной работе Q_e, состоит из теплоты $Q_{ед}$, соответствующей эффективной работе поршневой части, и теплоты $Q_{ет}$, эквивалентной эффективной работе турбины, передаваемой на вал двигателя; теплота, отводимая от двигателя охлаждающей жидкостью или воздухом, обозначена $Q_в$; теплота $Q_г$, отводимая из двигателя с выпускными газами, состоит в общем случае из физической теплоты газов $Q_{г.ф}$ и химической теплоты $Q_{г.х}$.

В дизелях теплота, отводимая с выпускными газами из поршневой части, направляется в газовую турбину. В общем случае этот тепловой поток делится на два: один соответствует полезной работе турбины и внутренним потерям теплоты в ней, другой – теплоте, отводимой из турбины с выпускными газами. Теплота, соответствующая полезной работе турбины, делится на теплоту, эквивалентную работе, передаваемой на вал двигателя $Q_{ет}$, и на теплоту, эквивалентную работе привода компрессора $Q_{тк}$. При работе турбины теряется часть теплоты Q_4, которая отводится частично охлаждающей турбину жидкостью (вода), а часть теплоты Q_8 отводится через стенки турбины.

Работа турбины затрачивается на сжатие в компрессоре воздуха. Теплота $Q_к$, эквивалентная работе сжатия наддувочного воздуха, возвращается в цилиндр двигателя при наполнении. При сжатии воздуха в компрессоре он подогревается и дополнительно вносит в цилиндр дизеля теплоту Q_1. Подогрев воздуха происходит от выпускных газов (теплота Q_{10}) и охлаждающей жидкости (теплота Q_2).

В большинстве двигателей, работающих с высоким наддувом, устанавливается охладитель наддувочного воздуха (ОХНВ). Теплота, отводимая в ОХНВ, обозначена Q_3. Теплота, эквивалентная энтальпии сжатого воздуха $Q_к$, возвращается обратно в поршневую часть. В турбине и компрессоре имеются потери теплоты трения в подшипниках Q_9. Теплота, эквивалентная работе трения в подшипниках, выносится из турбины смазочным маслом в ОХНВ и присоединяется к тепловому потоку, который выносится из двигателя охладителем.

Теплота, эквивалентная работе трения $Q_т$ частично передается смазывающему детали маслу (теплота Q_5) и деталям двигателя (теплота Q_6), уносится охладителем и рассеивается в окружающую среду через стенки корпуса двигателя (теплота Q_7).

Применение турбины, работающей на выпускных газах, уменьшает долю теплоты, отводимой с газами, и увеличивает долю полезно используемой теплоты. В двигателях, не имеющих передачи от турбины к валу двигателя, нет потока теплоты $Q_{ет}$.

В случае отключения ОХНВ исключается поток теплоты Q_3.

По результатам расчета внешнего теплового баланса необходимо рассмотреть теплонапряженность деталей дизеля, которая зависит от величины теплового потока через единицу площади поверхности или сечения детали, ее температуры, температурного градиента в стенках и температуры поверхностей трения. Каждый из указанных параметров в отдельности не отражает теплонапряженности детали. Плотность теплового потока характеризуется величиной q, Вт/м^2 [4]:

$$q = \frac{Q}{F}, \qquad (1)$$

где Q – количество теплоты, проходящей через поверхность детали, Вт;

F – площадь поверхности детали, м^2.

Величина теплового потока зависит от степени форсировки двигателя, т. е. от количества топлива, сжигаемого в единице объема цилиндра, и от числа оборотов, или частоты подвода теплоты. Величина теплового потока, проходящего через разные части поверхностей деталей двигателя, различна, поэтому значения температуры разных точек детали неодинаковы.

Температура газов в цилиндре циклически изменяется. Вследствие этого тепловой поток тоже все время меняется. При значительном колебании температуры газов в пределах одного рабочего цикла температура стенки детали изменяется незначительно. По опытным данным в быстроходных двигателях на глубине 1 мм от поверхности, соприкасающейся с горячими газами, колебания температуры не превышают 8 – 10° С. Замена менее теплопроводного материала – чугуна – на более теплопроводный – алюминий – уменьшает колебание температуры примерно в 1,4 – 1,6 раза [7].

Температура поверхности, соприкасающейся с охладителем, практически остается постоянной, а различие температур по толщине стенки детали вызывает неодинаковое ее расширение и определяет температурные напряжения в ней. При увеличении теплового потока средние значения температуры поверхностей детали возрастают.

Повышение температуры стенки возможно до определенного уровня, обусловленного свойствами материала, а в том случае, если поверхность детали является поверхностью трения, то условиями сохранения смазки.

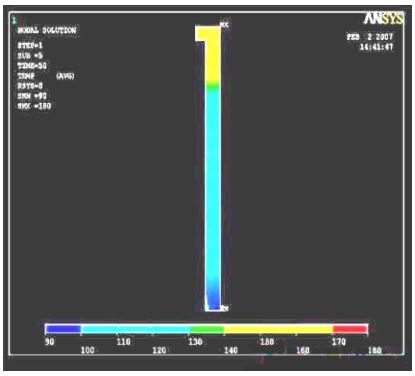
Величина тепловых потоков, проходящих через детали двигателя, определяется напряженностью рабочего процесса, свойствами материала, толщиной стенок детали, температурой охладителя и скоростью движения его относительно стенок. Величину теплового потока через стенки цилиндра можно определить по количеству теплоты, отводимой охладителем. По опытным данным доля теплоты, отводимой с охладителем, для разных двигателей различна и уменьшается при увеличении форсировки процесса путем повышения давления наддува и увеличении размеров цилиндра двигателя и составляет 0,35 – 0,10 подведенной теплоты.

Средняя величина удельного теплового потока через стенки цилиндра для двигателей различных типов q = 87225 ÷ 348900 Вт/м^2 [6].

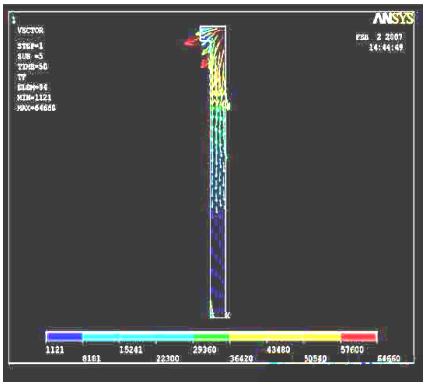
Меньшие значения относятся к четырехтактным двигателям без наддува, а большие – к двухтактным форсированным. Тепловой поток на различных участках рабочего цилиндра неодинаков. Наибольшее количество теплоты, примерно до 60 %, отводится через головку цилиндра и примерно до 40 % – через стенки цилиндров и другие детали двигателя. Наиболее теплонапряженными являются те детали, которым передается наибольшее количество теплоты – это головка цилиндра и детали, интенсивное охлаждение которых затруднительно (поршень и клапаны). Определить количество теплоты, проходящей через отдельные детали двигателя (поршень, втулку, клапаны и т. п.), чтобы выявить их температуру и температурные напряжения, чрезвычайно трудно. Сложность и разнообразие конструктивных форм деталей, равно как и характера теплообмена между рабочим телом и стенками, требуют применения современных программ 3D моделирования процессов нестационарной теплопроводности в технических объектах сложной конфигурации, с помощью которых можно идентифицировать процессы, происходящие внутри технических объектов с внешней теплоэнергетической визуализацией. Моделирование распределения теплового поля в цилиндровой гильзе тепловозного двигателя эффективно выполнять на основе применения метода конечных элементов с применением современных программных продуктов 3D-моделирования, таких как SolidWorks, CosmosWorks, Nastran (рисунок 2).

Цилиндровая втулка рассматривается в продольном сечении без сопутствующих элементов (водяная рубашка, уплотнительные кольца и т. д.).

При расчете в качестве материала цилиндровой втулки принят специальный чугун, легированный добавлением хрома, никеля, молибдена, меди с коэффициентом теплопроводности: λ = 56 Вт/(м·К) [5].



а



б

Рисунок 2 – Моделирование процессов теплопередачи в цилиндровой гильзе тепловозного дизеля 10Д100: а – поля распределения температуры в виде изотерм; б – компоненты теплового потока в векторной форме

Усредненный по поверхности коэффициент теплоотдачи от рабочего тела к стенкам цилиндра ($\alpha_{внутр}$ = 12570 Вт/м^2·К) принят по результатам исследований Г. Б. Розенблита для установившегося режима работы дизеля [4].

Достоверное определение среднего коэффициента теплоотдачи от втулки цилиндра к охлаждающей воде усложняется наличием тонкого пристенного слоя, где агрегатное состояние охлаждающей воды периодически меняется в условиях ее принудительного движения и вибрации теплоотдающей поверхности втулки. По исследованиям Г. Б. Розенблита, на основе обработки обширных экспериментальных данных по тепловозным дизелям в критериях подобия получено эмпирическое выражение для коэффициента теплоотдачи $\alpha_в$ в охлаждающую воду.

Для втулок, полость охлаждения которых образуется напрессованной на нее рубашкой, α определяется по формуле [4]:

$$\alpha_в = 39,2\frac{W_п^{0,41}W_{виб}^{0,23}}{\nu^{0,32}d_{экв}^{0,36}}, \qquad (2)$$

где $W_п$ – скорость течения охлаждающей воды, м/с;

$W_{виб}$ – скорость вибрации втулки в месте, соответствующем перекладке поршня в в.м.т., м/с;

ν – кинематическая вязкость охлаждающей воды, м^2/с;

$d_{экв}$ – эквивалентный диаметр, м.

Теоретические исследования проводились с помощью программных средств конечно-элементного анализа теплообменных процессов, а также редактора электронных таблиц.

В результате моделирования процессов теплопередачи через стенку цилиндровой втулки получены температурные поля, градиенты и тепловые потоки (см. рисунок 2).

В дальнейшем планируется провести моделирование цилиндровой втулки в комплексе с сопутствующими элементами в блоке дизеля при разных условиях работы.

Полученные таким образом математические модели будут представлять собой зависимость теплоэнергетического портрета объекта от его технического состояния и режима работы, что особенно важно для транспортных средств, и с высокой достоверностью реализовывать картину распределения температуры на его поверхности.

В настоящее время на кафедре «Локомотивы» разрабатывается 3D-модель цилиндропоршневой группы на примере дизеля 10Д100. Данная модель позволит оперативно и с высо-

кой достоверностью представить тепловую картину диагностируемой дизель-генераторной установки с учетом внутренних и внешних факторов, определяющих ее работоспособность.

Список литературы

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

2. Володин, А. И. Локомотивные энергетические установки: Учебник [Текст] / А. И. Володин. – М.: Желдориздат, 2002. – 718 с.

3. Орлин, А. С. Двигатели внутреннего сгорания: Учебник [Текст] / А. С. Орлин, Н. А. Круглова. – М.: Машиностроение, 1971. – 399 с.

4. Симсон, А. Э. Тепловозные двигатели внутреннего сгорания: Учебник [Текст] / А. Э. Симсон, А. З. Хомич, А. А. Куриц. – М.: Транспорт, 1987. – 536 с.

5. Луканин, В. Н. Теплотехника: Учебник [Текст] / В. Н. Луканин, М. Г. Шатров, Г. М. Камфер. – М.: Высшая школа, 2002. – 671 с.

6. Аврунин, А. Г. Тепловозные дизели 2Д100 и 10Д100: Учебник [Текст] / А. Г. Аврунин. – М.: Транспорт, 1970. – 320 с.

7. Крутов, В. И. Автоматическое регулирование и управление двигателей внутреннего сгорания: Учебник [Текст] / В. И. Крутов. – М.: Машиностроение, 1989. – 416 с.

УДК 621.332

Е. М. Дербилов

ОСОБЕННОСТИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТОКОПРИЕМНИКОВ И КОНТАКТНЫХ ПОДВЕСОК НА СОПРЯЖЕНИЯХ

В статье рассмотрена динамическая модель взаимодействия токоприемника с контактной подвеской для расчета контактного нажатия в сопряжениях анкерных участков. Предложены алгоритмы расчета жесткости, высотного положения и приведенной массы контактной подвески в зоне сопряжения. Описаны характеристики разрабатываемого асимметричного токоприемника, приведены результаты расчета взаимодействия данного токоприемника с контактной подвеской КС-200-06.

Известно, что срок службы контактного провода зависит от множества влияющих факторов, большинство из которых определяет главным образом средний износ провода. Лишь характер изменений нажатия в контакте существенно влияет на неравномерность износа контактного провода: при большой разнице контактного нажатия на контактном проводе появляются отдельные зоны с повышенным износом. Необходимость замены контактного провода определяется не только его средним износом, но размерами и числом локальных износов. Именно последнее обстоятельство и обусловливает одну из главных задач исследования процесса механического взаимодействия токоприемника и контактного провода – определение условий стабилизации и оптимизации контактного нажатия [1].

Износ токосъемных элементов прямо зависит от контактного нажатия, при увеличении которого интенсивность истирания токоприемника и контактного провода увеличивается. Уменьшение нажатия приводит к снижению износа, но только до определенного значения, после которого дальнейшее уменьшение нажатия ведет к росту износа за счет искрообразования и электроэрозионного разрушения взаимодействующих материалов в зоне контакта.

При увеличении скоростей движения большое внимание уделяется конструкции сопряжений и методам расчета контактного нажатия в сопряжениях анкерных участков, так как именно они становятся причиной ограничения скоростей движения по участку [2]. Особенность

расчета взаимодействия токоприемников и контактных подвесок в сопряжениях анкерных участков объясняется наличием в переходном пролете двух контактных подвесок, расположенных на определенном расстоянии по высоте друг относительно друга.

В связи с высокой стоимостью испытаний на эксплуатируемых участках и необходимостью организации «окон» в регулярном движении подвижного состава со снижением провозной способности участка для линейных испытаний 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.

Для расчета взаимодействия токоприемника с контактной подвеской при высоких скоростях движения воспользуемся моделью, разработанной в Омском государственном университете путей сообщения [3]. Данная модель позволяет рассчитывать контактное нажатие в промежуточных пролетах, однако для определения контактного нажатия в переходном пролете требуется совершенствование алгоритма расчета.

Достоверность расчетов при математическом моделировании токосъема прямо связана с полнотой учитываемых видов воздействия на уровень контактного нажатия со стороны токоприемника, контактного провода, подвижного состава и внешней среды. В расчете учитывались факторы, воздействующие со стороны контактного провода, внешней среды, подвижного состава и параметров токоприемника. Это такие факторы, как сухое и вязкое трение, массогабаритные показатели, жесткости, коэффициент трения скольжения в контакте, длина пролета подвески, амплитуды и частоты колебаний основания токоприемника, аэродинамические параметры и др.

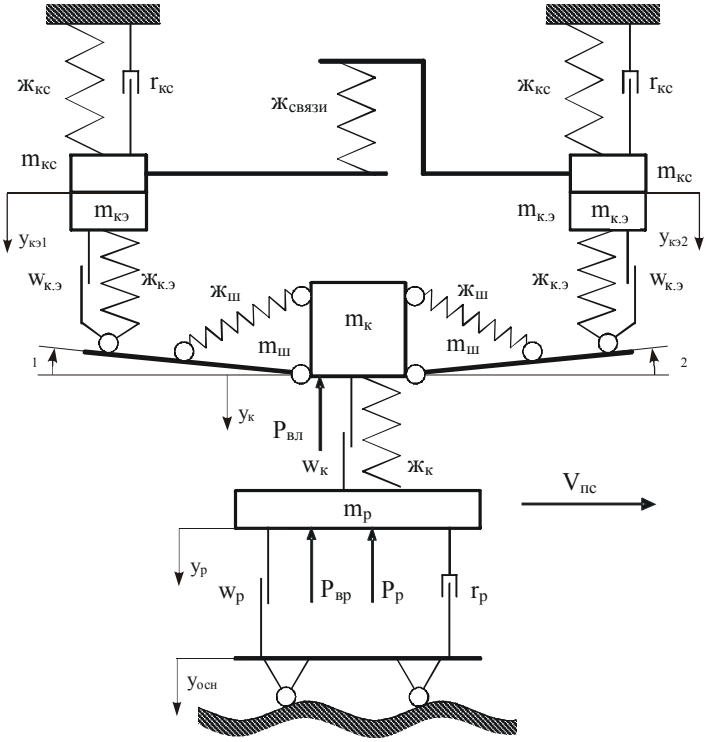


Рисунок 1 – Кинематическая схема взаимодействия токоприемника с контактной подвеской

Принято, что на процесс токосъема действуют следующие факторы: масса и геометрические параметры подвижных частей токоприемника, коэффициент трения скольжения в контакте, траектория провисания и стрела провеса контактного провода, длина пролета, амплитуда и частота вертикальных колебаний подвижного состава, аэродинамическая подъемная сила.

Под характеристикой контактного нажатия понимается зависимость максимального и минимального контактного нажатия в пролете от скорости движения электроподвижного состава (частоты вертикальных колебаний контактного элемента токоприемника). В расчетной схеме на рисунке 1 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; $m_{к.э}$ – масса полоза токоприемника; $w_{к.э}$ – сила сухого трения контактного элемента; $ж_{к.э}$ – 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; $w_{р}$ – сила сухого трения в системе подвижных рам; $r_{р}$ – коэффициент вязкого трения в системе подвижных рам; $P_{р}$ – статическое нажатие токоприемника; $P_{вр}$ и $P_{вл}$ –

аэродинамическая сила, воздействующая на систему подвижных рам и полоз токоприемника; $V_{пс}$ – скорость движения подвижного состава; $y_{осн}$ – отклонение основания токоприемника в вертикальном направлении; $y_р$ и $y_к$ – высотное положение рамы токоприемника и каретки; $y_{кэ1}$ и $y_{кэ2}$ – высотное положение первого и второго по ходу движения полозов; $y_{кс0}$ – высотное положение контактного провода при отсутствии под ним токоприемника; α_1 и α_2 – угол поворота штанги первого и второго по ходу движения полозов.

В расчетах приняты следующие допущения: рамы и штанги токоприемника и 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 безотрывно по контактному проводу, 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 со стороны стрелы провеса контактного провода заключается в изменяющихся по длине пролета эластичности контактной подвески и высотного положения контактного провода при отсутствии под ним токоприемника. Это влияние возрастает с увеличением скорости движения подвижного состава. Высотное положение контактной подвески КС-200-06 в пролете и ее эластичность получены экспериментально с использованием оборудования вагона-лаборатории для испытания контактной сети на перегоне Лихославль – Калашниково Октябрьской железной дороги. Для учета изменяющейся эластичности контактной подвески в зависимости от положения подвижного состава задается две зависимости: эластичность промежуточного пролета от расстояния до начала полета и эластичность переходного пролета (рисунки 2, 3).

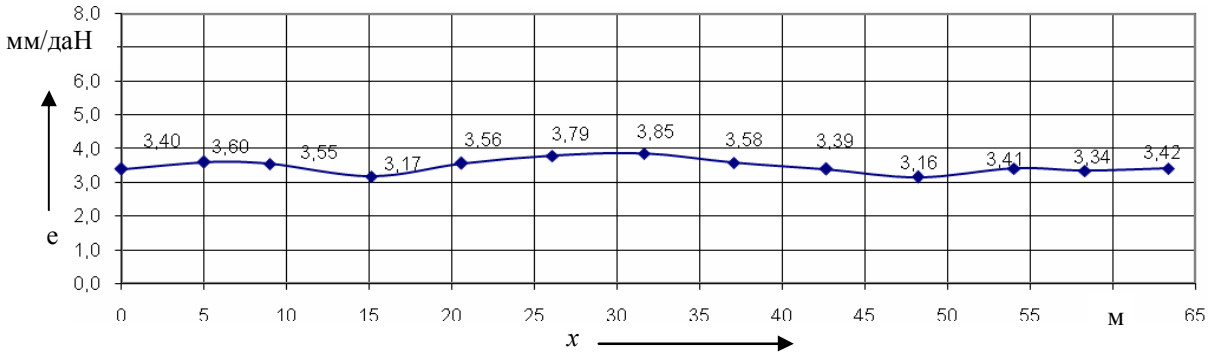


Рисунок 2 – Изменение эластичности по длине промежуточного пролета

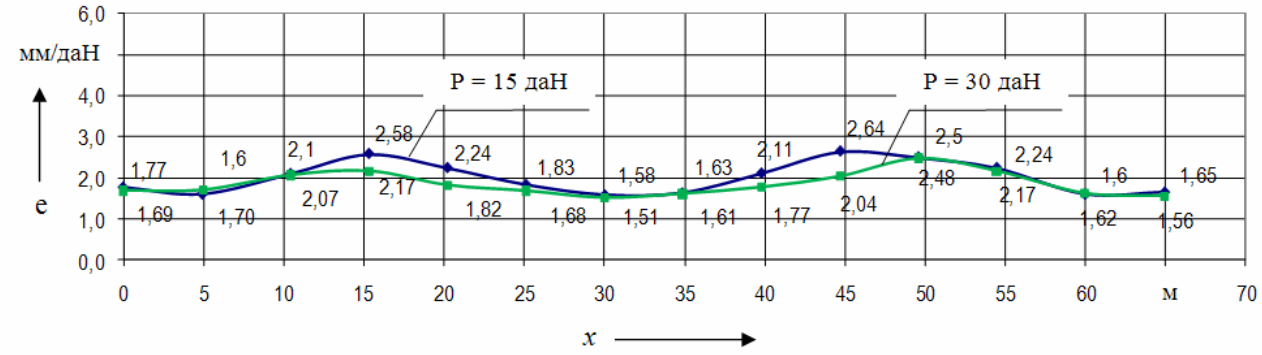


Рисунок 3 – Изменение эластичности по длине переходного пролета при различных нажатиях токоприемника

Зная эти две зависимости и длину рассматриваемых пролетов, можно определить жесткость в любой точке рассматриваемой части подвески анкерного участка, включающей в себя переходной пролет. Для этого составлен алгоритм, изображенный на рисунке 4.

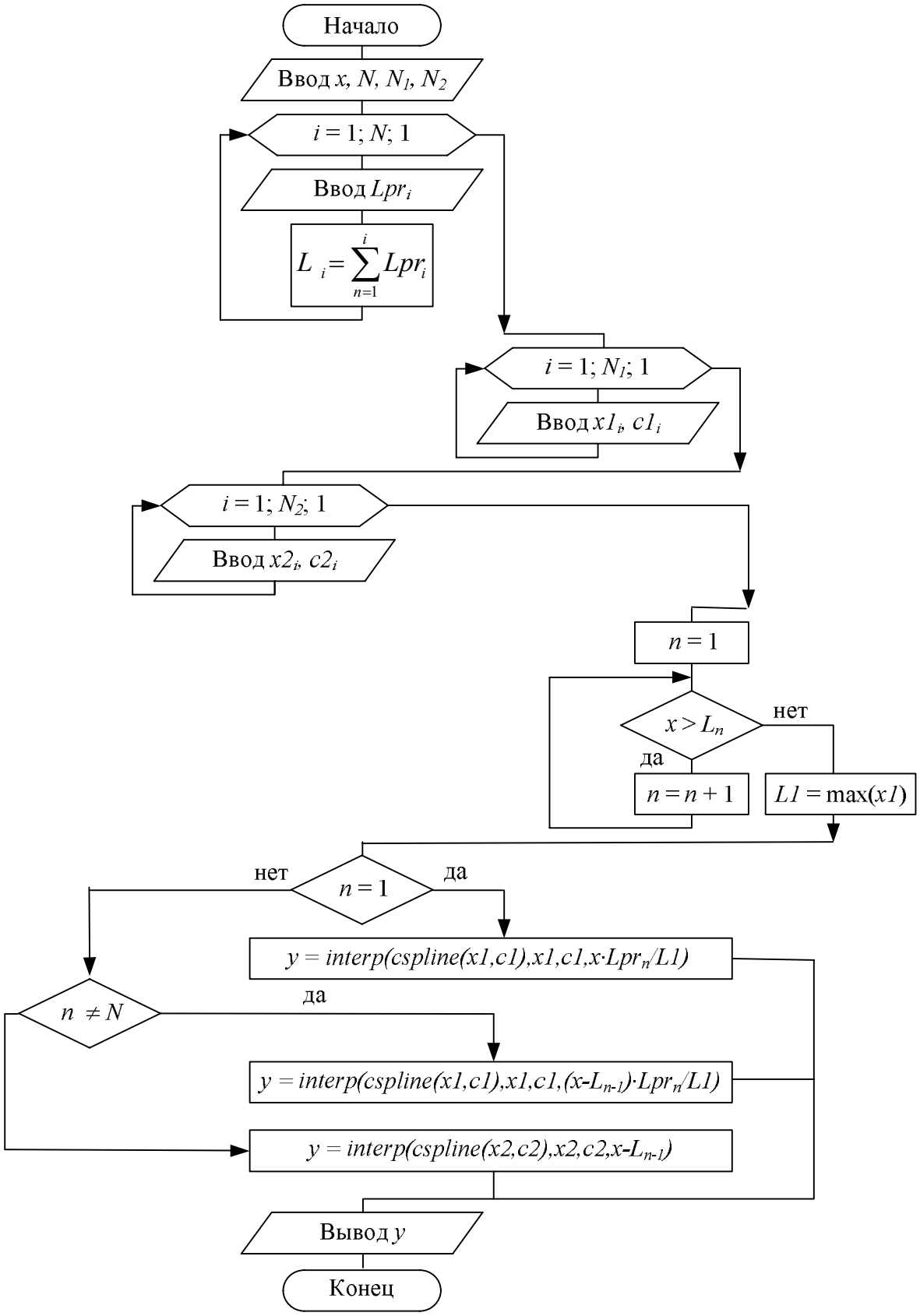


Рисунок 4 – Алгоритм расчета жесткости подвески на расстоянии x от начальной точки расчета

В представленном на рисунке 4 алгоритме введены обозначения: N – количество пролетов; N_1 и N_2 – количество точек в пролете и в переходном пролете, в которых известна жесткость подвески; $x1_i$, $c1_i$ – массивы координат от начала подвески до рассматриваемой точки пролета и жесткости подвески в этих точках; $x2_i$, $c2_i$ – массивы координат от начала подвески до рассматриваемой точки переходного пролета и жесткости подвески в этих точках; $L1$ – длина пролета, для которого указаны данные о жесткости в $x1$ и $c1$; Lpr_i – массив длин пролетов; L_i – массив расстояний от начала расчета до конца i-го пролета; max, interp, cspline – встроенные функции программы MathCAD.

На полозы токоприемника будет оказывать воздействие переносное движение, возникающее при изменении высотного положения полоза токоприемника из-за переменной жесткости контактной подвески.

Кроме воздействия со стороны контактной подвески на процесс токосъема влияют колебания основания токоприемника, амплитудно-частотный спектр которых определяется множеством параметров.

Амплитуда колебаний основания токоприемника определяется согласно нормальному закону распределения случайной величины с математическим ожиданием, равным нулю, и среднеквадратичным отклонением $\sigma_{осн}$.

Для учета высотного положения контактной подвески в каждом из расчетных пролетов составлен алгоритм, представленный на рисунке 5. В представленном алгоритме введены следующие обозначения: N – количество пролетов; y_0 – высота подвески; f_i – массив стрел провеса в пролетах.

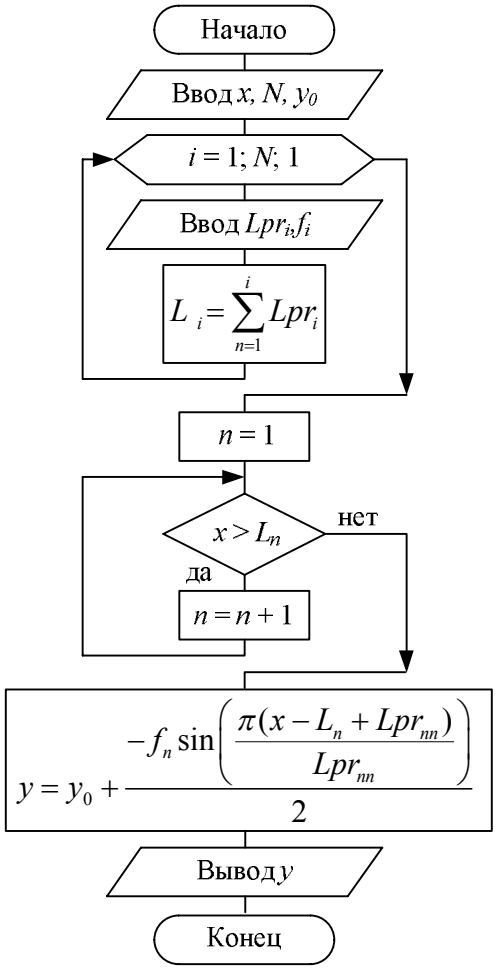


Рисунок 5 – Алгоритм расчета высотного положения контактного провода на расстоянии x от начальной точки расчета

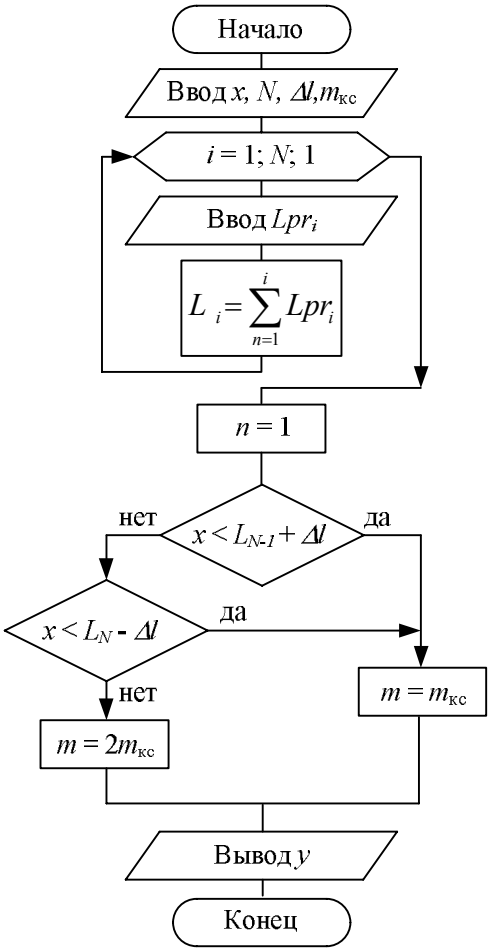


Рисунок 6 – Алгоритм расчета приведенной массы подвески на расстоянии x от начальной точки расчета

Для учета изменения приведенной к точке контакта массы подвески в переходном пролете контактной подвески составлен алгоритм, представленный на рисунке 6. В представленном алгоритме введены следующие обозначения: Δl – расстояние от начала переходного пролета до точки подхвата токоприемником сразу двух ветвей подвески; $m_{кс}$ – приведенная масса подвески в точке контакта токоприемника и подвески.

Для расчета взаимодействия использовались параметры токоприемника АИСТ, разрабатываемого ОмГУПСом в рамках проекта «Разработка и организация высокотехнологичного производства нового магистрального токоприемника для применения на линиях с модернизированной инфраструктурой системы токосъема» (договор № 13.G25.31.0034 от 7 сентября 2010 г.) реализуемого при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

Рисунок 7 – Модель токоприемника АИСТ

Токоприемник АИСТ (рисунок 7) имеет конструкцию асимметричного полупантографа, что позволяет снизить его приведенную массу.

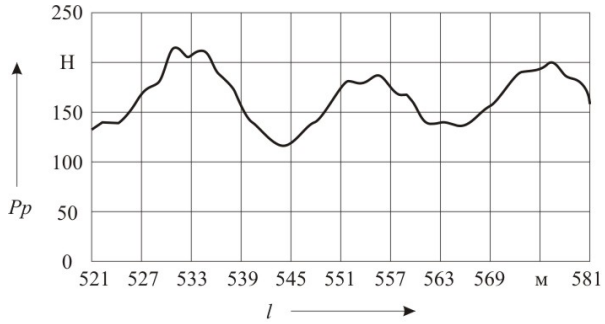
Полозы токоприемника оборудованы автоматическим механизмом аварийного опускания при срыве контактных элементов и при наезде на препятствие. Статическое нажатие токоприемника может регулироваться в диапазоне от 50 до 150 Н. Демпфирующие устройства токоприемника установлены в нижней системе подвижных рам, что позволяет уменьшить колебания полоза при высоких скоростях движения. Аэродинамические устройства стабилизации контактного нажатия токоприемника компенсируют вертикальные силы, действующие на полоз в процессе эксплуатации.

Расчет характеристики контактного нажатия заключается в определении нажатия в пролете для заданного диапазона скоростей движения подвижного состава и построении зависимости максимального и минимального нажатия в пролете от этой скорости.

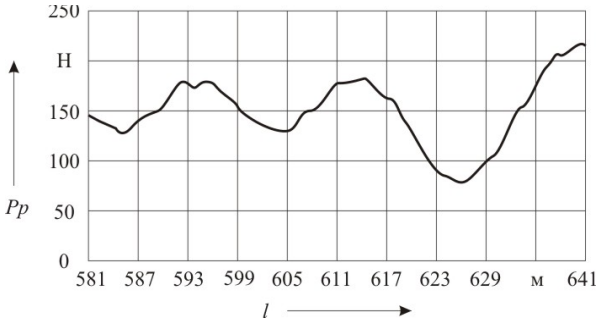
Начальные условия для первого расчетного пролета, как правило, задаются ориентировочно, поэтому данные по взаимодействию токоприемника с контактной подвеской в первых трех – четырех пролетах не должны приниматься во внимание, а при общем числе расчетных пролетов, равном десяти, показатели, характеризующие качество токосъема, усредняются по результатам расчетов для пролетов с 6-го по 10-й.

Таким образом, рассчитывается контактное нажатие на десяти пролетах контактной сети для определенного диапазона скоростей. Для каждой скорости фиксируются максимальное и минимальное контактные нажатия в последних пяти пролетах. Отдельно исследуется форма кривой контактного нажатия в переходном пролете, который является последним пролетом по порядку.

Рассчитанные зависимости контактного нажатия токоприемника на контактный провод от скорости движения электроподвижного состава в промежуточных и переходных пролетах приведены на рисунках 8, 9.



а



б

Рисунок 8 – Контактное нажатие токоприемника при скорости движения электроподвижного состава 180 км/ч: а – в промежуточном пролете (до переходного); б – в переходном пролете

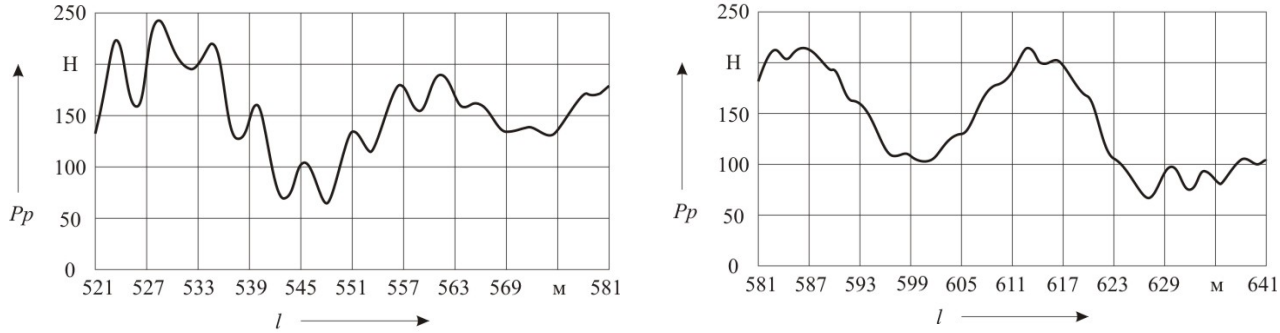


Рисунок 9 – Контактное нажатие токоприемника при скорости движения электроподвижного состава 240 км/ч: а – в промежуточном пролете (до переходного); б – в переходном пролете

Усовершенствованная расчетная модель взаимодействия токоприемника с контактной сетью на сопряжениях позволила добиться приемлемой сходимости расчетных и экспериментальных данных, полученных в ходе линейных испытаний на участке Лихославль – Калашниково Октябрьской железной дороги.

Расчетные параметры токоприемника и контактной подвески получены в ходе прямого эксперимента по методике, разработанной в Омском государственном университете путей сообщения.

Список литературы

1. Михеев, В. П. Контактные сети и линии электропередачи [Текст] / В. П. Михеев. – М.: Маршрут, 2003. – 416 с.

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

3. Обоснование рациональных технических параметров токоприемников для эксплуатации со скоростью более 200 км/ч // Токосъем и тяговое электроснабжение при высокоскоростном движении на постоянном токе: Сб. науч. тр. [Текст] / В. М. Павлов, И. Е. Чертков и др. – М.: Интекст, 2010. – 192 с.

УДК 621.332.531

Е. В. Кудряшов, С. В. Заренков, О. А. Ходунова

МЕТОД РАСЧЕТА ЭЛАСТИЧНОСТИ КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКИ НА ОСНОВЕ ПРОСТОЙ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ. ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛАСТИЧНОСТИ

В статье рассмотрена математическая модель контактной подвески, построенная на основе метода конечных элементов и позволяющая выполнять расчеты эластичности с высокой точностью. В числе преимуществ модели – простота, доступность для воспроизведения, универсальность. Перспективная область применения – расчеты контактных подвесок для высоких скоростей движения в соответствии с международными требованиями. Приведено сравнение результатов расчетов на основе модели с экспериментальными данными, полученными в ходе испытаний скоростной контактной подвески на участке Лихославль – Калашниково Октябрьской железной дороги в 2005 – 2009 гг. Описаны усовершенствованные приборы и методы измерений, использованные при проведении экспериментов.

При повышении скоростей движения на электрифицированных железных дорогах возникает необходимость в разработке новых и совершенствовании существующих конструкций токоприемников и контактных подвесок, для чего требуются адекватные методы расчета и измерения параметров этих систем.

Одной из основных характеристик контактной подвески является *распределение эластичности* в пролетах. Значение эластичности в какой-либо точке пролета по определению равно отношению величины подъема контактного провода к силе нажатия, вызвавшей этот подъем. Распределение эластичности позволяет охарактеризовать процесс взаимодействия токоприемника с контактной подвеской в квазистатическом приближении. Несмотря на то, что эластичность не является единственной характеристикой, определяющей качество токосъема и допустимую скорость движения (необходимо учитывать целый ряд факторов, в том числе динамических), она остается одним из показателей, на который разработчики контактных подвесок обращают первостепенное внимание. Считается, что чем более равномерна кривая распределения эластичности в пролетах подвески, тем меньше размах колебаний точки контакта токоприемника с контактным проводом при движении, соответственно тем бóльшую скорость можно развить при удовлетворительном качестве токосъема. В нормативных документах Международного союза железных дорог приводятся значения относительной неравномерности эластичности, допустимые для различных скоростей движения [1].

В нашей стране до последнего времени применялись методы расчета эластичности, разработанные еще в середине прошлого века [2]. Как показывают результаты экспериментальных исследований, эти методы не позволяют достоверно рассчитывать эластичность современных скоростных контактных подвесок. Традиционные методы используют приближенные формулы и эмпирические коэффициенты, полученные во времена СССР для широко применяемых тогда типовых контактных подвесок, рассчитанных на обычные скорости.

Развитие вычислительной техники в последние десятилетия позволило построить детальные математические модели взаимодействия токоприемников и контактной подвески – как статические, так и динамические. Модели позволяют определять параметры системы токосъема с высокой точностью, в том числе рассчитывать эластичность контактной подвески. В России такие модели разработаны, в частности, в Уральском государственном университете путей сообщения [3] и в компании «Универсал – контактные сети» [4]. Однако большинство известных моделей чрезвычайно сложны для воспроизведения широким кругом специалистов. В открытых источниках информация по их устройству, как правило, неполная.

В настоящей статье дано подробное описание метода расчета эластичности контактной подвески на основе простой конечно-элементной модели, для повторения которой требуются лишь минимальные знания в области математики и программирования.

В первой части статьи рассмотрена последовательность определения равновесного статического состояния контактной подвески методом конечных элементов (МКЭ) в варианте метода перемещений [5]. Эта последовательность, реализованная в виде программного модуля, является основой для расчета эластичности, алгоритм которого приведен во второй части статьи. В третьей части рассмотрены современные методики и приборы для высокоточного измерения эластичности. В заключительной части статьи приведено сравнение результатов расчетов на основе предлагаемого метода с данными экспериментов, полученными с использованием описанных измерительных средств.

Определение равновесного статического состояния подвески на основе МКЭ.

Классическая задача статического расчета механической системы методом конечных элементов заключается в нахождении перемещений под действием внешних сил. Вначале система рассматривается в ненагруженном состоянии: составляется модель системы с разбиением на малые конечные элементы, связанные друг с другом в узлах. Далее формируются математические модели конечных элементов, составляются их матрицы жесткости. Затем на основе матриц жесткости отдельных элементов формируется матрица жесткостей всей системы, связывающая перемещения и нагрузки. Формируется вектор узловых усилий. Решение системы уравнений дает искомые перемещения под действием нагрузок.

Для контактной подвески в качестве начального удобно принять состояние при отсутствии нагрузок от веса проводов, арматуры и т. п. Основные провода (контактный провод, несущий трос) целесообразно представить в модели предварительно натянутых гибких нитей.

Рассмотрим основные этапы статического расчета контактной подвески. В данном расчете натяжение проводов, длина пролетов, межструновых пролетов и струн считаются заданными. Результатом расчета является статическое положение проводов.

Задание начального (ненагруженного) состояния. Разбиение на конечные элементы.

Для выполнения расчета даже в одном пролете контактной подвески необходимо построить модель из нескольких пролетов, так как существенно взаимное влияние элементов смежных пролетов друг на друга. Наиболее адекватные результаты обеспечивает расчет анкерного участка контактной подвески целиком.

В качестве примера рассмотрим модель части подвески, состоящей из трех пролетов (рисунок 1,а). Моделирование выполняется в плоскости *OXY*.

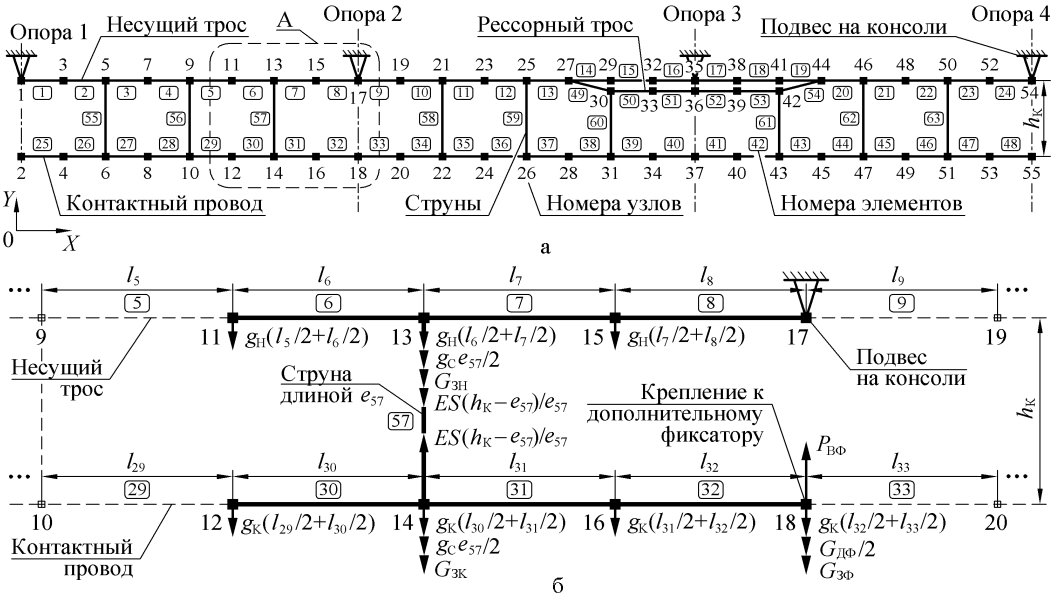


Рисунок 1 – Начальное (ненагруженное) состояние системы: а – пример участка контактной подвески с тремя пролетами; б – фрагмент для узлов 11 – 18 с указанием узловых нагрузок

Для простоты рассмотрения примем число струн в пролете равным трем. Пусть на опоре 3 имеется рессорный опорный узел, остальные опорные узлы – нерессорные. (Для практических расчетов необходимо моделировать реальную схему подвески.)

В начальном состоянии весовые нагрузки отсутствуют, а значит, отсутствует и провес проводов. Примем, что контактный провод и несущий трос расположены горизонтально на расстоянии друг от друга $h_к$, соответствующем конструктивной высоте подвески. Все струны подвески как бы «растянуты» до величины $h_к$. Рессорные тросы в начальном состоянии также прямолинейны и горизонтальны, их вертикальное положение совпадает с положением несущего троса (на рисунке 1 рессорный трос показан условно ниже несущего).

Все провода при такой схеме будут расположены вдоль оси *OX*, а струны – вдоль оси *OY* системы координат *OXY*, что позволит упростить дальнейший расчет.

Разобьем провода на соединенные в узлах конечные элементы так, как показано на рисунке 1. Узлы необходимо предусмотреть в точках подвеса несущего троса на консолях, в местах крепления фиксаторов к контактному проводу, в местах крепления струн, в местах крепления рессорных тросов и в местах установки каких-либо сосредоточенных масс. В межструновых пролетах на проводах также необходимо предусмотреть по несколько узлов (на рисунке 1 показано по одному). Узлы на несущем, рессорном тросе и контактном проводе удобнее всего располагать друг над другом. Каждая струна является одним конечным элементом. Обозначим $N_у$ – получившиеся общее число узлов, $N_э$ – число элементов.

Пронумеруем узлы. Для каждого узлового сечения номера даем по порядку: узел на несущем тросе, на рессорном тросе (если он есть), на контактном проводе. Пронумеруем также конечные элементы, например, как показано на рисунке 1.

Для дальнейших расчетов необходимо задать координаты узлов в начальном состоянии в виде векторов X и Y (каждый имеет размерность $N_у$).

Для описания соответствия между номерами узлов и номерами элементов составим *матрицу инцидентности* (рисунок 2). Эта матрица имеет размерность $3 \times N_э$ и содержит информацию для каждого элемента о его типе и номерах начального и конечного узлов. Например, элемент 6 имеет тип «НТ» (несущий трос), начало в узле 11 и конец в узле 13.

Номер элемента	...	6	7	8	...	30	31	32	...	57	...
Тип элемента	**...**	**нт**	**нт**	**нт**	**...**	**кп**	**кп**	**кп**	**...**	**струна**	**...**
Номер начального узла	...	11	13	15	...	12	14	16	...	13	...
Номер конечного узла	...	13	15	17	..	14	16	18	...	14	...

Рисунок 2 – Пример матрицы инцидентности системы

С помощью матрицы инцидентности гибко задается структура модели контактной подвески: число пролетов, число струн в пролетах, какие опорные узлы рессорные, какие – нерессорные и т. д. Сформировав такую матрицу, последующий расчет можно вести практически независимо от конкретной схемы подвески.

Формирование математических моделей и матриц жесткости конечных элементов.

В модели контактной подвески будем использовать два типа конечных элементов: элемент натянутой гибкой нити для проводов и эластичный элемент для струн (см. рисунок 2).

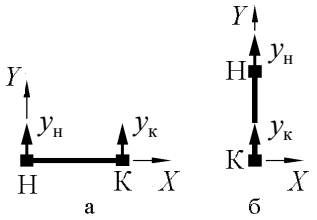


Рисунок 3 – Конечные элементы:
а – натянутой гибкой нити;
б – эластичной струны

Каждый узел этих элементов имеет только одну степень свободы – вертикальное перемещение y. На рисунке стрелками показаны положительные направления перемещений. Для любого конечного элемента с началом в узле «Н» и концом в узле «К» можно сформировать *вектор узловых перемещений* $Q = [y_н \quad y_к]^Т$. Согласно процедуре МКЭ распределенные нагрузки на конечные элементы преобразуются в узловые. Каждый конечный элемент загружен внешними нагрузками и усилиями взаимодействия с соседними элементами.

Нагрузки и усилия образуют вектор узловых усилий $P = [p_н \quad p_к]^Т$. Связь между узловыми усилиями и узловыми перемещениями, происходящими под действием усилий, определяется матрицей жесткости R:

$$R \cdot Q = P. \tag{1}$$

Матрица жесткости рассмотренных элементов имеет размерность 2 × 2:

$$R = \begin{bmatrix} r_{нн} & r_{нк} \\ r_{кн} & r_{кк} \end{bmatrix}. \tag{2}$$

Компоненты матрицы $r_{нн}$, $r_{нк}$, $r_{кн}$, $r_{кк}$ физически представляют собой реакции, возникающие в начальном и конечном узлах элемента (что отмечено первыми буквами «н» и «к» индекса) от смещения узлов – начальных или конечных (вторая буква индекса). Например, $r_{кн}$ – это реакция конечного узла от смещения начального узла.

Пользуясь принципом возможных перемещений [4], можно найти компоненты матриц жесткости для элементов натянутой гибкой нити и эластичной струны:

$$\begin{cases} R_{\text{нити}} = \dfrac{H}{l}\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}; \\ R_{\text{струны}} = \dfrac{ES}{e}\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \end{cases} \quad (3)$$

где H – натяжение нити; l – длина элемента нити; E – модуль упругости струны; S – площадь поперечного сечения струны; e – длина струны.

Формирование глобальной матрицы жесткости всей системы.

Глобальная матрица жесткости всей системы R определяет связь между глобальными векторами узловых перемещений Q и узловых усилий P для всего ансамбля элементов системы ($R \times Q = P$). В случае использования в модели рассмотренных выше элементов матрица R имеет размерность $N_{\text{у}} \times N_{\text{у}}$.

Глобальная матрица жесткости формируется из компонентов матриц жесткости отдельных конечных элементов. Рассмотрим алгоритм формирования матрицы R.

Вначале инициализируем матрицу жесткости – заполняем нулями. Затем для каждого элемента вычисляем его локальную матрицу жесткости. Например, для элемента 6 типа «элемент несущего троса» в соответствии с выражениями (2) и (3) локальная матрица жесткости запишется в виде:

$$R_6 = \begin{bmatrix} r_{\text{нн}} & r_{\text{нк}} \\ r_{\text{кн}} & r_{\text{кк}} \end{bmatrix} = \frac{T}{l_6}\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T/l_6 & -T/l_6 \\ -T/l_6 & T/l_6 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где T – натяжение несущего троса; l_6 – длина элемента 6.

Используя матрицу инцидентности (см. рисунок 2), определяем, что начало элемента 6 соответствует узлу системы с номером 11, а конец – узлу 13. Компонент локальной матрицы $r_{\text{нн}} = T / l_6$, определяющий реакцию начального узла элемента на его же перемещение, засылаем с суммированием в ячейку матрицы R с номерами строки и столбца 11-11. Компонент $r_{\text{кн}} = -T / l_6$ (реакция конечного узла на перемещение начального узла) засылаем с суммированием в ячейку 13-11, $r_{\text{нк}} = -T / l_6$ – в ячейку 11-13 и $r_{\text{кк}} = T / l_6$ – в 13-13. Длину l_6 легко вычислить по координатам узлов элемента: $l_6 = x_{13} - x_{11}$, где x_{11} и x_{13} – компоненты вектора X.

Выполнив эту операцию для каждого элемента, получаем глобальную матрицу жесткости R всей системы. Ее фрагмент приведен на рисунке 4.

Строки и столбцы матрицы R, соответствующие зафиксированным перемещениям узлов, закрепленных на консолях (в рассматриваемом примере – 1, 17, 35, 54), необходимо заполнить нулями, за исключением диагональной ячейки, в которую записывается единица.

	11	12	13	14	15	16	17	18
11	$T/l_5+T/l_6$	0	$-T/l_6$	0	0	0	0	0
12	0	$K/l_{29}+K/l_{30}$	0	$-K/l_{30}$	0	0	0	0
13	$-T/l_6$	0	$T/l_6+T/l_7+ES/e_{57}$	$-ES/e_{57}$	$-T/l_7$	0	0	0
14	0	$-K/l_{30}$	$-ES/e_{57}$	$K/l_{30}+K/l_{31}+ES/e_{57}$	0	$-K/l_{31}$	0	0
15	0	0	$-T/l_7$	0	$T/l_7+T/l_8$	0	**0**	0
16	0	0	0	$-K/l_{31}$	0	$K/l_{31}+K/l_{32}$	**0**	$-K/l_{32}$
17	0	0	0	0	**0**	**0**	**1**	**0**
18	0	0	0	0	0	$-K/l_{32}$	**0**	$K/l_{32}+K/l_{33}$

Рисунок 4 – Фрагмент глобальной матрицы жесткости всей системы R (для узлов 11 – 18)

На рисунке 4 приняты обозначения: T и K – натяжение несущего троса и контактного провода; $l_5 ... l_{33}$ – длина соответствующих элементов проводов; e_{57} – проектная длина струны, соответствующей элементу номер 57.

При принятой нумерации узлов матрица жесткости будет иметь ленточную структуру с шириной ленты 5 для нерессорной подвески и 7, если в системе имеется хотя бы один рессорный узел. Матрица является симметричной и положительно определенной.

Формирование глобального вектора узловых усилий.

Глобальный вектор узловых усилий имеет N_y компонентов. В векторе учитываются приведенные к узловым распределенные нагрузки от веса проводов и зажимов, дополнительных фиксаторов, а также вертикальные составляющие сил реакций фиксаторов. В узлах крепления струн к несущему тросу и контактному проводу в векторе нагрузок дополнительно учитываются встречно направленные силы, обеспечивающие в нагруженном состоянии системы проектное расстояние между несущим тросом и контактным проводом, равное длине струны. Величина этих сил равна $ES\left(h_к - e\right)/e$, где $h_к$ – расстояние между несущим тросом и контактным проводом в исходном состоянии.

Для пояснения принципа формирования вектора нагрузок P на рисунке 5 приведен его фрагмент. На рисунке 1, б для того же фрагмента показано приложение нагрузок.

11	$-g_н(l_5/2+l_6/2)$
12	$-g_к(l_{29}/2+l_{30}/2)$
13	$-g_н(l_6/2+l_7/2)-g_с e_{57}/2-G_{зн}-ES(h_к-e_{57})/e_{57}$
14	$-g_к(l_{30}/2+l_{31}/2)-g_с e_{57}/2-G_{зк}+ES(h_к-e_{57})/e_{57}$
15	$-g_н(l_7/2+l_8/2)$
16	$-g_к(l_{31}/2+l_{32}/2)$
17	**0**
18	$-g_к(l_{32}/2+l_{33}/2)-G_{дф}/2-G_{зф}+P_{вф}$

Рисунок 5 – Фрагмент вектора нагрузок P (для узлов 11 – 18)

На рисунке 5 использованы дополнительные обозначения: $g_н$, $g_к$, и $g_с$ – погонный вес несущего троса, контактного провода и струн соответственно; $G_{зн}$ и $G_{зк}$ – вес струновых зажимов на несущем тросе и на контактном проводе; $G_{д.ф}$ – вес дополнительного фиксатора; $G_{з.ф}$ – вес фиксирующего зажима; $P_{в.ф}$ – вертикальная составляющая реакции фиксатора.

Вертикальные составляющие реакций фиксаторов $P_{в.ф}$ определяются исходя из рассмотрения схемы фиксатора (рисунок 6):

$$P_{вф} = P_и \cdot \mathrm{tg}\left(\arcsin\frac{H_S}{L_ф}\right), \tag{5}$$

где $L_ф$ – длина дополнительного фиксатора; H_S – вертикальное расстояние от оси контактного провода до центра шарнира крепления дополнительного фиксатора к стойке; $P_и$ – усилие от излома контактного провода в месте крепления фиксатора.

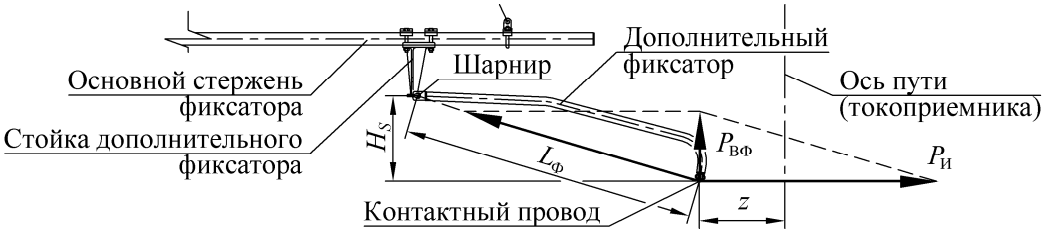


Рисунок 6 – Схема фиксатора

Усилие от излома $P_и$ определяется по известным формулам, приведенным, например, в работе [1]. Так, на прямом участке пути при одинаковых по абсолютным значениям разносторонних зигзагах контактного провода z и одинаковой длине смежных пролетов L

$$P_{и} = 4K \cdot z / L, \qquad (6)$$

где K – натяжение контактного провода.

Для узлов, закрепленных на консолях (например, для узла 17), соответствующие компоненты вектора нагрузок необходимо положить равными нулю. Если концевые узлы на контактном проводе (2 и 55) не закреплены от вертикальных перемещений, прикладываемые нагрузки от фиксаторов и зажимов в этих узлах необходимо поделить пополам.

Нахождение перемещений и координат узлов в нагруженном состоянии.

После формирования глобальной матрицы жесткости R и вектора узловых усилий P, решая систему линейных алгебраических уравнений $R \times Q = P$, найдем вектор узловых перемещений Q. Новые координаты узлов $Y_{нагр}$, соответствующие нагруженному состоянию системы, определим суммированием начальных координат узлов с найденными перемещениями: $Y_{нагр} = Y + Q$. Вектор координат X не изменяется, так как все перемещения вертикальные.

Определение натяжения струн. Проверка разгружения струн.

Натяжение каждой струны $H_{стр}$ в нагруженном состоянии определяется по закону Гука:

$$H_{стр} = ES\frac{e_{нагр} - e}{e}, \qquad (7)$$

где e – начальная (проектная) длина струны; $e_{нагр}$ – длина струны в нагруженном состоянии.

Длина $e_{нагр}$ определяется через координаты узлов в нагруженном состоянии. Если в какой-либо струне возникло сжимающее усилие ($H_{стр} < 0$), она должна быть удалена из модели. Статический расчет необходимо выполнить заново, при этом в матрицу жесткости не заносятся соответствующие разгруженной струне компоненты. В векторе узловых усилий нагрузки $ES(h_к - e)/e$ также не учитываются. При этом весовые нагрузки от всех струн сохраняются.

Алгоритм расчета эластичности контактной подвески.

Рассмотренная выше последовательность статического расчета является основой алгоритма определения эластичности. При программной реализации статический расчет удобно оформить в виде отдельного модуля (подпрограммы).

Алгоритм расчета распределения эластичности включает в себя следующие этапы.

1. Если значения длины струн подвески заранее неизвестны, их необходимо предварительно рассчитать. При этом должно быть задано проектное высотное положение контактного провода под каждой струной с учетом заданной стрелы провеса. Используется метод последовательных приближений. Для расчета длины струн на первой итерации выполняется статический расчет подвески при произвольной начальной длине всех струн, например, 1,5 м. Рассчитывается высотное положение контактного провода при таких струнах и сравнивается с заданным. Далее длина каждой струны корректируется значением разности между заданным и полученным высотным положением контактного провода под струной. После этого статический расчет выполняется еще раз. Снова сравниваются заданное и полученное положения контактного провода, снова корректируется длина струн. Этот процесс повторяется до тех пор, пока разница в длине любой струны на соседних итерациях не окажется менее, например, 1 мм, после чего итерационный процесс прекращается.

2. Выполняется статический расчет контактной подвески с заданной или рассчитанной на этапе 1 длиной струн. В результате определяется высотное положение контактного провода без нажатия.

3. К каждому узлу контактного провода в пределах расчетного пролета последовательно прикладывается заданная сила нажатия $P_т$, которая учитывается в векторе узловых усилий P. Для каждого положения силы выполняется статический расчет. Рассчитывается подъем контактного провода при нажатии с силой $P_т$ относительно положения, определен-

ного на шаге 2. Под каждым узлом вычисляется эластичность как отношение подъема контактного провода к силе нажатия $P_т$.

При выполнении статических расчетов на шаге 3 необходимо учитывать, что при подъеме контактного провода меняются значения параметров фиксаторов H_S (см. рисунок 3), а следовательно, меняются и вертикальные составляющие реакций фиксаторов $P_{вф}$. Целесообразно уточнить значения $P_{вф}$ методом последовательных приближений. На первой итерации в качестве исходных данных используются значения $P_{вф}$ без учета подъема контактного провода. Рассчитывается поднятое положение контактного провода, после чего значения $P_{вф}$ уточняются. Далее расчет выполняется еще раз, при этом в качестве исходных данных используются уточненные значения $P_{вф}$. Этот процесс повторяется до тех пор, пока значения $P_{вф}$ на соседних итерациях не станут почти одинаковыми (с заданной точностью).

Измерение эластичности.

Традиционный способ измерения эластичности заключается в приложении к контактному проводу силы с помощью простейших ручных приспособлений, например, в виде рычага, фиксации силы по динамометру и измерении подъема контактного провода по линейке. Эластичность рассчитывается как отношение подъема контактного провода к силе. Измерения обычно производятся с дрезины (автомотрисы) или лейтера. Такой способ имеет два существенных недостатка: низкую скорость измерений и недостаточную точность вследствие погрешностей приборов, а также колебаний контактного провода, из-за которых трудно однозначно зафиксировать его положение. Кроме того, рычажные приспособления не обеспечивают вертикальность приложения силы нажатия.

В ходе испытаний скоростной контактной подвески на экспериментальном участке Лихославль – Калашниково Октябрьской железной дороги в период с 2005 по 2009 г. были разработаны усовершенствованные методы и приборы для измерения эластичности.

Измерения эластичности производились двумя способами: с помощью вагона-лаборатории для испытания контактной сети (ВИКС) и с помощью специально разработанных автоматизированных устройств.

Определение статических характеристик с помощью ВИКС основано на автоматическом получении дискретных данных, аппроксимированных до кривых отжатия контактных подвесок по участку при известном нажатии измерительного токоприемника. Для каждого принятого значения статического нажатия проводится три поездки. Измерение эластичности подвески осуществляется путем регистрации высоты контактных проводов без нажатия токоприемника, а затем при нажатии 15 и 30 даН. Обработка результатов дает данные об эластичности во всех пролетах анкерных участков как отношение величины отжатия проводов и нажатия токоприемника. По полученным значениям строится кривая распределения эластичности по длине анкерного участка. Скорость движения вагона-лаборатории при измерении высотного положения контактных проводов с фиксированным нажатием измерительного токоприемника не должна превышать 10 км/ч, что способствует отстройке от дополнительных сил воздействия на контактную сеть (аэродинамического воздействия на полоз измерительного токоприемника, инерционных сил и т. д.) и увеличению точности измерений. При проходе без нажатия скорость измерений может быть увеличена, так как датчик высотного положения провода позволяет получать данные высокой точности и при более высоких скоростях движения ВИКС (при наличии датчиков высотного положения крыши вагона).

Погрешность измерений при определении высоты подвеса контактного провода с помощью ВИКС составляет ±10 мм. Такой метод определения эластичности применим в качестве общей оценки эластичности по участку с высокой скоростью. При проведении сравнительных испытаний скоростных контактных подвесок необходимы более точные измерения, для которых были специально разработаны автоматизированные средства и методика измерений, основанная на измерении величины отжатий контактных проводов при их нагружении вертикально направленными силами с помощью специально разработанного устройства MECS (рисунок 7) [5]. Измерения отжатия проводов контактной подвески производятся с дрезины (или

лейтера) с заданным шагом в выбранных пролетах. При измерениях фиксируются вертикально приложенные силы и вертикальные перемещения контактных проводов, по которым определяется эластичность.

Устройство MECS позволяет дрезине беспрепятственно передвигаться от одной измерительной точки до другой вдоль участка контактной сети, так как оно полностью располагается ниже контактных проводов.

Порядок проведения измерений:

дрезина с измерительным устройством располагается под измерительной точкой;

вертикальный шток устройства со специальной насадкой для двух (или четырех) контактных проводов устанавливается под измерительной точкой;

с помощью цифровой видеокамеры, направленной на измерительную шкалу, фиксируется начальное положение проводов при минимальной нагрузке ($P = 0{,}01P_{ном}$);

производятся замеры отжатия контактных проводов при нагружении их силами $P_{ном}$ = 15 и 30 даН;

Рисунок 7 – Устройство MECS для измерения отжатия проводов контактных подвесок

аналогично производятся замеры значений отжатия контактных проводов при разгружении (для отстройки от сил сухого трения в шарнирах устройства);

полученные данные измерений автоматически записываются в блоке обработки и индикации перемещения контактных проводов.

Результаты измерения отжатия контактных проводов обрабатываются с помощью программы «ТехноСканер».

Такой способ регистрации отжатия контактных проводов позволяет увеличить скорость проведения измерений и повысить точность определения перемещения проводов с учетом длительно затухающих колебаний подвески при их нагружении (рисунки 8, 9).

Прибор оснащен системой глобального позиционирования GPS/ГЛОНАСС для автоматической привязки результатов измерения к местности.

По нескольким изменениям для каждой точки пролета определяется усредненное значение эластичности. По полученным данным строятся графики распределения эластичности в пролетах.

Погрешность измерений, возникающая при использовании предложенного метода, не превышает ±2 %.

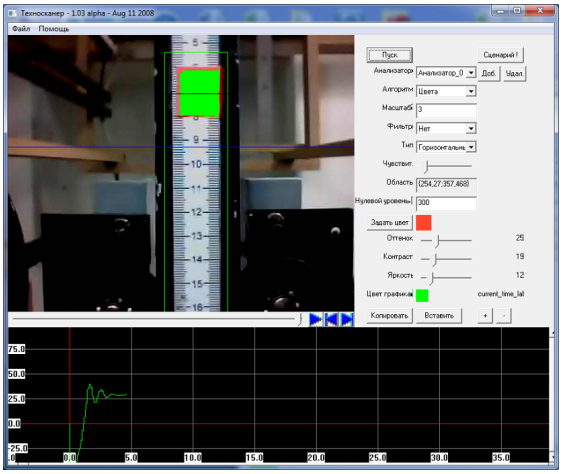


Рисунок 8 – Интерфейс программы для обработки результатов измерения отжатия контактных проводов

Сравнение данных расчета и эксперимента.

На рисунке 10 приведены результаты расчета эластичности, выполненного описанным методом для одного из пролетов контактной подвески на экспериментальном участке Лихославль – Калашниково в сравнении с экспериментальными данными, полученными с помощью устройства MECS. На рисунке 10 показан также результат расчета эластичности по ранее применявшейся методике на основе рекомендаций работы [1]. В конечно-элементном расчете учитывается межструновая эластичность. Данные эксперимента и расчета по методике, представленной в работе [1], имелись только под струнами, поэтому на графиках соответствующие точки соединены прямыми линиями. Далее приведены значения эластичности в характерных точках пролета η_{min}, η_{max}, η_{mid} – минимальная, максимальная и под струной в средине пролета.

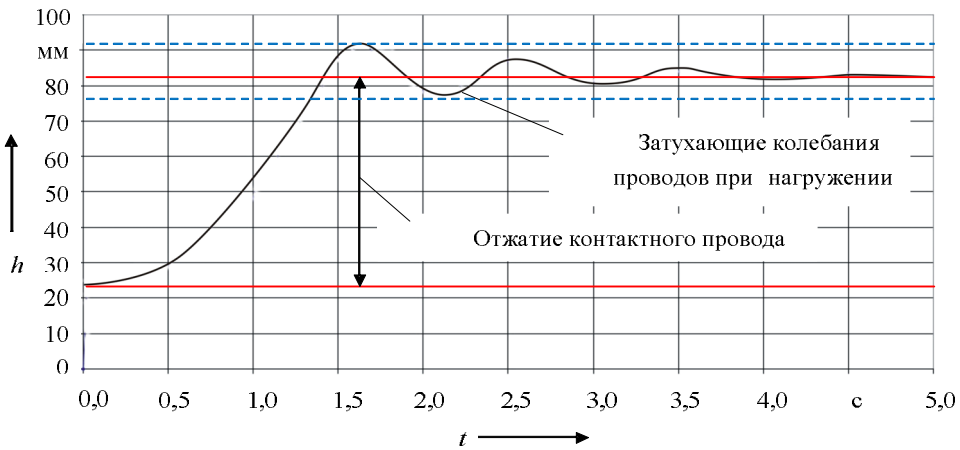


Рисунок 9 – Результаты измерения отжатия контактных проводов с учетом затухающих колебаний подвески

Дополнительно приведены значения коэффициента неравномерности эластичности $k_э$, относительной неравномерности U и неравномерности относительно максимального значения в середине пролета под струной U_{mid}. Значения этих параметров определяются по формулам:

$$k_э = \frac{\eta_{max}}{\eta_{min}}; \tag{8}$$

$$U = \frac{\eta_{max} - \eta_{min}}{\eta_{max} + \eta_{min}} \cdot 100\ \%; \tag{9}$$

$$U_{mid} = \frac{\eta_{mid} - \eta_{min}}{\eta_{mid} + \eta_{min}} \cdot 100\ \%. \tag{10}$$

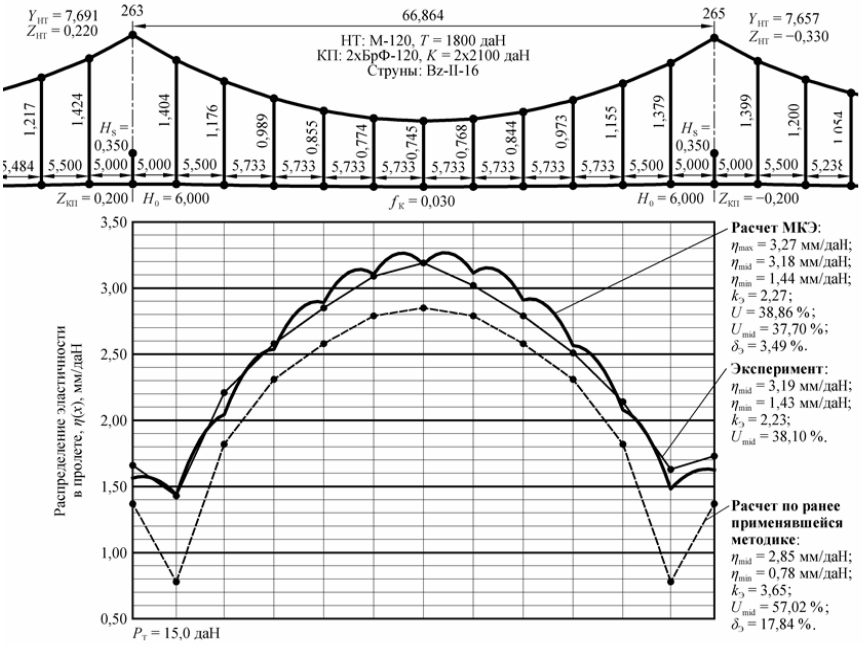


Рисунок 10 – Распределение эластичности в пролете контактной подвески (экспериментальный участок Лихославль – Калашниково, пролет 263 – 265, размеры приведены в метрах)

Для оценки расхождения данных расчета и эксперимента использован показатель

$$\delta_э = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \frac{\left|\eta_i^э - \eta_i^р\right|}{\eta_i^э} \cdot 100\%, \tag{11}$$

где N – число измерений; $\eta_i^э$ – эластичность при i-м измерении по данным эксперимента; $\eta_i^р$ – эластичность в той же точке, определенная по расчету.

Сравнение результатов расчета на основе описанной модели показывает хорошую сходимость с данными эксперимента. Так, для пролета, показанного на рисунке 10, усредненное расхождение эксперимента и результатов расчета на основе модели составило 3,5 %, а расхождение с расчетом по ранее применявшейся методике составляло почти 18 %.

Отметим, что расхождение результатов между расчетом на основе конечно-элементной модели и данными эксперимента в значительной степени может быть связано с погрешностями монтажа контактной подвески.

В заключение можно отметить, что применение метода конечных элементов позволило построить простую и доступную для повторения статическую модель контактной подвески, на основе которой реализован расчет эластичности.

Предлагаемый метод расчета эластичности в отличие от ранее применявшихся не содержит специальных эмпирических формул и коэффициентов, позволяет гибко задавать параметры контактной подвески и обеспечивает значительно лучшую точность. Метод может использоваться при совершенствовании систем токосъема для высоких скоростей движения.

Для оценки адекватности метода использованы экспериментальные данные, полученные в ходе испытаний контактной сети на участке Лихославль – Калашниково с применением усовершенствованных измерительных средств. Сравнение данных расчета и эксперимента показало достаточную степень сходимости.

Список литературы

1. Фрайфельд, А. В. Проектирование контактной сети [Текст] / А. В. Фрайфельд, Г. Н. Брод. – М.: Транспорт, 1991. – 335 с.

2. Ефимов, А. В. Разработка конечно-элементной модели статического взаимодействия токоприемников с контактной сетью [Текст] / А. В. Ефимов, А. Г. Галкин, Е. А. Полыгалова // Межвуз. сб. науч. тр. / Самарский ин-т инж. ж.-д. транс. – Самара, 2001. – С. 72 – 75.

3. Кудряшов, Е. В. Проектирование контактных подвесок на основе статических конечно-элементных моделей [Текст] / Е. В. Кудряшов // Актуальные проблемы проектирования и эксплуатации контактных подвесок и токоприемников электрического транспорта: Сб. науч. ст. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2011. – С. 196 – 206.

4. Постнов, В. А. Метод конечных элементов в расчетах судовых конструкций [Текст] / В. А. Постнов, И. Я. Хархурим. – Л.: Судостроение, 1974. – 344 с.

5. Пат. № 81922 на полезную модель (РФ), МПК В 60 М 1/00. Устройство для измерения жесткости контактных подвесок / В. М. Павлов, О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, И. Е. Чертков, С. В. Заренков (Россия). – № 2008145676/22; Заявлено 19.11.2008; Опубл. 10.04.2009. Бюл. № 10. с.– 7

УДК 629.47:658.2

С. М. Овчаренко, П. С. Корнеев

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК С УЧЕТОМ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ТЕПЛОВОЗА

Приводится методика формирования расходных характеристик дизель-генераторной установки тепловоза по результатам реостатных испытаний или контрольной поездки. Модель позволяет скорректировать паспортные расходные характеристики с учетом снижения экономичности работы дизеля, которые необходимы для решения задач оценки расхода топлива и контроля технического состояния.

При эксплуатации тепловоза происходит ухудшение его технического состояния. Процессам износа, разрегулировки подвержены детали и системы дизеля. Результатом такого ухудшения технического состояния является не только снижение надежности работы, но и увеличение расхода топлива. Влияние множества случайных факторов приводит к тому, что расходные характеристики дизелей изменяются на разную величину [1]. Такие отклонения могут

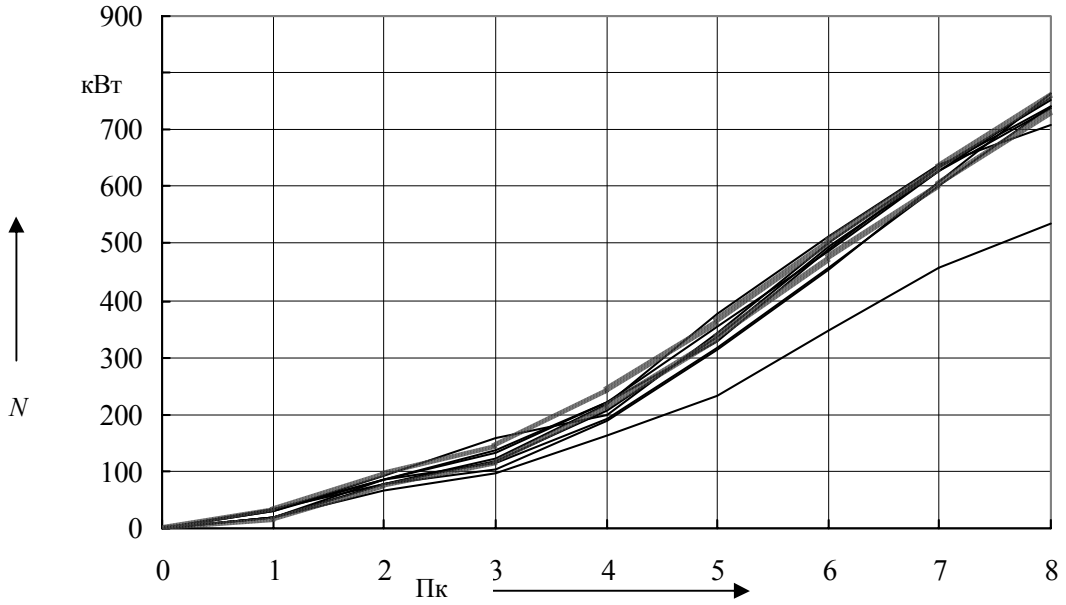
достигать 10 – 15 %. Изменение параметров дизель-генераторных установок (ДГУ) должны учитываться при решении задачи оценки расхода топлива за поездку.

Значительное влияние на расход топлива ДГУ тепловоза оказывает качество настройки внешней характеристики тепловоза. При проведении послеремонтных реостатных испытаний мощность ДГУ тепловоза должна находиться в пределах паспортного поля допуска (таблица 1).

Таблица 1 – Параметры настройки ДГУ тепловоза серии ТЭМ2

Позиция контроллера машиниста	Частота вращения коленчатого вала дизеля, мин$^{-1}$	Мощность ДГУ, кВт
0	300	0
1	300	25±10
2	300	85±10
3	330	130±15
4	400	230±15
5	480	350±15
6	570	490±15
7	650	620±15
8	750	750±15

Исследования, проведенные по ряду локомотивных депо, показали, что наблюдаются отклонения мощности ДГУ от паспортных значений. На рисунке 1 в качестве примера приведены внешние характеристики тепловозов серии ТЭМ2, прошедших реостатные испытания. Для учета текущего технического состояния ДГУ тепловозов разработана математическая модель, позволяющая корректировать расходные характеристики.



Результаты настройки внешней характеристики тепловозов серии ТЭМ2: верхняя и нижняя границы мощности

На маневровом тепловозе серии ТЭМ2 установлен дизель типа ПД1М с генератором постоянного тока ГП 300А (ГП300Б). В таблице 2 указаны паспортные расходные характеристики ДГУ тепловоза серии ТЭМ2, приведенные к стандартным условиям.

Для корректировки расходных характеристик ДГУ тепловоза при проведении реостатных испытаний или контрольной поездки фиксируются следующие параметры работы тепловоза: время работы ДГУ по позициям в режиме холостого хода ($t_i^{(XX)}$); время работы ДГУ по позициям в режиме нагрузки ($t_i^{(H)}$); реализуемая мощность ДГУ по позициям (N_i); температура

(T) и давление (P) наружного воздуха; время работы воздушного компрессора по позициям контроллера машиниста в режиме нагрузки ($t_{i\text{ТК}}^{(\text{Н})}$) и холостого хода ($t_{i\text{ТК}}^{(\text{ХХ})}$), время ($t_{\text{ВХ}}$) и частота вращения ($n_{\text{ВХ}}$) вентилятора холодильника; количество переключений позиций контроллера машиниста ($K_{\text{ПК}}$); фактический расход топлива ($B_{\text{ф}}$).

Таблица 2 – Паспортные расходные характеристики ДГУ тепловоза серии ТЭМ2

Позиция контроллера машиниста	Расход топлива	
	в режиме холостого хода, кг/ч	в режиме нагрузки, кг/кВт ч
0	8	–
1	8	0,314
2	8	0,272
3	9	0,241
4	11	0,230
5	15	0,223
6	22	0,223
7	24	0,226
8	32	0,242

Фактический расход топлива фиксируется при условиях, отличных от стандартных, поэтому он должен быть приведен к расходу топлива при стандартных условиях [2], кг:

$$\overline{B}_{\text{ф}} = B_{\text{ф}}\beta\,; \tag{1}$$

где β – коэффициент приведения.

Коэффициент приведения расхода топлива к стандартным условиям

$$\beta = \frac{K}{\alpha}; \tag{2}$$

$$\alpha = K - 0,7\left(1-K\right)\left(\frac{1}{\eta_{\text{М}}} - 1\right); \tag{3}$$

$$K = \left(\frac{P - a\varphi P_s}{\overline{P} - a\overline{\varphi}\overline{P}_s}\right)^m \left(\frac{\overline{T}}{T}\right)^n \left(\frac{T_c}{T_{cx}}\right)^g, \tag{4}$$

где a, m, n, g – постоянные коэффициенты; $a = 1$; $m = 0,57$; $n = 0,55$; $g = 1,75$;

$\eta_{\text{М}}$ – механический КПД;

$\overline{P}$, P – полное атмосферное давление при стандартных условиях и текущее, кПа;

$\overline{P}_s$, P_s – давление насыщения водяного пара при стандартных условиях и при испытаниях, кПа;

$\overline{\varphi}$, φ – относительная влажность воздуха при стандартных условиях и при испытаниях, %;

$\overline{T}$, T – абсолютная температура окружающего воздуха при стандартных условиях и при испытаниях, ^{o}К;

$T_{\text{с}}$ – стандартная исходная абсолютная температура охлаждающей среды на входе в охладитель наддувочного воздуха, ^{o}К;

$T_{\text{сх}}$ – температура окружающей среды на входе в охладитель наддувочного воздуха при испытаниях, ^{o}К.

На увеличение расхода топлива оказывает влияние количество переходных процессов. При переключении позиций контроллера машиниста регулятор частоты вращения коленчатого вала дизеля за счет перемещения реек топливных насосов высокого давления устанавливает требуемую частоту. Длительность этого процесса составляет порядка 4 – 5 с и сопровождается

повышенным расходом топлива. Этот фактор учитывается в модели, установленной по экспериментальным данным, зависимостью, кг:

$$\overline{B}_{\text{фk}} = \frac{\overline{B}_{\text{ф}}}{K_b}; \tag{5}$$

$$K_b = 1 + 0,027\frac{K_{\text{ПК}}}{60t_s}, \tag{6}$$

где $K_{\text{ПК}}$ – количество переключений позиций контроллера машиниста за время работы ДГУ, (t_s, ч).

Расход топлива на привод воздушного компрессора, кг,

в режиме холостого хода –

$$B_{\text{КТ}}^{(\text{XX})} = \sum_{i=0}^{8} b_{i\text{КТ}}^{(\text{XX})} t_{i\text{КТ}}^{(\text{XX})}, \tag{7}$$

в режиме нагрузки –

$$B_{\text{КТ}}^{(\text{Н})} = \sum_{i=1}^{8} b_{i\text{КТ}}^{(\text{Н})} t_{i\text{КТ}}^{(\text{Н})}, \tag{8}$$

где i – позиция контроллера машиниста.

Расход топлива на привод вентилятора холодильника, кг,

$$B_{\text{В}} = b_{\text{В}} t_{\text{В}}, \tag{9}$$

где $t_{\text{В}}$ – время работы вентилятора, ч;

$b_{\text{В}}$ – часовой расход топлива в зависимости от частоты вращения вентилятора, кг/ч.

Для тепловоза серии ТЭМ2 с механическим приводом вентилятора холодильника получена зависимость:

$$b_{\text{В}} = 0,008358\overline{n}_{\text{В}}, \tag{10}$$

где $\overline{n}_{\text{В}}$ – средневзвешенная частота вращения вентилятора за время работы, мин$^{-1}$.

Фактический расход топлива ДГУ тепловоза с учетом долей расхода на привод воздушного компрессора, вентилятора холодильника и переходных процессов, кг,

$$\overline{B}'_{\text{ФК}} = \overline{B}_{\text{ФК}} - B_{\text{КТ}}^{(\text{XX})} - B_{\text{КТ}}^{(\text{Н})} - B_{\text{В}}. \tag{11}$$

По режимам работы ДГУ тепловоза рассчитываются доли расхода топлива на холостом ходу и под нагрузкой для тепловоза с паспортными расходными характеристиками:

$$\overline{B}^{(\text{XX})} = \sum_{i=0}^{8} \overline{b}_i^{(\text{XX})} t_i^{(\text{XX})}; \tag{12}$$

$$\overline{B}^{(\text{Н})} = \sum_{i=0}^{8} \overline{b}_i^{(\text{Н})} t_i^{(\text{Н})} \overline{N}_i, \tag{13}$$

где $\overline{b}_i^{(\text{XX})}$ и $\overline{b}_i^{(\text{Н})}$ – паспортный расход топлива по позициям ДГУ тепловоза в режиме холостого хода, кг/ч, и в режиме нагрузки, кг/кВт·ч;

$\overline{N}_i$ – паспортная мощность по позициям ДГУ тепловоза, кВт.

Доля топлива, израсходованная в режиме холостого хода, по паспортным характеристикам,

$$\delta_{\text{XX}} = \frac{\overline{B}^{(\text{XX})}}{\overline{B}^{(\text{XX})} + \overline{B}^{(\text{Н})}}. \tag{14}$$

Доля топлива, израсходованная в режиме нагрузки, по паспортным характеристикам,

$$\delta_{\text{Н}} = \frac{\overline{B}^{(\text{Н})}}{\overline{B}^{(\text{XX})} + \overline{B}^{(\text{Н})}}. \tag{15}$$

Принимаем допущение о том, что соотношение расхода топлива ДГУ в режиме холостого хода и под нагрузкой при испытаниях сохраняется, тогда

количество топлива, израсходованное ДГУ испытываемого тепловоза в режиме холостого хода, кг, –

$$B_{\text{ф}}^{(\text{XX})} = \overline{B}'_{\text{фк}} \delta_{\text{хх}}; \tag{16}$$

количество топлива, израсходованное ДГУ испытываемого тепловоза в режиме нагрузки, кг, –

$$B_{\text{ф}}^{(\text{Н})} = \overline{B}'_{\text{фк}} \delta_{\text{Н}}. \tag{17}$$

Коэффициент корректировки расходной характеристики в режиме холостого хода

$$X_{\text{XX}} = \frac{\left(\overline{B}'_{\text{ф}} - B_{\text{ф}}^{(\text{XX})} - B_{\text{ф}}^{(\text{Н})}\right)\delta_{\text{XX}}}{\sum_{i=0}^{8} t_i^{(\text{XX})}}. \tag{18}$$

Коэффициент корректировки расходной характеристики в режиме нагрузки

$$X_{\text{Н}} = \frac{\left(\overline{B}'_{\text{ф}} - B_{\text{ф}}^{(\text{XX})} - B_{\text{ф}}^{(\text{Н})}\right)\delta_{\text{Н}}}{\sum_{i=1}^{8} t_i^{(\text{Н})} N_i}, \tag{19}$$

где N_i – значения мощности по позициям испытываемого тепловоза, кВт.

Расходная характеристика испытываемого тепловоза в режиме холостого хода, кг/ч,

$$b_i^{(\text{XX})} = \overline{b}_i^{(\text{XX})} X_{\text{XX}}. \tag{20}$$

Расходная характеристика испытываемого тепловоза в режиме нагрузки, кг/кВт ч,

$$b_i^{(\text{Н})} = \overline{b}_i^{(\text{Н})} X_{\text{Н}}. \tag{21}$$

В заключение следует отметить, что предложенная методика позволяет формировать расходные характеристики ДГУ, учитывающие текущее техническое состояние тепловоза, без проведения специальных испытаний на расход топлива. Технология корректировки паспортных расходных характеристик с использованием разработанной методики может быть реализована как при проведении реостатных испытаний тепловоза, так и по результатам опытной поездки в условиях реальной эксплуатации.

Список литературы

1. Хомич, А. З. Экономия топлива и теплотехническая модернизация локомотивов [Текст] / А. З. Хомич, О. И. Тупицын, А. Э. Симсон. – М.: Транспорт, 1975. – 264 с.

2. ГОСТ Р 52517-2005. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Характеристики. Стандартные исходные условия, объявление мощности, расход топлива и смазочного масла. Методы испытаний [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 2005. – 6 с.

УДК 621.436

Е. И. Сковородников, А. С. Анисимов, Ю. Б. Гришина

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОПЛИВНЫХ СМЕСЕЙ РАЗЛИЧНОГО ЭЛЕМЕНТАРНОГО СОСТАВА

В статье изложена методика оценки термодинамических характеристик комбинированного топлива для двигателей внутреннего сгорания, состоящего из стандартного дизельного топлива и различного количества альтернативных добавок, предложена методика расчета средней мольной теплоемкости, теплоты сгорания и теоретически необходимого количества воздуха для сгорания единицы топлива в зависимости от процентного содержания альтернативной добавки

В настоящее время в связи с проблемой экономии энергоресурсов и, в частности, топлива, получаемого из нефти, ведутся исследования в области поиска новых видов альтернативного топлива и возможности их использования для всех типов силовых энергетических установок.

Дизельные двигатели в настоящее время являются наиболее эффективными силовыми установками для получения механической энергии из углеводородного топлива. Однако поскольку разведанные ресурсы нефти ограничены, и, следовательно, ограничены возможности расширения ресурсов дизельного топлива за счет переработки нефтяного сырья, совершенно очевиден повышенный интерес к использованию в дизельных двигателях новых видов рабочего тела, представляющего собой смесь воздуха, дизельного топлива и различных присадок, способствующих совершенствованию процесса сгорания, повышению топливной экономичности и снижению количества вредных выбросов и парниковых газов в отработавших газах.

Особое внимание в настоящее время уделяется использованию природного газа, различным видам биотоплива, применению воды в топливной смеси и отработавших газов, несмотря на то, что они могут покрыть лишь малую часть общего спроса на топливо. Предполагается, что их использование может способствовать улучшению состояния окружающей среды, особенно если принять во внимание новые технологии производства. В современной технической литературе [1] возможность и эффективность применения различных альтернативных топливных смесей доказывается по результатам каких-либо единичных экспериментов, на каких-либо типах двигателей и на каких-либо режимах работы энергетической установки.

Известно, что величина теплоты сгорания углеводородной топливной смеси в цилиндре дизеля будет определяться по элементарному химическому составу с использованием формулы Д. И. Менделеева. Как показывает практика, использование различных видов альтернативного топлива или топливных добавок в дизельных двигателях практически невозможно без запальной дозы дизельного топлива; причем величина этой запальной дозы будет различна при использовании различного вида добавок.

В настоящей статье приведены теоретические исследования по оценке физико-химических свойств и эффективности использования различных видов углеводородного топлива, в котором основной составляющей топливной смеси является стандартное дизельное топливо. Предполагается, что часть альтернативного топлива или какой-либо другой добавки подается в газообразном виде непосредственно в воздушный коллектор. Такая система питания дизелей практически реализуется без существенного изменения типовой системы топливоподачи.

В общем случае для двух- и четырехтактных двигателей величина цикловой подачи топлива в дизель определяется по величине эффективной мощности, частоте вращения коленчатого вала дизеля и удельному расходу топлива для расчетного режима работы, кг/цикл:

$$b_{\text{ц}}^{(\text{д})} = b_e N_e \tau / (2 \cdot 60 n z), \quad (1)$$

где b_e – удельный расход топлива дизелем, кг/(кВт·ч); N_e – эффективная мощность дизеля, кВт; τ – тактность двигателя; n – частота вращения коленчатого вала дизеля, мин $^{-1}$; z – число цилиндров дизеля.

При замещении K процентов дизельного топлива какой-либо альтернативной добавкой расход дизельного топлива может быть снижен примерно на такую же величину. В этом случае количество тепла, полученное при сгорании топливной смеси, кДж/цикл,

$$Q_{\text{ц}}^{(\text{тс})} = H_u^{(\text{д})}\left(b_{\text{ц}}^{(\text{д})} - \frac{K}{100} b_{\text{ц}}^{(\text{д})}\right) + \frac{K}{100} H_u^{(\text{пр})} b_{\text{ц}}^{(\text{д})}, \qquad (2)$$

где $H_u^{(\text{д})}$, $H_u^{(\text{пр})}$ – соответственно теплота сгорания дизельного топлива и альтернативной добавки, кДж/кг.

При выполнении теоретических модельных расчетов предполагается, что в качестве добавки к топливу могут быть использованы биотопливо состава CH_4 = 87 %, CO_2 = 13 % ; биотопливо состава CH_4 = 50 % и CO_2 = 50 %; водяные пары H_2O; отработавшие газы дизеля (N_2 = =74,25 %, H_2O = 3,94 %; CO_2 = 9,94 %; O_2 = 11,83 %); природный газ CH_4 = 100 %.

Молярная масса и газовая постоянная альтернативных добавок к дизельному топливу представлены в таблице 1. Для рабочего тела молярная масса и газовая постоянная рабочего тела определяются как для смеси однородных газов, состоящих из паров топлива, воздуха и альтернативной добавки.

Таблица 1 – Термодинамические параметры присадок к дизельному топливу

Наименование составляющей горючей смеси	Молярная масса $\mu_{\text{см}}$, кг/кмоль	Газовая постоянная R, Дж/(кг·К)
Биотопливо состава CH_4 = 87 %, CO_2 = 13 %	19,680	422,5
Биотопливо состава CH_4 = 87 %, CO_2 = 13 %	30,027	276,9
Водяные пары H_2O	18,006	461,5
Отработавшие газы состава: N_2 = 74,254 %, H_2O = 3,938 %; CO_2 = 9,936 %; O_2 = 11,829 %	29,667	280,2
Природный газ CH_4 = 100 %	16,043	518,2

Как уже отмечалось, применение альтернативного топлива в дизельных двигателях невозможно без запальной дозы стандартного дизельного топлива, минимальная величина которой должна быть достаточной для тепловой диссоциации составляющих топливной смеси до горючих элементов, способных окисляться кислородом воздуха.

Для контроля динамики термодинамических параметров рабочего цикла предполагаем, что альтернативное топливо в заранее отмеренном количестве, или объеме, подается в воздушный ресивер в газообразном состоянии. В этом случае возможно два варианта использования добавок к дизельному топливу:

при сохранении цикловой подачи дизельного топлива добавка в цилиндр дизеля определенной доли альтернативного топлива для повышения индикаторного коэффициента полезного действия дизеля и улучшения экологических характеристик;

снижение величины цикловой подачи дизельного топлива и добавление некоторой доли альтернативного топлива с целью сохранения величины эффективной мощности дизеля, повышения экономичности и снижения экологического воздействия на окружающую среду.

Затраты тепловой энергии, полученной при сгорании дизельного топлива, на тепловую диссоциацию присадок с учетом предположения о том что в результате диссоциации будут получены молекулы или атомы отдельных химических элементов, могут быть рассчитаны по следующей методике [2]. Для биотоплива, состав которого предполагает смесь метана и диоксида углерода (CH_4 = = 87 %, CO_2 = 13 %), образование отдельных химических элементов проходит по следующей схеме: диссоциация молекулы метана на молекулу углерода С и четыре молекулы водорода Н с затратой энергии 1641798 кДж/кмоль; диссоциация диоксида углерода на атомарный углерод С и молекулярный кислород O_2 с затратой энергии 1597521

кДж/кмоль; диссоциация молекулярного кислорода на два атома кислорода с затратой энергии 493953 кДж/кмоль; общая затрата тепловой энергии на диссоциацию молекулы CO_2 на атомы углерода и кислорода составит 2091474 кДж/кмоль. Таким образом, общая энергия диссоциации молекулы биотоплива составит 3733272 кДж/кмоль. По результатам диссоциации элементарный состав горючей смеси будет иметь вид: C = 0,68722, H = 0,21837, O = 0,09441. Дополнительная энергия $H_u^{(БТ)}$, которая может быть получена при сгорании этой смеси, определится по формуле Менделеева и составит 44769 кДж/кг, теоретически необходимое количество воздуха для сгорания $L_o^{(БТ)}$ составит 0,5187 кмоль/кг.

Для природного газа, в состав которого входит в основном метан (плотность $\rho_{CH4} = 0,7168$ кг/м^3, газовая постоянная $R_{CH4} = 518,23$ Дж/(кг·К)) энергия тепловой диссоциации составит 1641798 кДж/кмоль. Предполагается, что под действием тепловой энергии из молекулы метана (CH_4) могут быть получены четыре атома водорода (H) и одноатомный углерод (C), тогда элементарный состав горючей смеси будет иметь вид: C = 0,749, H = 0,251. Согласно формуле Менделеева тепло H_u, которое может быть получено при сгорании природного газа, составит 51252,58 кДж/кг. Теоретически необходимое количество воздуха для сгорания природного газа $L_o^{(пр.г)} = 0,596$ кмоль/кг.

Для водяных паров (молярная масса $\mu_{H_2O} = 18,016$ кг/кмоль, газовая постоянная $R_{H_2O} = 462$ Дж/(кг·К)) суммарная энергия диссоциации, затраченная на последовательное образование одноатомного кислорода и водорода, составит 1350831 кДж/кмоль. Элементарный состав горючей смеси: H = 0,11, O = 0,89, удельная теплота сгорания которой H_u составит $= 1641,8$ кДж/кг, теоретически необходимое количество воздуха для сгорания единицы горючей смеси $L_o = 0$ кмоль/кг.

Для отработавших газов в случае рекуперации использованы следующие характеристики: $\mu_{о.г} = 29,667$ кг/кмоль, $R_{о.г} = 280,24$ Дж/(кг·К). Процентный состав отработавших газов, рассчитанный по методу равновесного состава [3], для дизелей маневровых и магистральных тепловозов представлен в таблице 1.

Как и для стандартного углеводородного топлива, теплота сгорания и теоретически необходимое количество воздуха для сгорания единицы топливной смеси определятся по выражениям:

$$H_u = 33913C + 102995H - 10885(O - S); \quad (3)$$

$$L_o = 0,397C + 1,19H + 0,149S - 0,149O. \quad (4)$$

С использованием приведенной выше методики рассчитаны элементарный химический состав и термодинамические свойства топливных смесей, состоящих из дизельного топлива среднего элементарного состава (C = 0,845; H = 0,136; O = 0,012; S = 0,006) и различных альтернативных добавок. Законы изменения элементарного состава топлива, теплоты сгорания и теоретически необходимого количества воздуха для сгорания единицы топлива для произвольного количества альтернативной добавки приведены в таблице 2. Изменение элементарного химического состава и термодинамических параметров топливных смесей при различной величине добавки представлено в таблице 3, на основании которой можно заключить:

практически для всех видов топливной смеси увеличение количества альтернативной добавки приведет к существенному расходу тепла на тепловую диссоциацию, а следовательно, к существенному снижению теплоты сгорания топливной смеси;

теоретически необходимое количество воздуха для сгорания единицы топлива уменьшается, что при сохранении цикловой подачи дизельного топлива приведет к уменьшению коэффициента избытка воздуха для сгорания, к снижению полноты сгорания топлива, к увеличению дымления дизеля, к ухудшению его экологических характеристик, к увеличению количества вредных выбросов в отработавших газах.

Таблица 2 – Термические характеристики топливных смесей

Вид топливной смеси	Элементарный состав рабочего тела, в долях	Теплота сгорания (*Hu*, кДж/кг) и количество воздуха для сгорания топлива (*Lo*, кг/кмоль)
Дизельное топливо + природный газ	C = 0,845 – 9,4·10^{-4}d H = 0,1362 – 11,4·10^{-4}d O = 0,0108 + 10^{-2}d S = 1– C – H – O	$H_u = -1,86d^2 - 1961d + 42332$ $L_o = -9 \cdot 10^{-6} d^2 + 1,2 \cdot 10^{-3} d + 0,496$
Дизельное топливо + биотопливо (87 % CH_4; 13 % CO_2)	C = 0,8452 – 44,6·10^{-4}d H = 0,1364 – 6,8·10^{-4}d O = 0,012 + 0,52·10^{-2}d S = 1– C – H – O	$H_u = -10,28d^2 - 1223,6d + 42197$ $L_o = -1,4 \cdot 10^{-5} d^2 - 3,1 \cdot 10^{-3} d + 0,496$
Дизельное топливо + биотопливо (50 % CH_4; 50 % CO_2)	C = 0,8452 – 44,6·10^{-4}d H = 0,1364 – 6,8·10^{-4}d O = 0,021 + 0,52·10^{-2}d S = 1– C – H – O	$H_u = -2,12d^2 - 1142,4d + 42319$ $L_o = -1,4 \cdot 10^{-5} d^2 - 3,1 \cdot 10^{-3} d + 0,496$
Дизельное топливо + пары воды	C = 0,8452 – 44,6·10^{-4}d H = 0,1364 – 6,8·10^{-4}d O = 0,021 + 0,52·10^{-2}d S = 1– C – H – O	$H_u = -5,403d^2 - 1087,1d + 42418$ $L_o = 1,4 \cdot 10^{-4} d^2 - 6,4 \cdot 10^{-3} d + 0,496$
Дизельное топливо + отработавшие газы	C = 0,8452 – 44,6·10^{-4}d H = 0,1364 – 6,8·10^{-4}d O = 0,012 + 0,52·10^{-2}d S = 1– C – H – O	$H_u = -7,04d^2 - 590,69d + 42035$ $L_o = -1,5 \cdot 10^{-5} d^2 - 3,054 \cdot 10^{-3} d + 0,496$

Таблица 3 – Энергия диссоциации, теплота сгорания, теоретически необходимое количество воздуха для сгорания единицы топливной смеси

Вид топливной смеси	Характеристика топливной смеси						
	элементарный состав смеси, в долях				$H^{(D)}$, кДж/кг	H_u, кДж/кг	L_o, кг/кмоль
	C	H	O	S			
Дизельное топливо + водяные пары							
ДТ+1% H_2O	0,837	0.136	0.021	0.006	745,8	41443	0,492
ДТ+3% H_2O	0,820	0,135	0,038	0,006	2237,4	39132	0,481
ДТ+5% H_2O	0,803	0,135	0,056	0,006	3728,6	36822	0,472
ДТ+7% H_2O	0,786	0,134	0,073	0,006	5220,0	34512	0,462
ДТ+9% H_2O	0,769	0,134	0,091	0,005	6711,0	32201	0,452
Дизельное топливо + отработавшие газы							
ДТ+5% ОГ	0,823	0,133	0,038	0,006	1726	38643	0,480
ДТ+10% ОГ	0,801	0,130	0,064	0,005	3512	34692	0,464
ДТ+15% ОГ	0,778	0,127	0,090	0,005	5178	32829	0,447
ДТ+20% ОГ	0,756	0,122	0,116	0,005	6904	26906	0,429
Дизельное топливо + биотопливо ($CH_4 = 50\%$, $CO_2 = 50\%$)							
ДТ+5% БГ	0,823	0,133	0,038	0,006	4596	36637	0,480
ДТ+10% БГ	0,801	0,130	0,064	0,005	9191	30614	0,464
ДТ+15% БГ	0,778	0,127	0,090	0,005	13787	24714	0,447
ДТ+20% БГ	0,756	0,122	0,116	0,005	18383	18629	0,429
Дизельное топливо + биотопливо ($CH_4 = 87\%$, $CO_2 = 13\%$)							
ДТ+5% БГ	0,823	0,133	0,038	0,006	5818	35415	0,480
ДТ+10% БГ	0,801	0,130	0,064	0,005	11635	29598	0,464
ДТ+15% БГ	0,778	0,127	0,090	0,005	17452	21049	0,447
ДТ+20% БГ	0,756	0,122	0,116	0,005	23270	13742	0,429
Дизельное топливо + природный газ							
ДТ+5% ПГ	0,840	0,142	0,011	0,006	10479	32580	0,502
ДТ+10% ПГ	0,836	0,148	0,011	0,006	20957	22500	0,507
ДТ+15% ПГ	0,831	0,153	0,010	0,005	31436	12450	0,511
ДТ+20% ПГ	0,826	0,159	0,010	0,005	41914	2401	0,516

В таблице 2 d – процент альтернативной добавки к дизельному топливу, в таблице 3 $H^{(D)}$ – энергия диссоциации; H_u – теплота сгорания, L_o – теоретически необходимое количество воздуха для сгорания единицы топливной смеси.

Теплоемкость рабочего тела на линиях сжатия, сгорания-расширения из предположения, что альтернативное топливо подается в процессе наполнения, будет зависеть как от текущей температуры рабочего тела, так и от элементарного состава рабочей смеси. В общем случае средняя мольная теплоемкость, а следовательно, и средняя изобарная теплоемкость рабочего тела есть функция двух переменных, а именно доли альтернативного топлива в составе смеси и соответствующей температуры. Построение этих двухфакторных зависимостей выполнено в следующей последовательности.

С использованием табулированных значений средней мольной теплоемкости составляющих рабочего тела [4] и метода наименьших квадратов построены аналитические зависимости вида $Y = bT + c$, значения коэффициентов регрессии b и c которых приведены в таблице 4. Средняя мольная теплоемкость смеси $c_\upsilon^{(\text{см})}$ рассчитывается по выражению:

$$c_\upsilon^{(\text{см})} = (1-d)c_\upsilon^{(\text{в})} + \mathrm{d}c_\upsilon^{(d)}, \tag{5}$$

где d – доля альтернативного топлива в рабочей смеси;

$c_\upsilon^{(\text{в})}$, $\mathrm{c}_\upsilon^{(d)}$ – соответственно средняя мольная теплоемкость воздуха и альтернативной добавки.

Таблица 4 – Коэффициенты регрессии аппроксимирующих выражений вида $Y = bT + c$

Термодинамическая функция газа	Значения коэффициентов регрессии для рабочего тела	
	b	c
Чистый воздух (N_2 , O_2)		
Удельная массовая теплоемкость c_v, кДж/(кг·К)	0,000269	0,634
Удельная мольная теплоемкость c_v, кДж/(кмоль·К)	0,0078	18,36
Удельная энтропия s, кДж/(кг·К)	0,002269	6,121
Удельная энтальпия i кДж/кг	0,986744	– 6,964
Чистые продукты сгорания (CO_2, H_2O, O_2, N_2)		
Удельная массовая теплоемкость c_v, кДж/(кг·К)	0,000396	0,653
Удельная мольная теплоемкость c_v, кДж/(кмоль·К)	0,0115	18,96
Удельная энтропия s, кДж/(кг·К)	0,002429	6,083
Удельная энтальпия i, кДж/кг	0,624044	216,509
Водяные пары (H_2O)		
Удельная массовая теплоемкость c_v, кДж/(кг·К)	0,000782	1,147
Удельная мольная теплоемкость c_v, кДж/(кмоль·К)	0,0141	20,66
Удельная энтропия s, кДж/(кг·К)	0,004227	– 0,895
Удельная энтальпия i, кДж/кг	1,684320	– 687,739
Диоксид углерода (CO_2)		
Удельная массовая теплоемкость c_v, кДж/(кг·К)	0,000738	0,481
Удельная мольная теплоемкость c_v, кДж/(кмоль·К)	0,0325	21,169
Удельная энтропия s, кДж/(кг·К)	0,002229	– 0,498
Удельная энтальпия i, кДж/кг	0,968925	– 293,471
Кислород (O_2)		
Удельная массовая теплоемкость c_v, кДж/(кг·К)	0,000307	0,581
Удельная мольная теплоемкость c_v, кДж/(кмоль·К)	0,0098	18,592
Удельная энтропия s, кДж/(кг·К)	0,002131	– 0,451
Удельная энтальпия i, кДж/кг	0,942090	– 270,280
Метан (CH_4)		
Удельная массовая теплоемкость c_v, кДж/(кг·К)	0,004548	0,439
Удельная мольная теплоемкость c_v, кДж/(кмоль·К)	0,073	7,043
Удельная энтропия s, кДж/(кг·К)	0,007176	– 1,822
Удельная энтальпия i, кДж/кг	1,605060	– 562,559

Построение двухфакторных зависимостей, характеризующих изменение средней мольной теплоемкости от элементарного состава и от температуры рабочей смеси, выполнено с использованием основных положений теории планирования эксперимента. Функция отклика для всех видов альтернативного топлива записана в виде:

$$c_{\upsilon}^{(\text{см})} = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_1 X_2 , \qquad (6)$$

где X_1, X_2 – соответственно доля альтернативного топлива и температура рабочего тела, представленные в кодированных переменных;

a_0, a_1, a_2, a_3 – коэффициенты регрессии.

Для обеспечения однозначности расчетов примем, что доля альтернативной добавки к дизельному топливу (фактор X_1) изменяется от 0 до 0,5, а изменение температуры, фактор X_2, – от 300 до 1000 К. При построении линейной модели применим симметричный двухуровневый план эксперимента, который предусматривает проведение опытов на двух уровнях (верхнем и нижнем), симметричных относительно уровня $X_1^{(0)} = 0,25$, $X_2^{(0)} = 650$, выбранных в качестве исходных.

Тогда для выбранного размаха выборки $\Delta X_1^{(0)} = 0,5$, $\Delta X_2^{(0)} = 700$, для рассчитанных интервалов их изменения $\Delta X_1 = 0,25$, $\Delta X_2 = 350$ матрицы планирования эксперимента представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Матрицы планирования эксперимента для оценки средней мольной теплоемкости рабочей смеси

Кодированное значение фактора		Значение функции отклика
доля альтернативной добавки d	температура рабочего тела T, K	средняя мольная теплоемкость смеси $c_{\upsilon}^{(\text{см})}$, кДж/(кмоль·К)
Воздух + природный газ (CH_4)		
–1	–1	0,7147
+1	–1	1,2591
–1	+1	0,9030
+1	+1	2,9450
1	2	3
Воздух + чистые продукты сгорания(CO_2, H_2O, O_2, N_2)		
–1	–1	0,7147
+1	–1	0,7433
–1	+1	0,9030
+1	+1	0,9760
Воздух + водяные пары (H_2O)		
–1	–1	0,7147
–1	+1	1,0482
+1	+1	1,4160
+1	–1	0,9030
Воздух + биотопливо состава $0,87 \cdot CH_4 + 0,13 \cdot CO_2$		
–1	–1	0,7147
–1	+1	1,1875
+1	+1	0,9030
+1	–1	2,7002
Воздух + биотопливо состава $0,50 \cdot CH_4 + 0,50 \cdot CO_2$		
–1	–1	0,7147
–1	+1	0,9838
+1	+1	0,9030
+1	–1	2,0030

Кодированные значения факторов при двухуровневом планировании (см. таблицу 5) рассчитаны по выражениям:

$$\begin{cases} x_1^{(н)} = (X_1^{\min} - X_1^{sr})/\Delta X_1; \\ x_1^{(в)} = \left(X_1^{\max} - X_1^{sr}\right)/\Delta X_1, \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} x_2^{(н)} = (X_2^{\min} - X_2^{sr})/\Delta X_2; \\ x_2^{(в)} = \left(X_2^{\max} - X_2^{sr}\right)/\Delta X_2. \end{cases} \quad (8)$$

По результатам планирования эксперимента получены уравнения регрессии, связывающие величину средней мольной теплоемкости рабочей смеси с долей альтернативной добавки и температурой смеси. Значимость коэффициентов регрессии проверена по критерию Стьюдента, а адекватность принятой формы модели – по критерию Фишера.

Таким образом, по результатам планирования эксперимента для рабочей смеси, состоящей из воздуха и природного газа, удельная теплоемкость определяется как в кодированных, так и в физических переменных по выражениям, кДж/(кг·К):

$$c_\upsilon = 1,46 + 0,65X_1 + 0,47X_2 + 0,37X_1X_2; \quad (9)$$

$$c_\upsilon = 0,6243 - 0,14836d + 0,00029T + 0,004292Td. \quad (10)$$

Для смеси воздуха и чистых продуктов сгорания, кДж/(кг·К),

$$c_\upsilon = 0,83 + 0,03X_1 + 0,11X_2 + 0,01X_1X_2; \quad (11)$$

$$c_\upsilon = 0,6143 + 0,04572d + 0,00029T + 0,000116Td; \quad (12)$$

для смеси воздуха и водяных паров, кДж/(кг·К),

$$c_\upsilon = 1,02 + 0,21X_1 + 0,14X_2 + 0,04X_1X_2; \quad (13)$$

$$c_\upsilon = 0,6243 + 0,54288d + 0,00029T + 0,000464Td; \quad (14)$$

для смеси воздуха и биотоплива состава $0,87 \cdot CH_4 + 0,13 \cdot CO_2$

$$c_\upsilon = 1,38 + 0,57X_1 + 0,43X_2 + 0,33X_1X_2; \quad (15)$$

$$c_\upsilon = 0,6243 - 0,17124d + 0,00029T + 0,003828Td; \quad (16)$$

для смеси воздуха и биотоплива состава $0,50 \cdot CH_4 + 0,50 \cdot CO_2$

$$c_\upsilon = 1,15 + 0,34X_1 + 0,30X_2 + 0,21X_1X_2; \quad (17)$$

$$c_\upsilon = 0,6429 - 0,1999d + 0,000261T + 0,002436Td. \quad (18)$$

Удельная мольная теплоемкость рабочих смесей различного элементарного состава определяется с учетом молярной массы смеси, которая определяется по процентному содержанию составляющих смеси.

Для смеси воздуха и природного газа, кДж/(кмоль·К),

$$c_\upsilon^{(1)} = 18,08 - 12,23d + 1,92d^2 + (8,4 \cdot 10^{-3} - 3,75 \cdot 10^{-3}d - 5,54 \cdot 10^{-2}d^2)T; \quad (19)$$

для смеси воздуха и чистых продуктов сгорания (рециркуляция газов), кДж/(кмоль·К),

$$c_\upsilon^{(1)} = 17,8 + 1,4d + 3,6 \cdot 10^{-3}d^2 + (8,4 \cdot 10^{-3} + 3,4 \cdot 10^{-3}d + 9,3 \cdot 10^{-6}d^2)T; \quad (20)$$

для смеси воздуха и водяных паров, кДж/(кмоль·К),

$$c_\upsilon^{(1)} = 18,08 + 8,89d - 5,94d^2 + (8,4 \cdot 10^{-3} + 1,023 \cdot 10^{-2}d - 5,1 \cdot 10^{-3}d^2)T; \quad (21)$$

для смеси воздуха и биотоплива состава $0,87CH_4 + 0,13CO_2$, кДж/(кмоль·К),

$$c_\upsilon^{(1)} = 18,08 - 10,733d + 1,59d^2 + (8,4\cdot 10^{-3} + 0,1082d + 3,55\cdot 10^{-2}d^2)T; \quad (22)$$

для смеси воздуха и биотоплива состава $0,50CH_4+0,50CO_2$, кДж/(кмоль·К),

$$c_\upsilon^{(1)} = 18,62 - 5,11d - 0.21d^2 + (7,56\cdot 10^{-3} + 7,08\cdot 10^{-2}d + 2,58\cdot 10^{-3}d^2)T. \quad (23)$$

При выполнении теплового расчета двигателя внутреннего сгорания необходимо оценивать величину средней мольной изохорной и изобарной теплоемкости рабочей смеси и продуктов сгорания в рассматриваемый момент рабочего цикла.

Для процесса сжатия, когда доля сгоревшего топлива практически равна нулю ($\Delta x = 0$), уравнения для определения средней мольной изохорной теплоемкости будет иметь вид, кДж/(кмоль·К):

$$C_{\upsilon c} = \frac{(1,64\Delta x + \gamma_r)C_\upsilon^{(\text{сг})} + \left[\alpha(1+\gamma_r) - (\Delta x - \gamma_r)\right]C_\upsilon^{(\text{в})}}{\alpha(1+\gamma_r) + 0,064\Delta x} = a_{\upsilon c} + b_c T_c, \quad (24)$$

где $C_\upsilon^{(\text{сг})}, C_\upsilon^{(\text{в})}$ – соответственно средняя мольная теплоемкость чистых продуктов сгорания и сухого воздуха, кДж/(кмоль·К);

T_c – текущая температура рабочего тела в процессе сжатия, К;

Δx – доля сгоревшего топлива на линии сжатия;

γ_r – коэффициент остаточных газов;

α – коэффициент избытка воздуха для сгорания топлива.

Подставив в уравнение (24) полученные ранее значения для средней мольной теплоемкости и проведя некоторые преобразования, получим выражения для коэффициентов регрессии в случае применения в дизельных двигателях комбинированных видов топлива:

$$a_{\upsilon c} = \frac{1}{\alpha(1+\gamma_r)}(c_1\gamma_r + c_3\alpha - c_4\alpha d + c_5\alpha d^2 + c_3\alpha\gamma_r - c_4\alpha\gamma_r d + c_5\alpha\gamma_r d^2 + c_3\gamma_r + c_4\gamma_r d - c_5\gamma_r d^2); \quad (25)$$

$$b_c = \frac{1}{\alpha(1+\gamma_\kappa)}(c_2\gamma_r + c_6\alpha - c_7\alpha d - c_8\alpha d^2 + c_6\alpha\gamma_r - c_7\alpha\gamma_r d - c_8\alpha\gamma_r d^2 - c_6\gamma_r + c_7\gamma_r d + c_8\gamma_r d^2). \quad (26)$$

При расчете процесса сгорания топлива в цилиндре двигателя, когда доля сгоревшего топлива может достигать единицы ($\Delta x = 1$), значения коэффициентов регрессии уравнения мольной теплоемкости $C_{\upsilon z} = a_{\upsilon z} + b_z T_z$ могут быть представлены в виде:

$$a_{\upsilon z} = \frac{1}{\alpha(1+\gamma_r) + 0,064\Delta x}(1,064c_1\Delta x + c_1\gamma_r + c_3\alpha - c_4\alpha d + c_5\alpha d^2 + \\ + c_3\alpha\gamma_r - c_4\alpha\gamma_r d + c_5\alpha\gamma_r d^2 - c_3\Delta x + c_4 d\Delta x - c_5 d^2\Delta x - c_3\gamma_r + c_4\gamma_r d - c_5\gamma_r d^2); \quad (27)$$

$$b_z = \frac{1}{\alpha(1+\gamma_r) + 0,064\Delta x}(c_2\gamma_r + c_6\alpha + c_7\gamma_r d - c_8\alpha d^2 + c_6\alpha\gamma_r - c_7\alpha d - \\ - c_8\alpha\gamma_r d^2 + c_6\Delta x + c_7 d\Delta x + c_8 d^2\Delta x + c_6\gamma_r d + c_7\alpha\gamma_r d + c_8\gamma_r d^2). \quad (28)$$

Коэффициенты c_1, c_2, c_3, …, c_7, c_8 для различных видов топлива представлены в таблице 6.

Приведенные уравнения позволяют оценить интенсивность теплообмена между рабочим телом и деталями двигателя в процессе сгорания, если полагать, что доля сгоревшего топлива зависит от продолжительности сгорания, т. е. предположить, что Δx = var и распределена по какому-либо известному закону выгорания, например по закону Вибе.

В классической теории расчета рабочего цикла двигателя Гриневецкого – Мазинга сделано предположение, что к концу видимого сгорания доля сгоревшего топлива равна единице, что не соответствует действительности при расчете серийных моделей двигателей. Максимальное значение Δx в выражениях (27), (28) может составлять 0,87 – 0,89.

Таблица 6 – Эмпирические коэффициенты для различных видов топливных смесей

Обозначение коэффициента	Значение коэффициентов для топливной смеси				
	1	2	3	4	5
c_1	18,96	18,96	18,96	18,96	18,96
c_2	0,0115	0,0115	0,0115	0,0115	0,0115
c_3	18,08	18,08	18,62	18,08	17,79
c_4	12,235	10,733	5,11	8,89	1,37
c_5	1,916	1,59	1,21	5,94	0,0036
c_6	0,0084	0,0084	0,0076	0,0084	0,0084
c_7	0,0037	0,0108	0,0108	0,01023	0,0034
c_8	0,0554	0,0355	0,0258	0,0051	0,0000093
Примечание: 1 – дизельное топливо + природный газ; 2 – дизельное топливо + биотопливо (87% метана+13% диоксида углерода); 3 – дизельное топливо + биотопливо (50 % метана, 50 % диоксида углерода); 4 – дизельное топливо + пары воды; 5 – дизельное топливо + отработавшие газы					

Для процесса расширения, когда в цилиндре двигателя догорает часть топлива, изменение средней мольной теплоемкости, как и ранее, описывается выражением вида $C_{\upsilon b} = a_{\upsilon b} + b_b T_b$, коэффициенты регрессии которого рассчитываются по выражениям:

$$a_{\upsilon b} = \frac{1}{\alpha(1+\gamma_r)+0,064\Delta x}(1.064c_1\Delta x + c_3\gamma_r + c_3\alpha - c_4\alpha d + c_5\alpha d^2 = \\ +c_3\alpha\gamma_r - c_4\alpha\gamma_r d + c_5\alpha\gamma_r d^2 - c_3\Delta x + c_4 d\Delta x - c_5 d^2\Delta x - c_3\gamma_r + c_4\gamma_r d - c_5\gamma_r d^2); \quad (29)$$

$$b_b = \frac{1}{\alpha(1+\gamma_r)+0.064\Delta x}(1,064c_2\Delta x + c_2\gamma_r + c_6\alpha + c_7\gamma_r d - c_8\alpha d^2 + \\ +c_6\alpha\gamma_r - c_7\alpha d - c_8\alpha\gamma_r d^2 + c_6\Delta x + c_7 d\Delta x + c_8 d^2\Delta x + c_6 d\gamma_r + c_7\alpha\gamma_r d + c_8 d^2\gamma_r). \quad (30)$$

Как показано в формулах (25) – (30), средняя мольная теплоемкость рабочего тела определяется коэффициентом избытка воздуха для сгорания топлива, законом выгорания топлива в цилиндре двигателя, коэффициентом остаточных газов и др. Качественные изменения коэффициентов регрессии при добавке альтернативных смесей в пределах 20 % приведены на рисунке 1. Наиболее существенное различие в термодинамических параметрах рабочего процесса дизеля следует ожидать при работе на режимах, близких к номинальному.

Таким образом, выполненные теоретические исследования позволяют заключить, что

изменение физико-химических свойств топлива, которое будет иметь место при добавлении какой-либо присадки, приводит к изменению его удельной мольной и изобарной теплоемкости, увеличению интенсивности теплообмена между рабочим телом и деталями цилиндропоршневой группы;

изменение удельной теплоемкости приведет к изменению работы, совершаемой рабочим телом в процессах сжатия и сгорания-расширения;

изменение теплоты сгорания топливной смеси, несомненно, приведет к изменению мощности энергетической установки, изменению ее экономичности и, возможно, к изменению количества вредных выбросов в отработавших газах дизеля;

изменение термодинамических параметров рабочего тела в начале сжатия приведет к изменению значения максимального давления и максимальной температуры сгорания, что может увеличить динамическую и тепловую напряженность деталей дизеля.

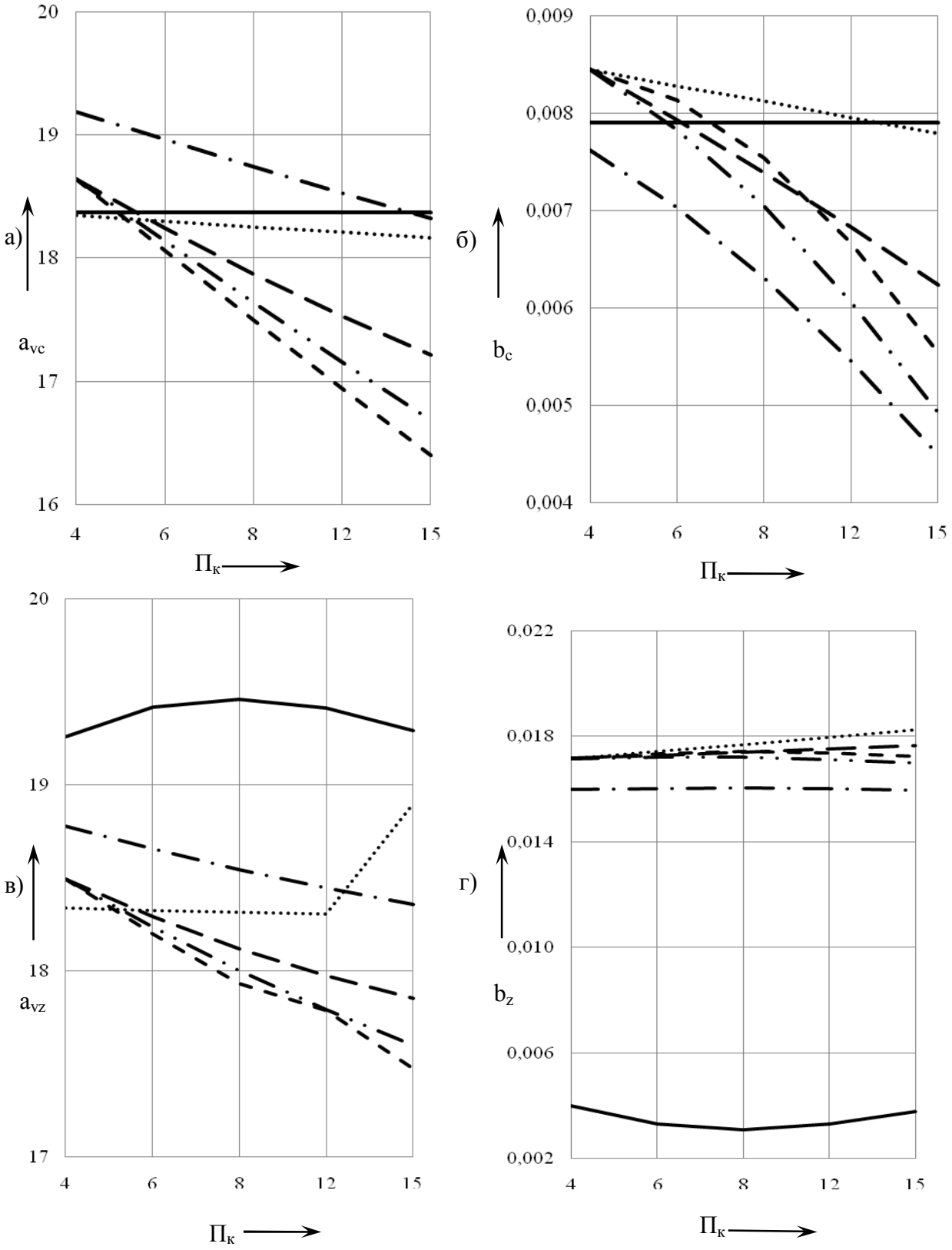


Рисунок 1 – Коэффициенты регрессии уравнений средней мольной теплоемкости при добавке 20 % присадки: ── – дизельное топливо (ДТ); ─ • ─ – ДТ + биотопливо (87 % – CH_4, 13 % – CO_2); ─ • • ─ – ДТ + биотопливо (50 % – CH_4, 50 % – CO_2); - - - - - – ДТ + природный газ; • • • • • – ДТ + отработавшие газы; ─ ─ ─ – ДТ + вода

Очевидно, что окончательное решение о возможности и, самое главное, о целесообразности использования альтернативных топливных смесей в транспортных двигателях внутреннего сгорания может быть принято только после сравнительной оценки термодинамических, экономических и экологических параметров рабочего цикла дизеля, работающего при одинаковых нагрузочных режимах на различных видах топливной смеси.

Список литературы

1. Работа дизелей на нетрадиционных топливах [Текст] / В. А. Марков, А. И. Гайворонский и др. – М.: Легион – Автодата, 2008. – 464 с.

2. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справочник [Текст] / Под ред. Л. В. Гурвич. – М., 1962. – 1480 с.

3. Звонов, В. А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания [Текст] / В. А. Звонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 159 с.

4. Термодинамические свойства газов: Справочное пособие [Текст] / М. П. Вукалович, В. А. Кириллин и др. – М.: Машиностроение, 1953. – 1953 с.

УДК 629.47: 658.2

В. А. Смирнов, А. С. Талызин

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ РЕМОНТЕ И ТЕХНИЧЕСКОМ ОБСЛУЖИВАНИИ ЛОКОМОТИВОВ

В статье рассматриваются вопросы энергосбережения в локомотивном хозяйстве, анализируется технологическое потребление топливно-энергетических ресурсов на ремонтных предприятиях, формулируются основные направления повышения энергетической эффективности на основе предлагаемой классификации энергетических затрат, приводятся типовые мероприятия по экономии топливно-энергетических ресурсов, основанные на результатах практического опыта работы специалистов ОмГУПСа в данном направлении.

На завершающем этапе структурного реформирования ОАО «РЖД» перед локомотивным хозяйством компании поставлен ряд серьезных задач по модернизации деятельности ремонтных предприятий, среди которых особое значение имеет оптимизация себестоимости и качества предоставляемых услуг по текущему ремонту и техническому обслуживанию локомотивов.

Реализация поставленных задач в первую очередь предполагает повышение уровня механизации и автоматизации производства, внедрение современного технологического оборудования, средств неразрушающего контроля и диагностирования, что влечет рост энергопотребления и доли энергетической составляющей в себестоимости конечной продукции. Практика энергетического аудита локомотиворемонтных предприятий показала, что достижение высоких результатов в области экономии топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) возможно только при условии комплексного и всестороннего анализа всех аспектов деятельности предприятия и в первую очередь технологических процессов производства.

С точки зрения энергообеспечения локомотиворемонтное предприятие представляет собой технологическую энергетическую систему, включающую в себя комплекс технологического оборудования, нормативно-методических и технологических документов, технологических процессов основного и вспомогательного производства, где квалифицированными кадрами используются ТЭР для преобразования материалов и комплектующих в конечную продукцию [1].

Основными видами ТЭР, потребляемыми в технологии локомотиворемонтного производства являются электрическая энергия, сжатый воздух, техническая вода, водяной пар, горючие газы и их смеси, дизельное и котельно-печное топливо (рисунок 1).

Электрическая энергия – основной энергоноситель, на долю которого приходится более 80 % затрат ТЭР на технологические процессы ремонта и технического обслуживания (ТО), включая выработку сжатого воздуха, нагрев воды и пара на технологические нужды (без учета затрат топлива на реостатные испытания тепловозов после ремонта).

В качестве основного показателя для оценки энергетической эффективности работы локомотиворемонтных предприятий принята энергоемкость производства – величина потребления энергии и топлива на основные и вспомогательные технологические процессы ремонта и ТО локомотивов.

Энергоемкость оценивается и нормируется в удельных единицах на измеритель работ (или укрупненный измеритель работ) раздельно по видам потребляемых топливно-энергетических ресурсов. В случае необходимости интегральной оценки применяют перерасчет натуральных измерителей в условное топливо или экономические затраты в соответствии с текущими ценами на топливно-энергетические ресурсы.

Затраты ТЭР на ремонт и техническое обслуживание локомотивов включают в себя переменную составляющую – технологические затраты $C^{\text{ТХ}}$ – и условно-постоянную – затраты на энергообеспечение производственной инфраструктуры ремонтных депо $C^{\text{ОХР}}$ (отопление, освещение, вентиляция зданий):

$$C^{(\text{ТОР})} = C^{(\text{ТХ})} + C^{(\text{ОХР})}. \tag{1}$$

Удельные затраты ТЭР конкретного вида ремонта и ТО определяются по выражению:

$$c^{(\text{ТОР})} = \frac{\sum_{i=1}^{N} C_i^{(\text{ТХ})} + C^{(\text{ОХР})}.}{N(T)}, \tag{2}$$

где $C^{(\text{ТХ})}$ – технологические затраты ТЭР для выполнения данного вида ремонта или ТО (на единицу ремонта или ТО);

$N(T)$ – объем данного вида ремонта или ТО за период T (единиц);

α_i – распределение инфраструктурных затрат по видам ремонта и обслуживания, может быть принято пропорциональным затратам на технологические операции или найдено расчетно-аналитическим путем по результатам энергетического обследования предприятия.

Фактический объем технологического потребления ТЭР складывается из полезных затрат и потерь на технологическую обработку, доставку, складирование ремонтируемых узлов и агрегатов, материалов и комплектующих (рисунок 2).

Рисунок 1 – Технологическое потребление ТЭР при ремонте и обслуживании локомотивов

Производительные затраты определяют минимально достижимый уровень расхода топливно-энергетических ресурсов для выполнения операций по ремонту и техническому обслуживанию локомотивов согласно утвержденной технологии на заданном в соответствии с регламентом оснащенности депо оборудовании (идеальное производство).

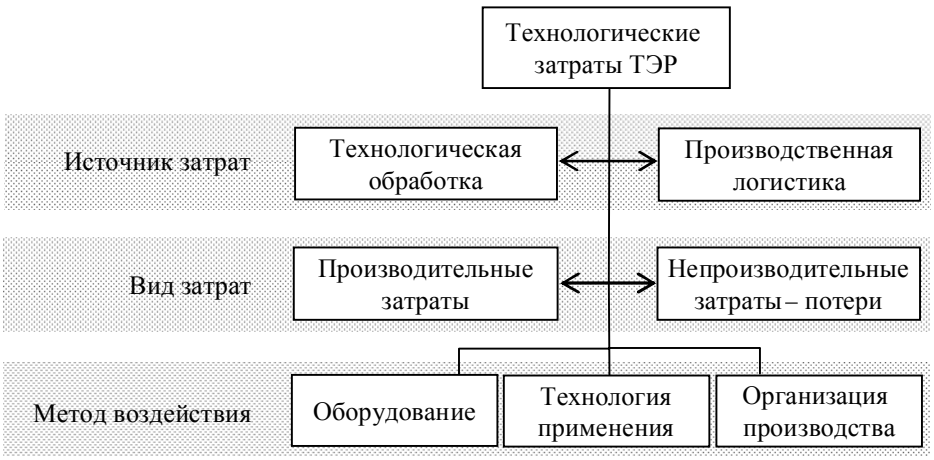


Рисунок 2 – Классификация технологических затрат ТЭР для производственных систем

В действительности энергетические затраты всегда превышают «идеальный» уровень ввиду неизбежного наличия непроизводительных технологических операций, нерационального планирования, неудовлетворительных логистики и материально-технического снабжения, несоблюдения режимов работы оборудования, низкого качества ремонта. Как показывает практика, потери могут быть соизмеримы с производительными затратами, а в ряде случаев могут превышать их [2]. По мнению экспертов, внедрение принципов бережливого производства в локомотивных депо ОАО «РЖД» позволит увеличить норму операционной прибыли в 2 – 3 раза за счет сокращения объема незавершенного производства (в 1,5 – 2 раза), снижения условно-постоянных расходов (на 20 – 30 %), уменьшения внутреннего возврата и брака продукции по критическим процессам до 10 раз.

Таким образом, снижение уровня непроизводительных затрат является первоочередной задачей повышения энергетической эффективности локомотиворемонтного производства. Важнейшую роль в этом играет оптимизация системы производственной логистики, включая отдельные подзадачи оптимизации размещения технологического оборудования, планирования, организации производства и материально-технического снабжения. Достигаемые результаты кроме непосредственного снижения технологического расхода ТЭР обеспечивают сокращение затрат на производственную инфраструктуру за счет уменьшения фонда рабочего времени, высвобождения производственных и вспомогательных площадей.

Расчет производительных затрат для массовых потребителей с высокой интенсивностью и случайным характером использования (сварочное, наплавочное, станочное оборудование, механизированный ручной инструмент, моечные машины мелких деталей, контрольно-испытательные станции, печи для сушки изоляции электрических машин) может быть выполнен по установленной мощности оборудования с учетом коэффициентов использования рабочего времени. Ввиду своей простоты данный подход нашел самое широкое распространение во всех отраслях народного хозяйства и подробно описан в соответствующей литературе по энергосбережению [3, 4].

Особенностью предприятий локомотивного хозяйства является малая производственная программа по основной номенклатуре изделий, определяемая программой ремонта депо и количеством однотипных изделий на единице ТПС. Это обусловливает низкий коэффициент использования значительной части технологического оборудования (моечные машины, механизированные ремонтные позиции, домкраты для подъема кузова, контрольно-испытательное оборудование, установки индукционного нагрева).

В этом случае технологический процесс следует рассматривать как поток единичных изделий, для которого затраты $C^{(ТХ)}$ на выполнение программы ремонта N находятся по показателям удельной энергоемкости технологических операций $c^{(ТХО)}$ (например, цикл испытаний пары тяговых двигателей после ТР-3):

$$C^{(\text{ТХ})} = \sum_{i=1}^{N} c_i^{(\text{ТХО})}\left(t_{\text{ТХ}}\right). \qquad (3)$$

Продолжительность использования технологического оборудования $t_{\text{ТХ}}$ за время единичного цикла ремонта или технического обслуживания локомотива принимается в соответствии с нормами, установленными в технологической документации. При отсутствии таких сведений для процессов с высокой степенью механизации можно воспользоваться значениями трудоемкости, приводимыми в технико-нормировочных справочниках.

Оценка энергетических затрат на работу транспортных и грузоподъемных механизмов выполняется на основании анализа материальных потоков ремонтируемого оборудования, материалов и комплектующих. При этом совокупность транспортных перемещений представляется в виде соответствующих технологических маршрутов, каждый из которых характеризуется протяженностью (длиной), массой транспортируемого груза, типом и величиной удельной потребляемой мощности подъемного или транспортного механизма.

В инженерной практике энергетических обследований цехов, оборудованных мостовыми кранами, можно предложить использование следующей методики. Оборудование локомотива, транспортируемое с использованием грузоподъемных механизмов, распределяется на n групп по массогабаритным показателям $i = 1, \ldots, n$ (в зависимости от состава оборудования количество групп рекомендуется выбирать до пяти). В пределах каждой группы рассчитывается средняя масса транспортируемого изделия

$$m_{\text{ср}i} = \frac{\sum_{j=1}^{k} \alpha_j \cdot m_j}{k}, \qquad (4)$$

где m_j – масса единицы оборудования данного вида в пределах группы;

k – количество видов оборудования в группе;

α_j – доля данного вида оборудования в составе группы $\sum_{j=1}^{k} \alpha_j = 1$.

Для расчета затрат энергоресурсов на работу цехового крана введем понятие зоны обслуживания крана. Под зоной обслуживания условимся считать область наиболее вероятных перемещений крана из фиксированной начальной позиции – точки дислокации крана в режиме ожидания работы.

Дальнейший расчет затрат зависит от формы организации ремонтного производства. При стационарном постовом методе позиция условной дислокации крана в пределах зоны обслуживания принимается фиксированной. Данный подход применим к широкому кругу производственных цехов депо, в том числе электроаппаратному (ремонт блоков БСА, главных контроллеров, главных выключателей), стойловой части цеха текущего ремонта ТР-3 и среднего ремонта, дизель-агрегатному и др.

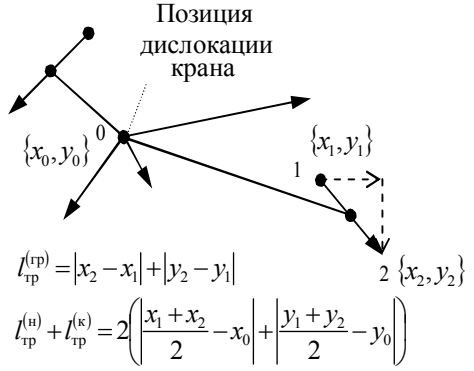


Рисунок 3 – Пояснения к расчетной формуле (2)

Затраты на транспортирование для постового стационарного метода ремонта могут быть найдены исходя из допущения, что маршрут движения крана складывается из элементарных грузовых перемещений между двумя ближайшими технологическими позициями, а подача крана осуществляется из точки дислокации с последующим возвратом в исходное положение (рисунок 3):

$$C_{\text{тр}}^{\text{эл}} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{p(i)} \left(\frac{m_{\text{ср}i}}{M} \cdot \left(c_{\text{по}}^{(\text{гр})} \cdot 2z + c_{\text{тр}}^{(\text{гр})} \cdot l_{\text{тр},j}^{(\text{гр})} \right) + c_{\text{тр}}^{(\text{всп})} \left(l_{\text{тр},j}^{(\text{п})} + l_{\text{тр},j}^{(\text{в})} \right) \right), \qquad (5)$$

где p – количество элементарных технологических операций (перемещений) единиц оборудования в пределах группы изделий в зоне обслуживания;

z – перемещение груза при подъеме и опускании на конечных позициях транспортирования, м;

$c_{\text{по}}^{(\text{гр})}$, $c_{\text{тр}}^{(\text{гр})}$, $c_{\text{тр}}^{(\text{всп})}$ – номинальный расход электроэнергии на единицу перемещения при подъеме-опускании, транспортировке груза и вспомогательных операциях крана (движение без груза) соответственно, кВт·ч/м;

M – грузоподъемность крана, кг;

$l_{\text{тр}}^{(\text{гр})}$, $l_{\text{тр}}^{(\text{п})}$, $l_{\text{тр}}^{(\text{в})}$ – дальность единичного перемещения крана при транспортировании груза и вспомогательных операциях подачи и возврата соответственно.

При поточном производстве позиция дислокации крана перемещается навстречу технологическому потоку с шагом производственного ритма (крановый конвейер). В этом случае конечная позиция первого перемещения является начальной для последующего.

Для приближенного расчета средней дальности воспользуемся допущением о равномерном распределении технологического оборудования в пределах зоны действия крана.

В этом случае для стационарного метода ремонта

$$\begin{cases} l_{\text{тр.ср}}^{(\text{гр})} = k_{\text{д}} \cdot \dfrac{a \cdot b}{N_{\text{тех}}}; \\ l_{\text{тр.ср}}^{(\text{п})} + l_{\text{тр.ср}}^{(\text{в})} = k_{\text{д}} \left(a + b\right), \end{cases} \tag{6}$$

где a, b – размеры зоны обслуживания крана;

$N_{\text{тех}}$ – количество единиц технологического оборудования, обслуживаемого краном в пределах зоны действия;

$k_{\text{д}}$ – коэффициент, учитывающий увеличение фактической дальности за счет неравномерности распределения технологического оборудования и заявок обслуживания, наличия установленных и фиксированных из соображений безопасности организации работы маршрутов для движения крана и ряда других факторов ($k_{\text{д}}$ = 1,1 – 1,3).

Для поточного метода ремонта

$$l_{\text{тр.ср}}^{(\text{гр})} = l_{\text{тр.ср}}^{(\text{в})} = k_{\text{д}} \frac{a \cdot b}{N_{\text{тех}}}, \quad l_{\text{тр.ср}}^{\text{п}} = 0. \tag{7}$$

Наиболее сложной является задача оценки непроизводительных затрат топливно-энергетических ресурсов, в частности, логистических потерь, затрат, связанных с нерациональным планированием производства, недостаточной производительностью подъемно-транспортных механизмов, суточной неравномерностью загрузки технологического оборудования, внутренним возвратом изделий. Непосредственный расчет данных затрат является чрезвычайно трудоемкой задачей и возможен при использовании средств имитационного моделирования.

В качестве альтернативного решения можно рекомендовать учет непроизводительных затрат путем введения дополнительных повышающих коэффициентов по каждой статье расходов ТЭР, основываясь на мнении экспертов, имеющих необходимый опыт в области технологии и организации локомотиворемонтного производства.

Результаты энергетического аудита предприятий локомотивного хозяйства ОАО «РЖД», проведенного специалистами ОмГУПСа за последние годы, позволяют выделить следующие наиболее энергоемкие процессы локомотиворемонтного производства, подлежащие первоочередному анализу при выработке энергосберегающих мероприятий:

ремонт и испытания электрических машин, пропитка и сушка изоляции;

выгрузка, складирование, сушка и подача экипировочного песка;

сборка, разборка колесно-моторных блоков, ремонт колесных пар;

демонтаж, предварительная разборка и монтаж оборудования в цехе ТР-3, СР (основное потребление обусловлено работой цеховых кранов и средств механизации);

очистка кузова электровоза от старой краски и окрашивание кузова механизированными способами, очистка узлов и агрегатов электровоза перед ремонтом в моечных машинах;

сварка, наплавка, металлообработка при изготовлении и восстановлении деталей;

подъемно-транспортные операции.

Значительная доля потребления электрической энергии приходится на технологическое освещение смотровых канав и генерацию сжатого воздуха, используемого при пневмообразивной очистке, покраске, ремонте и испытаниях пневматического оборудования локомотивов (рисунок 4).

Рисунок 4 – Доли использования электроэнергии при ремонте ТПС по направлениям

В тепловозных депо к числу наиболее энергоемких относятся ремонт дизель-генераторной установки и реостатные испытания тепловоза. Так, нормативный расход дизельного топлива при проведении цикла обкаточных и сдаточных реостатных испытаний тепловоза ТЭМ2 составляет 600 кг, ТЭ10 – 1550, ТЭП70 – 1600, М62 – 1800 кг.

В соответствии с рассмотренной выше классификацией затрат топливно-энергетических ресурсов можно выделить три основные направления повышения энергетической эффективности локомотиворемонтного производства:

1) снижение энергоемкости технологической обработки ремонтируемых изделий: улучшение показателей энергоэкономичности технологического оборудования за счет его модернизации или внедрения нового; снижение энергозатрат путем изменения технологических режимов обработки (например, повышение скорости резания при токарной обработке, испытания электрических машин неразрушающими методами, применение более эффективных моющих растворов при очистке деталей и т. д.);

2) повышение эффективности производственной логистики: оптимизация компоновки производственных участков и размещения оборудования; совершенствование планирования и организации производства; повышение эффективности транспортных операций и материально-технического снабжения;

3) сокращение энергозатрат на содержание инфраструктуры предприятия: автоматизация системы контроля и учета энергоресурсов; внедрение энергосберегающих технологий в системах освещения, теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования; снижение потерь энергоресурсов в зданиях, сооружениях, инженерных и тепловых сетях.

Состав типовых мероприятий по снижению технологического энергопотребления при ремонте и техническом обслуживании локомотивов представлен в таблице 1.

Экономический эффект от внедрения энергосберегающих мероприятий с учетом дисконтирования определяется выражением:

$$Э = \sum_{t=0}^{T} \left(C_{ТЭР}(t) - C'_{ТЭР}(t) \right) (1+E)^{\Delta t}, \qquad (8)$$

где $C_{ТЭР}$, $C'_{ТЭР}$ – расчетный годовой объем потребления ТЭР до и после внедрения энергосберегающих мероприятий соответственно, р.;

E – норма дисконта;

T – период внедрения (реализации проекта), лет;

$\Delta t = t_p - t$, где t_p и t – соответственно год расчетный и год, результаты которого приводятся к расчетному.

Расчет совокупных затрат ТЭР должен производиться с учетом затрат ТЭР, связанных с эксплуатацией подвижного состава, прошедшего ремонт и ТО на предприятии:

$$C_{ТЭР} = C^{(ТОР)}(N) + C_к(t) + C_т^{(э)} + C_т^{(дт)}, \qquad (9)$$

где $C^{(ТОР)}$ – затраты на ремонт и ТО (1); $C_к$ – непроизводительные затраты топливно-энергетических ресурсов на устранение последствий браков и отказов ТПС в эксплуатации;

$C_{\text{Т}}^{(\text{э})}$, $C_{\text{Т}}^{(\text{дт})}$ – затраты электрической энергии и дизельного топлива на тягу поездов, определяемые объемом перевозок в грузовом, пассажирском и пригородном движении, удельным расходом и ценами на энергоносители.

Таблица 1 – Типовые энергосберегающие мероприятия при ремонте и ТО локомотивов

Наименование мероприятия	Составляющие и размер эффекта мероприятия
Складирование песка на специально подготовленных крытых площадках с сушкой преимущественно в летнее время	Снижение расхода энергии на сушку песка до 15 – 30 % за счет снижения его влажности и повышения температуры
Автоматизация управления освещением смотровых канав пунктов технического обслуживания локомотивов (ПТОЛ)	Экономия электроэнергии за счет автоматического отключения в перерывах между обслуживаниями ТПС
Применение энергооптимальных режимов сушки увлажненной изоляции тяговых электрических машин	Сокращение продолжительности сушки в 1,5 – 2 раза, снижение расхода электрической энергии на 30 – 35 %
Повышение качества ремонта и настройки характеристик тягово-энергетического оборудования ТПС	Снижение удельного расхода топлива и электрической энергии на тягу поездов
Применение технологии ультразвуковой, гидродинамической очистки и «низкотемпературных» моющих средств	Сокращение затрат теплоносителей на нагревание моющего раствора в 2,5 – 3 раза, уменьшение расхода воды и времени очистки, исключение ручного труда
Оснащение моечных машин локальными установками очистки	Снижение расхода тепловой энергии на нагрев моющего раствора, уменьшение расхода воды
Инфракрасная сушка узлов и деталей ТПС после окрашивания	Значительная экономия электроэнергии за счет более высокого КПД поверхностного нагрева
Контроль степени увлажнения изоляции при сушке электрических машин	До 40 % экономии электроэнергии при предварительной сушке изоляции тягово-энергетического оборудования перед пропиткой
Рекуперация и полезное использование преобразованной энергии при испытаниях	До 80 % экономии электроэнергии при испытаниях электрических машин и ДГУ
Применение альтернативных «безнагрузочных» методов испытаний	До 90 – 95 % экономии электроэнергии на испытания
Оптимизация процессов, внедрение сетевых методов планирования и технологий «бережливого» производства	Улучшение показателей загрузки технологического оборудования, сокращение непроизводительного расхода ТЭР
Автоматизация контроля и учета топлива при заправке тепловозов	Эффект в рамках создания единой системы автоматизированного учета и нормирования ТЭР в теплотяге

Затраты ТЭР на устранение браков включают в себя затраты на доставку поврежденного локомотива, внеплановый ремонт или техническое обслуживание, финансовые потери упущенных возможностей компании по вине неудовлетворительного технического состояния локомотивов в гарантийный период после ремонта или ТО:

$$C_{\text{к}}(t) = c_{\text{к}} \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{Г}}} l_{\text{пр},i}}{T^{(E)}(t)}, \tag{10}$$

где $c_{\text{к}}$ – средний размер непроизводительных затрат ТЭР от одного случая брака;

$T^{(E)}(t)$ – средняя наработка локомотива на отказ;

$l_{\text{пр}}$ – суммарная наработка (пробег) локомотива за время от 0 до t, тыс. км;

$N_{\text{г}}$ – локомотивный парк, находящийся на гарантии после ремонта или ТО, выполненных на данном предприятии (средний показатель за период).

При расчете совокупных затрат ТЭР учитываются хозяйственное, маневровое движение, следование одиночным локомотивом (без поезда) и горячий простой.

По данным ОАО «РЖД» в структуре потребления ТЭР расход электрической энергии и дизельного топлива на тягу поездов занимает более 70 % [5]. Непосредственно в локомотивном хозяйстве доля расхода электрической энергии и дизельного топлива на тягу поездов составляет около 40 % совокупных расходов и является доминирующим фактором в себестоимости перевозок. По мнению специалистов, резервы экономии только за счет повышения ка-

чества эксплуатационной работы, снижения количества нарушений графиков движения поездов, ухудшения показателей использования тягового подвижного состава составляют более 2 % от общего расхода топливно-энергетических ресурсов на железнодорожном транспорте.

На потребление ТЭР поездом в общем случае влияют различные эксплуатационные факторы: профиль и план пути участка, масса поезда, сопротивление движению, скорость, КПД локомотива, режимы ведения поезда, климатические факторы, квалификация локомотивной бригады, параметры локомотива и вагонов.

Важнейшим фактором энергетической эффективности тягового подвижного состава является техническое состояние его тягово-энергетического оборудования (дизель-генераторная установка, тяговый электрический привод и аппараты, вспомогательные машины, система охлаждения), системы рекуперации электрической энергии, контроля и управления.

Опыт эксплуатации тепловозов показывает, что расход топлива на тягу поездов в значительной степени зависит от наработки локомотивов, с увеличением наработки расход топлива повышается (таблица 2). После проведения ТО-3 и ТР-1 расход топлива, как правило, снижается. Увеличение пробега между ТР-1 на 20 % приводит к дополнительному расходу топлива до 0,08 % у тепловозов ТЭ3 и 2М62, до 0,06 % – у ТЭМ2 и более 1 % – у 2ТЭ10В, М, У и 2ТЭ116 [6].

Таблица 2 – Зависимость расхода топлива от наработки тепловозов, кг/10^4 ткм

Серия тепловоза	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции
ТЭ3, 2М62	$b_c = 43{,}5 + 0{,}16 \cdot 10^{-4}\,L$	0,67
2ТЭ10М, В, У	$b_c = 31{,}4 + 0{,}17 \cdot 10^{-4}\,L$	0,62
2ТЭ116	$b_c = 21{,}8 + 0{,}13 \cdot 10^{-4}\,L$	0,74

Выработка ресурса и дефекты оборудования приводят к еще более значительному ухудшению показателей энергетической эффективности тягового подвижного состава, к повышению вероятности внезапных отказов в пути следования. Эффективным способом обеспечения надежной и экономичной работы тягово-энергетического оборудования является раннее обнаружение дефектов за счет использования средств диагностирования при проведении технического обслуживания и текущего ремонта.

Так, по тепловозному парку более 70 % всех случаев снижения эффективной мощности дизеля и, как следствие, перерасхода топлива связаны с неисправностями топливной аппаратуры, снижением производительности наддувочного агрегата, неудовлетворительной работой системы охлаждения дизеля, которые могут выявляться современными средствами контроля и диагностирования непосредственно на тракционных путях депо (ППРФ-3 «ДЭСТА») или на станции реостатных испытаний тепловозов («Кипарис», «Алмаз», «Магистраль»).

Кроме перечисленных приборов в локомотивном хозяйстве ОАО «РЖД» получили широкое распространение комплексы диагностирования подшипниковых узлов и зубчатых передач («Прогноз-1м», КПА-1В, «КОМПАКС», ОМСД); электрических машин и аппаратов, цепей управления, тормозного оборудования (АСТД, «Доктор-030», «Доктор-060», «КОМПАКС»).

Оптимальная периодичность и состав контрольно-диагностических операций, выполняемых при ТО и текущем ремонте, должны обеспечивать сокращение суммарных условных затрат к измерителю наработки обслуживаемого локомотивного парка (суммарному пробегу):

$$c^*_{\text{ТЭР}} = \frac{C_{\text{и}} + C_{\text{д}} + C_{\text{р}} - \left(C_{\text{к}} - C'_{\text{к}}\right) - \left(C_{\text{т}}^{(\text{э})} - C'^{(\text{э})}_{\text{т}} + C_{\text{т}}^{(\text{дт})} - C'^{(\text{дт})}_{\text{т}}\right)}{L_{\text{пр}}}, \qquad (11)$$

где $C_{\text{и}}$ – стоимость средств диагностирования и вспомогательного технологического оборудования, приведенная к анализируемому периоду; $C_{\text{д}}$, – затраты на диагностирование локомотивов; $C_{\text{р}}$ – затраты на проведение дополнительных работ по рекомендациям, содержащимся в протоколах диагностирования; $C_{\text{к}}$, $C'_{\text{к}}$ – затраты на устранение последствий браков и отказов в эксплуатации по вине неудовлетворительного технического состояния локомотивов до и после внедрения

средств диагностирования (3); $C_т^{(эл)}$, $C_т^{(дт)}$, $C'_т^{(эл)}$, $C'_т^{(дт)}$ – затраты электрической энергии и топлива на тягу поездов до и после внедрения средств диагностирования; $L_{пр}$ – суммарный пробег локомотивов, обслуживаемых с использованием средств технического диагностирования.

Расчет затрат топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов может быть выполнен различными методами, в том числе расчетно-статистическим, расчетно-аналитическим и экспериментальным. Сами методы и рекомендации по их использованию для эксплуатационных предприятий локомотивного хозяйства подробно представлены в соответствующей литературе [3, 6, 7].

Окончательный выбор мероприятий по повышению топливной и энергетической эффективности производства осуществляется с учетом технико-экономических показателей использования топливно-энергетических ресурсов, материалов, трудовых затрат, обеспечения требуемого качества ремонта и технического обслуживания подвижного состава при безусловном соблюдении экологических норм, требований безопасности и охраны труда.

Список литературы

1. ГОСТ Р 51541-99. Энергосбережение. Энергетическая эффективность. Состав показателей. Общие положения [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 2000. – 8 с.

2. Лайкер, Д. Дао Toyota: 14 принципов менеджмента ведущей компании мира [Текст] / Д. Лайкер. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2005. – 402 с.

3. Методика проведения энергетических обследований потребляющих устройств, обеспечивающих тягу поездов и ремонтное производство на железнодорожном транспорте: Инструктивно-методические указания комплексной системы энергетического обследования [Текст] / Под общ. ред. В. Т. Черемисина / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2004. – 429 с.

4. Данилов, Н. И. Основы энергосбережения [Текст] / Н. И. Данилов, Я. М. Щелоков; под ред. Н. И. Данилова / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург, 2010. – 564 с.

5. Приоритетные задачи энергетической стратегии ОАО «РЖД» [Текст] // Локомотив. 2008. – № 8. – С. 2 – 5.

6. Мугинштейн, Л. А. Пути снижения удельных расходов топлива и электроэнергии на тягу поездов [Текст] / Л. А. Мугинштейн, В. И. Рахманинов, И. А. Ябко // Локомотив. 2001. – № 2. – С. 2 – 7.

7. Мугинштейн, Л. А. О нормировании и анализе расхода топливно-энергетических ресурсов в депо [Текст] / Л. А. Мугинштейн, А. В. Лохач // Локомотив. 2002. – №3. – С. 35 – 37.

УДК 621.332

В. В. Томилов, А. В. Беккер, В. Н. Яковлев

ОСОБЕННОСТИ УСТРОЙСТВ ТОКОСЪЕМА ЗАРУБЕЖНЫХ МОНОРЕЛЬСОВЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

В статье описаны виды монорельсовых систем, представленные крупнейшими международными проектно-конструкторскими организациями компаний Hitachi, Bombardie, Scom, Intamin, AG, Siemens, Rowin, International Kish Control Mechanic Compan (IKCM) и др., рассмотрены особенности устройств токосъема зарубежных монорельсовых транспортных систем, их расположения на монобалке, возможности их применения в российских условиях, отмечены преимущества монорельсового транспорта в городских и пригородных условиях.

Монорельсовый транспорт – вид транспорта, в котором пассажирские вагоны или грузовые вагонетки перемещаются по балке – монорельсу, установленному на опорах или на эстакаде на некотором расстоянии над землей. Существующий монорельсовый транспорт классифицируют по ряду признаков: по компоновке – навесной («Альвег») или подвесной («Сафеже») транспорт; по конструкции опорно-ходовой части подвижного состава – с колесной, пневматической, магнитной подвеской или на скользящих опорах; с электрическим приводом или с двигателем внутреннего сгорания с передачей вращения на опорные колеса; с воздушно-реактивным двигателем; с линейным электрическим приводом; с открытой или закрытой ходовой направляющей, установленной симметрично или несимметрично относительно опор [1].

Еще одним из видов классификации монорельса может быть разделение на городской и междугородный, последний относится к высокоскоростному виду транспорта, трасса которого отличается значительной протяженностью и малым количеством промежуточных станций.

Строительство монорельсовых систем за рубежом обусловлено его преимуществами по сравнению с прочими видами транспорта: провозная способность, экологичность, комфортабельность и интегрируемость в существующую городскую структуру и др. [2]. Кроме того, монорельс является актуальным видом транспорта в тех местах, где прочие виды транспорта исчерпали свои возможности за отсутствием свободной площади, особенно в мегаполисах, либо экономически не выгодны, например, многоуровневые ветки метро.

В настоящее время основными международными проектно-конструкторскими организациями монорельсовых систем являются такие фирмы, как японская Hitach, канадская Bombardier, австралийская Scomi, швейцарские Intamin и AG, немецкая Siemens, корейская Rowin, International Kish Control Mechanic Company (IKCM) и др.

Для монорельсов с колесным и электромагнитным опиранием системы токосъема с жестким токопроводом (СТЖТ) являются наиболее целесообразным способом передачи электроэнергии, что обусловило их широкое использование в эстакадных транспортных системах [3, 4].

СТЖТ применяются также для передачи электроэнергии на борт подвижного состава метрополитена, на передвижные краны и магистральные электрические железные дороги, где возникает необходимость в минимизации вертикальных габаритов контактной подвески.

Наибольшее распространение в мире получила конструктивная схема «Альвег» (рисунки 1 – 5), имеющая некоторые преимущества, в том числе по безопасности, по сравнению с «Сафеже».

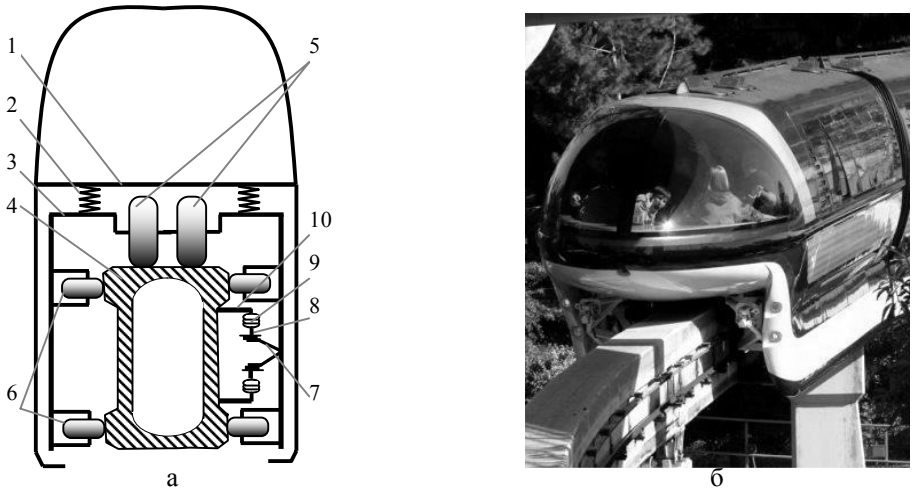


Рисунок 1 – Монорельсовая система Alveg в Диснейленде Калифорнии:
а – схема расположения; б – внешний вид

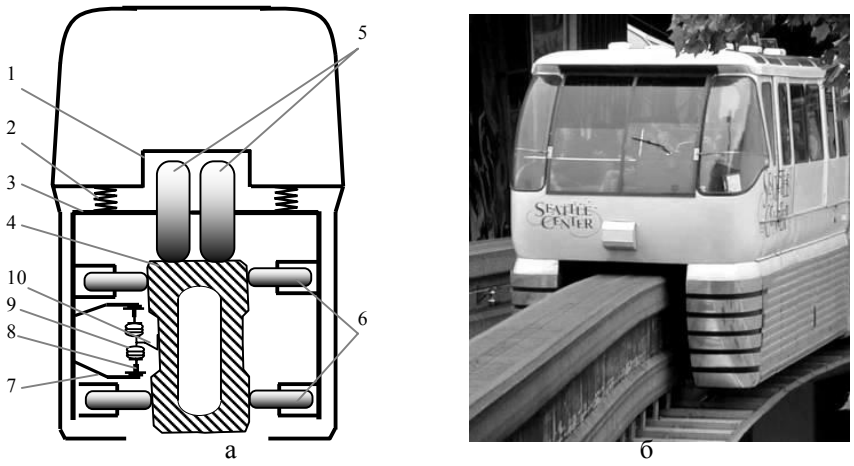


Рисунок 2 – Монорельсовая система Alveg в Сиэтле:
а – схема расположения; б – внешний вид

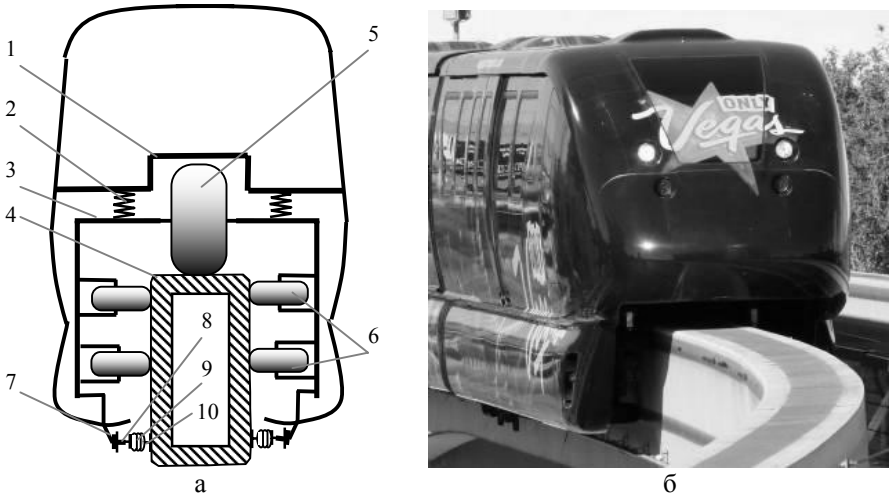


Рисунок 3 – Монорельсовая система Bombardier в Лас-Вегасе:
а – схема расположения; б – внешний вид

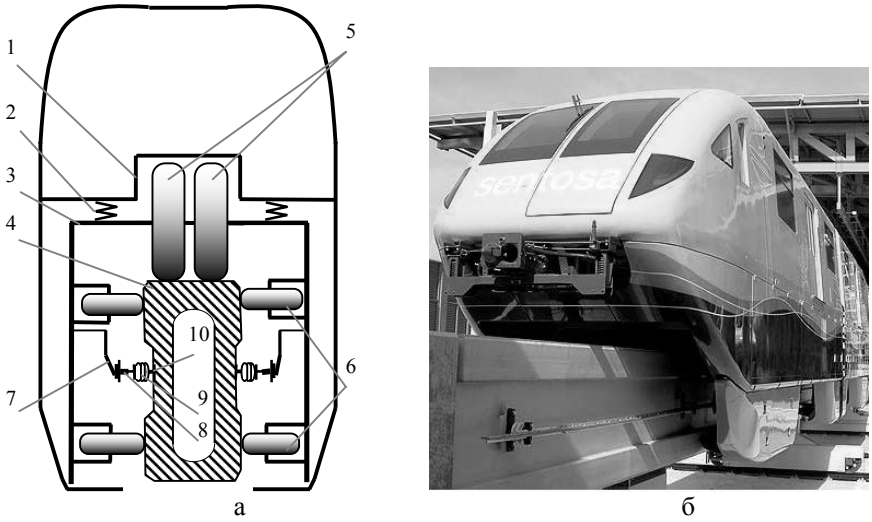


Рисунок 4 – Монорельсовая система Hitachi на острове Сентоза, Сингапур:
а – схема расположения; б – внешний вид

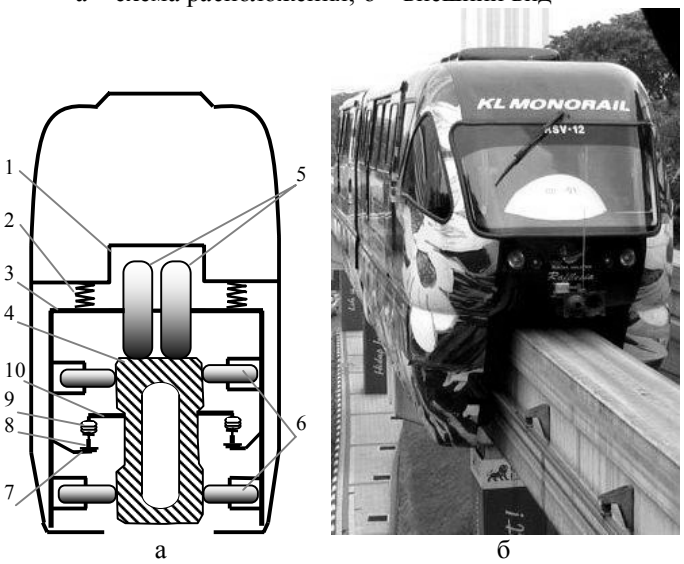


Рисунок 5 – Монорельсовая система Hitachi в Куала-Лумпуре, Малайзия:
а – схема расположения; б – внешний вид

Монорельсовая система устроена следующим образом (см. рисунки 1 – 5): кузов 1 посредством элементов подрессоривания 2 установлен на тележке 3, которая опирается на железобетонную пустотелую монобалку 4 при помощи опорных и ведущих колес 5. Направляющие колеса 6 обеспечивают горизонтальную стабилизацию экипажа относительно монобалки 4. Перемещение осуществляется от электрического двигателя, передающего вращающий момент на опорные колеса 5 [5].

В силовую цепь подвижного состава электроэнергия поступает от токоприемников 7, взаимодействующих с жесткими токопроводами 8, закрепленными через изоляторы 9 на кронштейнах 10. Более подробная информация о конструкции системы токосъема представлена ниже.

Устройство монорельсовой системы, разработанной в 1959 г. еще существовавшей компанией Alveg, в калифорнийском Диснейленде показано на рисунке 1. Система токосъема представляет собой два токопровода 8, закрепленных на двух кронштейнах 10 с изоляторами 9 и расположенных с одной стороны монобалки контактными поверхностями друг к другу.

Та же компания выполняла строительство монорельса в городских условиях Сиэтла [5]. Отличие данной системы состоит в использовании более мощной балки Alweg Large. Система электроснабжения – постоянного тока с напряжением в токопроводах 8 «+» и «–» 600 В соответственно, расположенных с одной стороны направляющей, один над другим, как показано на рисунке 2, и закрепленных на одном кронштейне 10.

Монорельсовая система Диснейленда во Флориде, разработанная компанией Bombardier, имеет систему электроснабжения постоянного тока напряжением 750 В. VVVF-двигатели (переменного тока с регулируемой частотой) запитаны через инвертор от системы из двух жестких проводов 8 с боковой контактной поверхностью, расположенных по обе стороны направляющей в нижней части под спойлерами подвижного состава [5]. Аналогичная система, показанная на рис. 3, была использована при строительстве современного монорельса Лас-Вегаса.

Монорельсовые системы в Диснейленде Токио, а также в Сингапуре на о. Сентоза (см. рисунок 4), прототипом которых является система «Альвег», разработаны фирмой Hitach. Система электроснабжения постоянного тока ± 750 В включает в себя два жестких токопровода 8, расположенных по обе стороны монобалки типа Hitachi-Small между верхними и нижними направляющими колесами.

Разработанные фирмой Hitachi монорельсы Токио-Хенеда, Инуяма (напряжение в токопроводах – 1500 В постоянного тока) в Японии, Куала-Лумпур (с 2007 г. обслуживается фирмой Scomi) в Малайзии (см. рисунок 5) имеют систему электроснабжения ± 750 В из двух токопроводов с нижней плоскостью токосъема [5].

Еще одним распространенным видом навесного монорельса является система со стальной направляющей (рисунки 6 – 8) [5].

Монорельсовые системы, представленные на рисунках 6 и 7, устроены следующим образом: кузов 1 посредством элементов подрессоривания 2 установлен на тележке 3, которая опирается на железную пустотелую монобалку 4 при помощи опорных и ведущих колес 5. Направляющие катки 6 обеспечивают горизонтальную стабилизацию экипажа относительно монобалки 4 и исключают сход состава. Контркатки 7 обеспечивают повышенное сцепление тележки с монобалкой. Перемещение осуществляется от электрического двигателя, передающего вращающий момент на опорные колеса 5.

В силовую цепь подвижного состава электроэнергия поступает от токоприемников 8, взаимодействующих с жесткими токопроводами 9 охватывающего типа, закрепленными через изоляторы 10 на кронштейнах 11.

На рисунке 6 изображены схема и внешний вид монорельсовой системы в Сиднее. Каждый вагон в составе имеет двигатель постоянного тока мощностью 37 кВт, расположенный над опорными колесами 5. Система электроснабжения представляет собой два токопровода 9 ±500 В соответственно, расположенных по обе стороны монобалки 4 с нижней контактной поверхностью.

Аналогичную конструкцию имеет монорельс в Испании – в Сарагосе (см. рисунок 7). Отличие этого монорельса заключается в наличии четырех токопроводов, а система электроснабжения является дистанционно управляемой [5].

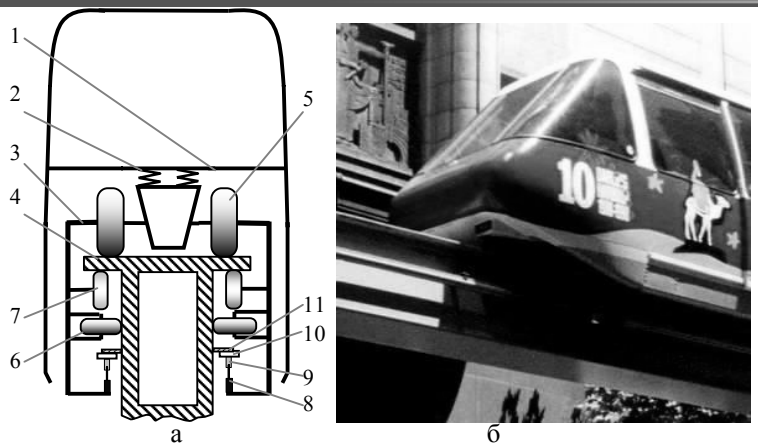


Рисунок 6 – Монорельсовая система Сиднея, Австралия:
а – схема расположения; б – внешний вид

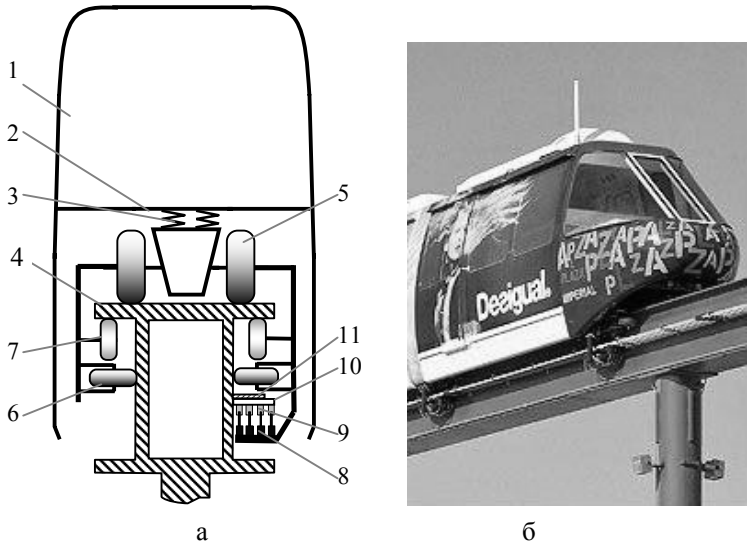


Рисунок 7 – Монорельсовая система Intamin в Сарагосе, Испания:
а – схема расположения; б – внешний вид

На рисунке 8 представлен проект монорельсовой системы Urbanaut, строительство которой с 2008 г. осуществляет корейская фирма Rowin на западном побережье Южной Кореи в городе Инчхон [5].

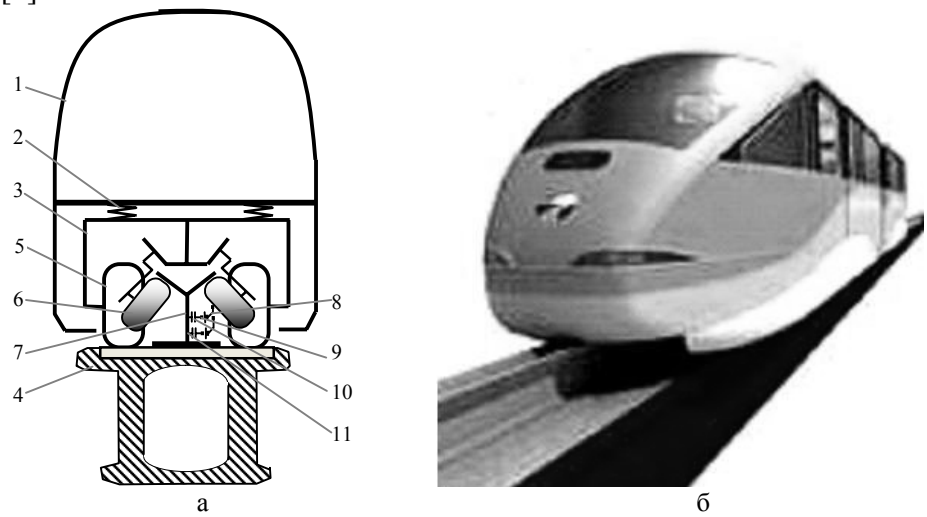


Рисунок 8 – Проект монорельсовой системы Urbanaut в Инчхоне:
а – схема расположения; б – внешний вид

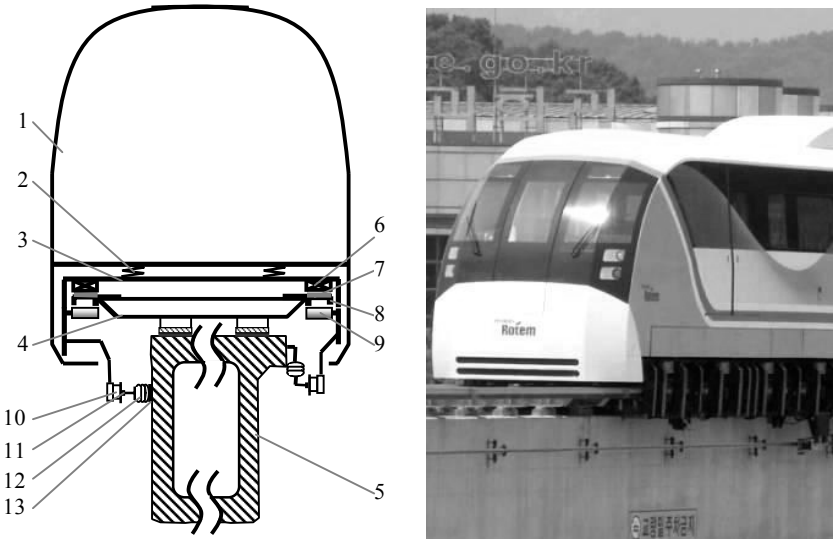
Устройство монорельса (см. рисунок 8): кузов 1 посредством элементов подрессоривания 2 установлен на тележке 3, которая опирается на железную или железобетонную пустотелую монобалку 4 при помощи опорных и ведущих колес 5. Направляющие катки 6 обеспечивают горизонтальную стабилизацию экипажа относительно Y-образного стального рельса 7, расположенного сверху монобалки 4, и исключают сход состава. Перемещение осуществляется от электрического двигателя, передающего вращающий момент на опорные колеса 5.

В силовую цепь подвижного состава электроэнергия поступает от токоприемников 8, взаимодействующих с жесткими токопроводами 9, закрепленными через изоляторы 10 на кронштейнах 11 и установленными на рельсе 7.

К следующему поколению монорельсов можно отнести системы на магнитном подвешивании Maglev. Функцию опорных и стабилизирующих колес здесь выполняет магнитное поле, что дает ряд преимуществ [6]. Движение осуществляется линейным двигателем, расположенным либо на поезде (система «короткий статор»), либо на пути («длинный статор»). В первом случае для питания статора на подвижном составе требуются токоприемники. К такой системе можно отнести японскую HSST (высокоскоростная транспортная система).

HSST устроена следующим образом (рисунок 9): кузов 1 посредством элементов подрессоривания 2 установлен на тележке 3, которая с помощью постоянных магнитов 9 притягивается к стальным рельсам 8, расположенным на поперечных балках 4, и к железобетонной эстакаде 5. Передвижение осуществляется за счет линейного двигателя, обмотки 6 которого расположены на тележке 3 и взаимодействуют с реактивной алюминиевой шиной 7, закрепленной на стальном рельсе 8.

В силовую цепь подвижного состава электроэнергия поступает от токоприемников 10, взаимодействующих с токопроводами 11, закрепленными через изоляторы 12 посредством кронштейнов 13 на эстакаде 5.



а б

Рисунок 9 – Монорельсовая система Маглев в Японии:
а – схема расположения; б – внешний вид

Анализ расположения систем токосъема показывает, что для эксплуатации существующих монорельсовых дорог достаточно двух токопроводов, что существенно снижает экономические затраты на их сооружение.

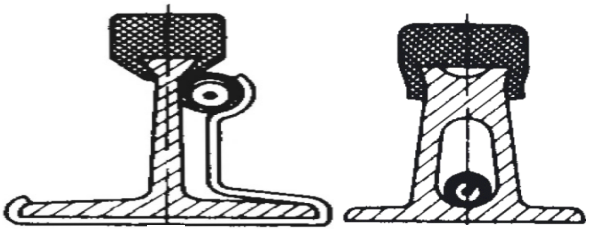
Для монорельсов с системой токосъема с плоским контактом используются жесткие токопровода, представляющие собой контактный рельс (рисунки 10, 11), и взаимодействующие с ними токоприемники. Разработкой одной из таких систем с 1912 г. занимается немецкая фирма Vahle, название которой происходит от имени ее автора – инженера Паула Вале [7].

Рисунок 10 – Система токосъема Vahle

а б

Рисунок 11 – Натурные жесткие токопровода Vahle монорельса Сиэтла: а – марка F45/200; б – F45/100

В соответствии с пропускаемым током (200 – 1500 А), условиями окружающей среды рассчитывается площадь контактного рельса, выполняемого в различных модификациях: Т-образный и Т-образный полый, нормального исполнения и вытянутый, с медным оголовником, медным со стекловолокном (в условиях повышенной влажности и коррозийности), алюминиевым (экономичные из-за малого веса и достаточной проводимости) и цельномедный (при повышенных значениях номинального тока и коррозийности среды). Кроме того, для всех токопроводов может использоваться искусственный подогрев (рисунок 12). Длина секции контактного рельса составляет 7 или 14 м. Глухой стык токопровода представлен на рисунке 13.



а б

Рисунок 12 – Расположение системы подогрева токопроводов: а – медноголового; б – медноголового со стекловолокном

Рисунок 13 – Глухой стык токопровода F45/200 со стекловолокном

Каждому типу токопроводов соответствуют свои токоприемники, которые исполняются в нескольких сериях; на рисунке 14 приведены основные – GSV (тяжелого типа) с двойным контактным элементом и DVD (легкого типа). В качестве токосъемного башмака используются угольные контактные элементы.

а б

Рисунок 14 – Токоприемники Vahle: а – GSV (тяжелого типа); б – DVD (легкого типа)

Для жестких токопроводов с системой бокового контакта китайской фирмой China Shanghai Sky&Sea Pantograph Manufacturing разработаны токоприемники SCG-100, представляющие собой асимметричные пантографы постоянного тока (1500 В, 400 А) для скоростей до 100 км/ч (рисунок 15) [8].

а б

Рисунок 15 – Токоприемники SCG-100 для системы токосъема Hitachi:
а – анодный; б – катодный

Анодный пантограф является управляемым и оснащен пневматическим цилиндром (рабочее давление – 0,35 – 0,5 МПа), устройством аварийного опускания и пружинами вторичного подрессоривания. Уменьшение износа контактных элементов достигается регулярным смазыванием рабочей поверхности токоприемника.

Анализ существующих конструкций зарубежных систем токосъема показывает, что токопровода можно использовать неизолированными, без защитных кожухов на перегонах, где доступ посторонних лиц ограничен высотой эстакады, на станциях применение изоляции должно соответствовать условиям техники безопасности из расчета расположения токоведущих элементов. Несущая часть подвески по возможности должна быть выполнена из электропроводного материала и должна участвовать в передаче электрической энергии, увеличивая общее сечение проводов. Токопровода биметаллической конструкции при эксплуатации в условиях значительного диапазона изменения температур требуют установки системы подогрева, что экономически не всегда выгодно, особенно в российских условиях. Применение плоского контакта требует использования токоприемников с шарнирной связью основания в плоскости контактного нажатия. При использовании системы токосъема с боковым контактом, так называемым side-contact, применяются токоприемники и токопровода только с плоскостным контактом.

Широкое применение монорельсового транспорта в российских условиях, на взгляд авторов статьи, тормозится как экономическими обстоятельствами, так и отсутствием соответствующих стандартов и квалифицированных кадров, что является причинами приоритета строительства метрополитена.

Однако в зарубежных странах этот давно неэкзотический вид транспорта является актуальным и востребованным. При разработке его конструкций используются новейшие технологии аэрокосмической промышленности. Необходимо отметить, что именно этот вид транспорта способен выполнять свои транспортные функции при отсутствии гравитационного поля Земли.

Список литературы

1. Сидоров, О. А. Системы контактного токосъема с жестким токопроводом [Текст] / О. А. Сидоров: Монография. – М.: Маршрут, 2005. – 106 с.

2. Сидоров, О. А. Методы исследования износа контактных пар устройств токосъема монорельсового электрического транспорта [Текст] / О. А. Сидоров, С. А. Ступаков: Монография / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2009. – 154 с.

3. Tomilov, V. Moscow monorail road [Текст] / V. Tomilov. Mobility-Sustainability-Safety // Transport science meeting with eastern European and Russian students. – Dresden, 2005. – С. 25.

4. Михеев, В. П. Совершенствование систем контактного токосъема с жестким токопроводом [Текст] / В. П. Михеев, О. А. Сидоров: Монография / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2003. – 182 с.

5. Бочаров, В. И. Основы проектирования электроподвижного состава с магнитным подвесом и линейным тяговым электроприводом [Текст] / В. И. Бочаров, Ю. А. Бахвалов, И. И. Талья / Ростовский гос. ун-т. – Ростов-на-Дону, 1992. – Ч. 2. – 296 с.

УДК 621.313

В. В. Харламов, П. К. Шкодун, А. В. Долгова

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ИЗНОСА КОЛЛЕКТОРНО-ЩЕТОЧНОГО УЗЛА ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

В статье рассмотрены особенности применения теории подобия для создания физической модели коллекторно-щеточного узла тягового электродвигателя ТЛ-2К1. Вопрос моделирования рассмотрен с позиции оценки механической и электроэрозионной составляющих процесса изнашивания для модельной электрической машины П31М. Получены численные значения параметров процесса изнашивания коллекторно-щеточного узла и масштабные соотношения, связывающие натурный объект и модель.

Тяговый электродвигатель (ТЭД) является одним из важнейших элементов электрического подвижного состава. От надежности работы ТЭД в конечном счете зависят бесперебойность и рентабельность работы железнодорожного транспорта, поэтому вопросам исследования параметров и характеристик ТЭД а также показателей его надежности посвящено значительное число работ ученых и практиков.

Одной из важных задач исследователей является создание математических моделей, позволяющих достоверно описывать процессы, происходящие в ТЭД. Анализ работы электродвигателей производят либо путем математического моделирования (выполняется численный эксперимент, например, рассчитывается распределение силовых линий магнитного поля в станине машины), либо с помощью проведения непосредственного испытания ТЭД на испытательной станции или специализированном стенде. Отметим, что математические модели имеют определенные допущения, которые могут привести к отклонению рассчитанных значений от полученных экспериментальным путем. С другой стороны, использование непосредственных испытаний позволяет оценить характеристики ТЭД, но при этом затрачивается значительная мощность и такие испытания, в том числе износовые, сложны в практическом осуществлении.

Таким образом, возникает задача создания моделей, сочетающих в себе приемлемую точность и возможность проведения натурных испытаний при минимальных затратах электроэнергии. Решить эту задачу может известная теория подобия и анализа размерностей, занимающая промежуточное положение между двумя подходами, представленными ранее, и позволяющая получить модель дорогостоящего и энергозатратного объекта в виде, приемлемом для осуществления научных экспериментов. Основной характеристикой подобных объектов являются критерии подобия, с помощью которых устанавливаются закономерности взаимнооднозначных соответствий модели и оригинала. Получить критерии подобия в случае, если уравнение процесса представляется в виде функциональной зависимости между параметрами системы и процесса, можно на основе π-теоремы [1, 2].

В качестве объекта исследования в настоящей статье рассмотрим ТЭД ТЛ-2К1, для которого оценим параметры модели с помощью теории подобия. Поскольку в электрических машинах постоянного тока происходят процессы, в основной своей части сходные по физике, выберем в качестве модели также машину постоянного тока – электродвигатель средней мощ-

ности П31М, определим критерии подобия и вычислим параметры, необходимые для обеспечения условий, наиболее близко соответствующих условиям работы коллекторно-щеточного узла ТЭД ТЛ-2К1. Отметим, что мощности ТЭД в настоящее время достигают 700 – 800 кВт, поэтому для них характерны существенные токовые, магнитные и механические нагрузки, что делает современные ТЭД по существу машинами «предельной мощности» [3].

При использовании теории подобия следует учитывать тот факт, что применительно к машинам постоянного тока часть параметров модели и объекта может являться неизменной (например, масса якоря, его диаметр), другая часть может изменяться в незначительных пределах (в том числе нажатие на щетки), а третья может изменяться в достаточно широких пределах (частота вращения, ток подпитки и др.).

Рассмотрим построение модели ТЛ-2К1 применительно к процессам изнашивания, происходящим в наиболее ответственном и наименее надежном коллекторно-щеточном узле ТЭД. Выполним раздельный анализ механического и электроэрозионного износа поверхности коллектора ТЭД, учитывая, что на данный процесс оказывают влияние множество факторов [4]. Численные значения основных параметров, характеризующих износ коллектора для рассматриваемых электрических машин, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры электродвигателей для оценки механического износа

Наименование параметра	Тип электродвигателя		Размерность
	ТЛ-2К1	П31М	
Величина удельного давления на щетку $p_{щ}$, кг/см^2	0,45	0,15	$[M]^1 \cdot [L]^{-2}$
Частота вращения якоря ω, об/мин	790	3000	$[T]^{-1}$
Диаметр коллектора *D*, мм	660	80	$[L]^1$
Твердость поверхности коллектора, *HB*	100	95	$[M]^1 \cdot [L]^{-1} \cdot [T]^{-2}$

Число участвующих в процессе параметров равно четырем. Получим критерий подобия для механического износа, для чего запишем функциональную зависимость:

$$F(p_{щ}, \omega, D, HB) = 0 . \quad (1)$$

Для данного типа износа при анализе механической системы достаточно трех первичных величин: длины, времени и массы, при этом число критериев подобия равно разности между числом участвующих в процессе параметров *n* и числом основных параметров *r* [5].

Определим критерии подобия классическим способом, основанным на π-теореме. Обозначим критерии подобия через $\pi_{мех}$ и запишем:

$$\pi_{мех} = [p_{щ}]^{z_1} \cdot [\omega]^{z_2} \cdot [D]^{z_3} \cdot [HB]^{z_4} . \quad (2)$$

В данном математическом выражении показатели степеней z_1, z_2, ... z_4 должны быть определены так, чтобы размерность π стала равной нулю. Примем в качестве первичных величин параметры $p_{щ}$, ω, D и проверим независимость выбранных основных единиц, для чего рассчитаем следующий определитель:

$$D = \begin{vmatrix} 1 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} = 1 . \quad (3)$$

Полученное значение определителя D отлично от нуля, следовательно, выбранные первичные величины действительно независимы.

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

$$\pi = \{[M]^{1} \cdot [L]^{1} \cdot [T]^{1}\}^{z_1} \cdot \{[M]^{2} \cdot [L]^{2} \cdot [T]^{2}\}^{z_2} \cdot \{[M]^{3} \cdot [L]^{3} \cdot [T]^{3}\}^{z_3} \cdot \{[M]^{4} \cdot [L]^{4} \cdot [T]^{4}\}^{z_4}. \quad (4)$$

Значения показателей степеней z_1, z_2, ... z_4 определим из решения следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} \alpha_1 \cdot z_1 + \alpha_2 \cdot z_2 + \alpha_3 \cdot z_3 + \alpha_4 \cdot z_4 = 0; \\ \beta_1 \cdot z_1 + \beta_2 \cdot z_2 + \beta_3 \cdot z_3 + \beta_4 \cdot z_4 = 0; \\ \gamma_1 \cdot z_1 + \gamma_2 \cdot z_2 + \gamma_3 \cdot z_3 + \gamma_4 \cdot z_4 = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Система имеет одно независимое решение ($n - r = 4 - 3 = 1$), которое дает возможность получить критерий подобия, используя данные, приведенные в таблице 2.

Таблица 2 – Размерности параметров, используемых при оценке механического износа

Параметр	Показатель степени		
	$[L]$	$[M]$	$[T]$
$p_{щ}$	$\alpha_1 = -2$	$\beta_1 = 1$	$\gamma_1 = 0$
ω	$\alpha_2 = 0$	$\beta_2 = 0$	$\gamma_2 = -1$
D	$\alpha_3 = 1$	$\beta_3 = 0$	$\gamma_3 = 0$
HB	$\alpha_4 = -1$	$\beta_4 = 1$	$\gamma_4 = -2$

С учетом подставленных из таблицы 2 значений система уравнений (5) примет вид:

$$\begin{cases} -2 \cdot z_1 + z_3 - z_4 = 0; \\ z_1 + z_4 = 0; \\ -z_2 - 2 \cdot z_4 = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Поскольку система имеет одно линейно независимое решение, принимаем одну величину z_i произвольно, а остальные три определяем из оставшихся уравнений системы. Для $z_1 = 1$ получаем: $z_2 = 2$; $z_3 = 1$; $z_4 = -1$.

Из полученного решения сформируем критерий подобия для оценки механического износа:

$$\pi_1 = p_{щ}^{1} \cdot \omega^2 \cdot D^1 \cdot HB^{-1} = \frac{p_{щ} \cdot \omega^2 \cdot D}{HB}. \quad (7)$$

Величины, относящиеся к натурному объекту и замещающей его модели, обозначим далее индексами «н» и «м» соответственно:

$$\frac{\pi_{1м}}{\pi_{1н}} = \frac{p_{щм} \cdot \omega_м^2 \cdot D_м \cdot HB_н}{HB_м \cdot p_{щн} \cdot \omega_н^2 \cdot D_н} = \frac{p_{щс} \cdot \omega_с^2 \cdot D_с}{HB_с}, \quad (8)$$

где $p_{щс}$, $\omega_с$, $D_с$, $HB_с$ – отношения одноименных параметров рассматриваемой системы.

Запишем индикатор подобия для полученного критерия:

$$\frac{p_{щс} \cdot \omega_с^2 \cdot D_с}{HB_с} = 1. \quad (9)$$

Для решения уравнения $p_{щс} \cdot \omega_с^2 \cdot D_с = HB_с$ из совокупности факторов, влияющих на механический износ, предварительно рассчитаем следующие соотношения: $\frac{D_м}{D_н} = \frac{80}{660}$, $\frac{D_м}{D_н} = 0{,}121$;

$\frac{\omega_м}{\omega_н} = \frac{3000}{790}$, $\frac{\omega_м}{\omega_н} = 3{,}8$; $\frac{HB_м}{HB_н} = \frac{95}{100}$, $\frac{HB_м}{HB_н} = 0{,}95$. Окончательно запишем: $p_{щс} = \frac{HB_с}{\omega_с^2 \cdot D_с}$; $p_{щс} = \frac{0{,}95}{3{,}8^2 \cdot 0{,}121}$; $\frac{p_{щм}}{p_{щн}} = 0{,}54$; $p_{щм} = 0{,}245\left(\frac{кг}{см^2}\right)$.

Получим критерии подобия для электроэрозионного износа, для чего запишем основную функциональную зависимость:

$$F(i_а, j_щ, i_п, p_щ, \upsilon_{лин}, S_щ, L_a) = 0. \quad (10)$$

Численные значения основных выбранных параметров для рассматриваемых электрических машин при оценке электроэрозионного износа коллектора представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры, используемые при оценке электроэрозионного износа

Наименование параметра	ТЛ-2К1	П31М	Размерность
Ток якоря i_a, А	466	33,2	$[I]^1$
Плотность тока в щетках $j_щ$, А/см^2	10,75	8,86	$[L]^{-2}\cdot[I]^1$
Ток подпитки $i_п$, А	70	5	$[I]^1$
Величина удельного давления на щетку $p_щ$, кг/см^2	0,5	0,245	$[M]^1\cdot[L]^{-2}$
Линейная скорость точки на коллекторе $\upsilon_{лин}$, м/с	27,3	12,56	$[L]^1\cdot[T]^{-1}$
Площадь щетки $S_щ$, мм^2	4320	375	$[L]^2$
Индуктивность обмотки якоря L_a, мГн	3,39	6,63	$[M]^1\cdot[L]^2\cdot[T]^{-2}\cdot[I]^{-2}$

Число участвующих в процессе параметров в случае исследования электроэрозионного износа равно семи. При исследовании электрической системы достаточно четырех первичных величин: тока, длины, времени и массы. Обозначив критерии подобия через $\pi_{эр}$, запишем:

$$\pi_{эр} = [i_a]^{z_1} \cdot [j_щ]^{z_2} \cdot [i_п]^{z_3} \cdot [p_щ]^{z_4} \cdot [\upsilon_{лин}]^{z_5} \cdot [S_щ]^{z_6} \cdot [L_a]^{z_7}. \quad (11)$$

Примем в качестве основных единиц параметры i_a, $p_щ$, $\upsilon_{лин}$, $S_щ$.

Проверим независимость выбранных основных единиц, рассчитав следующий определитель:

$$D = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ -2 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} = 2. \quad (12)$$

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

$$\pi = \{[M]^{\alpha_1} \cdot [L]^{\beta_1} \cdot [T]^{\gamma_1} \cdot [I]^{\delta_1}\}^{z_1} \cdot \{[M]^{\alpha_2} \cdot [L]^{\beta_2} \cdot [T]^{\gamma_2} \cdot [I]^{\delta_2}\}^{z_2} \cdot \{[M]^{\alpha_3} \cdot [L]^{\beta_3} \cdot [T]^{\gamma_3} \cdot [I]^{\delta_3}\}^{z_3} \times$$
$$\times \{[M]^{\alpha_4} \cdot [L]^{\beta_4} \cdot [T]^{\gamma_4} \cdot [I]^{\delta_4}\}^{z_4} \cdot \{[M]^{\alpha_5} \cdot [L]^{\beta_5} \cdot [T]^{\gamma_5} \cdot [I]^{\delta_5}\}^{z_5} \cdot \{[M]^{\alpha_6} \cdot [L]^{\beta_6} \cdot [T]^{\gamma_6} \cdot [I]^{\delta_6}\}^{z_6} \times \quad (13)$$
$$\times \{[M]^{\alpha_7} \cdot [L]^{\beta_7} \cdot [T]^{\gamma_7} \cdot [I]^{\delta_7}\}^{z_7}.$$

Значения показателей степени z_1, z_2, ... z_7 определим из решения следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} \alpha_1 \cdot z_1 + \alpha_2 \cdot z_2 + \alpha_3 \cdot z_3 + \alpha_4 \cdot z_4 + \alpha_5 \cdot z_5 + \alpha_6 \cdot z_6 + \alpha_7 \cdot z_7 = 0; \\ \beta_1 \cdot z_1 + \beta_2 \cdot z_2 + \beta_3 \cdot z_3 + \beta_4 \cdot z_4 + \beta_5 \cdot z_5 + \beta_6 \cdot z_6 + \beta_7 \cdot z_7 = 0; \\ \gamma_1 \cdot z_1 + \gamma_2 \cdot z_2 + \gamma_3 \cdot z_3 + \gamma_4 \cdot z_4 + \gamma_5 \cdot z_5 + \gamma_6 \cdot z_6 + \gamma_7 \cdot z_7 = 0; \\ \delta_1 \cdot z_1 + \delta_2 \cdot z_2 + \delta_3 \cdot z_3 + \delta_4 \cdot z_4 + \delta_5 \cdot z_5 + \delta_6 \cdot z_6 + \delta_7 \cdot z_7 = 0. \end{cases} \quad (14)$$

Система имеет три независимых решения ($n - r = 7 - 4 = 3$), каждое из которых позволит сформировать один критерий подобия, используя данные, приведенные в таблице 4.

Таблица 4 – Размерности параметров, используемых при оценке электроэрозионного износа

Параметр	Показатель степени			
	$[L]$	$[M]$	$[T]$	$[I]$
i_a	$\alpha_1 = 0$	$\beta_1 = 0$	$\gamma_1 = 0$	$\delta_1 = 1$
$j_{щ}$	$\alpha_2 = -2$	$\beta_2 = 0$	$\gamma_2 = 0$	$\delta_2 = 1$
$i_{п}$	$\alpha_3 = 0$	$\beta_3 = 0$	$\gamma_3 = 0$	$\delta_3 = 1$
$p_{щ}$	$\alpha_4 = -2$	$\beta_4 = 1$	$\gamma_4 = 0$	$\delta_4 = 0$
$\upsilon_{лин}$	$\alpha_5 = 1$	$\beta_5 = 0$	$\gamma_5 = -1$	$\delta_5 = 0$
$S_{щ}$	$\alpha_6 = 2$	$\beta_6 = 0$	$\gamma_6 = 0$	$\delta_6 = 0$
L_a	$\alpha_7 = 2$	$\beta_7 = 1$	$\gamma_7 = -2$	$\delta_7 = -2$

Тогда система уравнений примет вид:

$$\begin{cases} -2 \cdot z_2 - 2 \cdot z_4 + z_5 + 2 \cdot z_6 + 2 \cdot z_7 = 0; \\ z_4 + z_7 = 0; \\ -z_5 - 2 \cdot z_7 = 0; \\ z_1 + z_2 + z_3 - 2 \cdot z_7 = 0. \end{cases} \quad (15)$$

Полученная система (15) имеет три линейно независимых решения. Таким образом, принимаем три величины z_i произвольно, а остальные четыре определяем из уравнений системы. Для $z_1 = 1$, $z_4 = 0$, $z_6 = 0$ получим: $z_2 = 0$, $z_3 = -1$, $z_5 = 0$, $z_7 = 0$; для $z_1 = 0$, $z_4 = 1$, $z_6 = 0$ $z_2 = -1$, $z_3 = -1$, $z_5 = 2$, $z_7 = -1$; для $z_1 = 0$, $z_4 = 0$, $z_6 = 1$ – $z_2 = 1$, $z_3 = -1$, $z_5 = 0$, $z_7 = 0$. На основании приведенных результатов получаем критерии подобия:

$$\pi_{эр1} = i_a \cdot i_{п}^{-1} = \frac{i_a}{i_{п}}; \quad (16)$$

$$\pi_{эр2} = p_{щ} \cdot \upsilon_{лин}^2 \cdot j_{щ}^{-1} \cdot i_{п}^{-1} \cdot L_a^{-1} = \frac{p_{щ} \cdot \upsilon_{лин}^2}{L_a \cdot i_{п} \cdot j_{щ}}; \quad (17)$$

$$\pi_{эр3} = j_{щ} \cdot i_{п}^{-1} \cdot S_{щ} = \frac{j_{щ} \cdot S_{щ}}{i_{п}}. \quad (18)$$

Запишем следующие соотношения:

$$\frac{\pi_{эр1м}}{\pi_{эр1н}} = \frac{i_{ам} \cdot i_{пн}}{i_{пм} \cdot i_{ан}} = \frac{i_{ас}}{i_{пс}}, \quad (19)$$

$$\frac{\pi_{эр2м}}{\pi_{эр2н}} = \frac{p_{щм} \cdot \upsilon_{линм}^2 \cdot L_{н} \cdot i_{пн} \cdot j_{щн}}{L_{м} \cdot i_{пм} \cdot j_{щм} \cdot p_{щн} \cdot \upsilon_{линн}^2} = \frac{p_{щс} \cdot \upsilon_{линс}^2}{L_{с} \cdot i_{пс} \cdot j_{щс}}; \quad (20)$$

$$\frac{\pi_{эр3м}}{\pi_{эр3н}} = \frac{j_{щм} \cdot S_{щм} \cdot i_{пн}}{i_{пм} \cdot j_{щн} \cdot S_{щн}} = \frac{j_{щс} \cdot S_{щс}}{i_{пс}}. \quad (21)$$

Запишем индикаторы подобия для полученных критериев: $\frac{i_{ас}}{i_{пс}} = 1$; $\frac{p_{щс} \cdot \upsilon^2_{линс}}{L_с \cdot i_{пс} \cdot j_{щс}} = 1$; $\frac{j_{щс} \cdot S_{щс}}{i_{пс}} = 1$.

Из масштабов подобия составим систему уравнений:

$$\begin{cases} i_{ас} = i_{пс}; \\ p_{щс} \cdot \upsilon^2_{линс} = L_с \cdot i_{пс} \cdot j_{щс}, \\ i_{пс} = j_{щс} \cdot S_{щс}. \end{cases} \quad (22)$$

Из совокупности факторов, влияющих на электроэрозионный износ, предварительно рассчитаем следующие соотношения: $\frac{\upsilon_{линм}}{\upsilon_{линн}} = \frac{12,56}{27,3}$; $\frac{\upsilon_{линм}}{\upsilon_{линн}} = 0,46$; $\frac{j_{щм}}{j_{щн}} = \frac{8,86}{10,79}$; $\frac{j_{щм}}{j_{щн}} = 0,821$; $\frac{L_м}{L_н} = \frac{6,68 \cdot 10^{-3}}{3,39 \cdot 10^{-3}}$; $\frac{L_м}{L_н} = 1,97$. Решим полученную систему (22): $p_{щс} \cdot \upsilon^2_{линс} = L_с \cdot S_{щс} \cdot j^2_{щс}$; $S_{щс} = \frac{p_{щс} \cdot \upsilon^2_{линс}}{L_с \cdot j^2_{щс}}$; $S_{щс} = \frac{0,54 \cdot 0,46^2}{1,97 \cdot 0,82^2}$; $\frac{S_{щм}}{S_{щн}} = 0,086$; $S_{щм} = 372,65\,мм^2$. Из третьего уравнения системы (22) получим: $i_{пс} = j_{щс} \cdot S_{щс}$, $i_{пс} = 0,821 \cdot 0,086$, $\frac{i_{пм}}{i_{пн}} = 0,07$; из первого уравнения определим ток якоря модели: $i_{ас} = i_{пс}$; $\frac{i_{ам}}{i_{ан}} = 0,068$; $i_{ам} = 32,9\,А$.

Таким образом, процессы механического и электроэрозионного изнашивания, происходящие в ТЭД ТЛ-2К1 и в модельной машине П31М, могут быть описаны аналогичными параметрами, численные значения которых в модельной машине должны быть пересчитаны с учетом масштабов подобия. Полученные значения масштабов подобия позволят проводить экспериментальные исследования электроэрозионного и механического износа на модельной машине, а результаты могут быть распространены на двигатель ТЛ-2К1.

Список литературы

1. Веников, В. А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики) [Текст] / В. А. Веников– М.: Высшая школа, 1976. – 479 с.

2. Кутателадзе, С. С. Анализ подобия и физические модели [Текст] / С. С. Кутателадзе. – Новосибирск: Наука, 1986. – 296 с.

3. Курбасов, А. С. Проектирование тяговых электродвигателей [Текст] / А. С. Курбасов, В. И. Седов, Л. Н. Сорин. – М.: Транспорт, 1987. – 535 с.

4. Хольм, Р. Электрические контакты [Текст] / Р. Хольм. – М.: Иностранная литература, 1961. – 464 с.

5. Дридзо, М. Л. Конструирование и расчет моделей узла токосъема электрических машин и аппаратов [Текст] / М. Л. Дридзо. – М.: Информэлектро, 1977. – 60 с.

УДК 629.488

С. Г. Шантаренко, М. Ф. Капустьян

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ АУДИТ КАК ИНСТРУМЕНТ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ЛОКОМОТИВОВ

В ходе технологического аудита проанализировано техническое состояние электровозного парка. Определены основные причины снижения надежности электровозов, такие как несовершенство нормативно-технической документации, нарушения технологии ремонта, низкий уровень механизации технологических процессов, отсутствие входного и выходного контроля узлов и деталей, недостаточная квалификация исполнителей и руководителей среднего и высшего звена. Определены меры по предотвращению негативных факторов, влияющих на качество ремонта и эксплуатационную надежность электровозов.

Одной из важнейших проблем железнодорожного транспорта является обеспечение надежной работы локомотивного парка. И эта проблема обостряется с ростом скоростей движения и увеличением весовых норм поездов, по мере усложнения конструкций локомотивов, автоматизации процессов преобразования энергии, управления, регулирования с помощью современных электрических и электронных систем, повышения интенсивности режимов их использования.

Показателями надежности восстанавливаемых систем являются функция готовности, коэффициент готовности, наработка на отказ. Наработка на отказ зависит от показателей надежности, таких как интенсивность отказов элементов и сложность системы. Среднее время восстановления зависит от интенсивности восстановления элементов, числа обслуживающих бригад и дисциплины обслуживания.

Отсюда очевидно, что для повышения готовности системы необходимо повышать ее ремонтопригодность и выбирать рациональную дисциплину обслуживания (число ремонтных позиций, приоритетность обслуживания и т. п.).

Отметим, что повысить надежность локомотивов в процессе эксплуатации нельзя. Ее можно только обеспечивать и поддерживать на заданном уровне. Для этого необходимо проводить профилактику, контроль состояния, восстановление и ремонт. Таким образом, обеспечение эксплуатационной надежности локомотивов является комплексной проблемой и состоит из следующих основных задач: совершенствование систем ремонта и технического обслуживания и обеспечение рациональных режимов в эксплуатации.

С целью исследования современного состояния ремонта локомотивов был проведен технологический аудит трех ремонтных локомотивных депо: Боготол-Сибирский Красноярской, Нижнеудинское и Иркутское Восточно-Сибирской железных дорог.

Понятие «технологический аудит» включает в себя экспертную оценку действующих (действующего производства или его отдельных подразделений) или проектируемых (от уровня операционной технологии обработки детали до уровня проектируемых производств) технологических решений и разработку рекомендаций по комплексу организационно-технических мероприятий, необходимых для повышения конкурентоспособности рассматриваемых технологических решений (производств) [1].

На основе данных аудита выполнен анализ факторов, определяющих уровень технического состояния электровозов и их эксплуатационную надежность по лимитирующим узлам, таким как подшипники качения и моторно-осевые подшипники, автосцепки, токоприемники, детали тележки, а также по колесным парам и тяговым электродвигателям (при выполнении текущих ремонтов ТР-1 и ТР-2).

В ходе технологического аудита было обнаружено, что в обследуемых локомотивных депо отсутствует единая система сбора и обработки информации о надежности вышедших из ремонта электровозов. Без таких данных практически невозможно вывести систему ремонта на заданные показатели надежности.

Сбор статистических данных об отказах электровозов трудно автоматизировать, поэтому в настоящее время эти данные собираются вручную сотрудниками техотделов. В результате получение из эксплуатации необходимых и достоверных статистических данных о надежности и работоспособности техники превращается в довольно сложную задачу. Кроме того, статистические данные о техническом состоянии часто не отражают причин отказов, а поэтому не могут быть обработаны для получения количественных и качественных характеристик.

Система сбора данных об отказах должна удовлетворять следующим требованиям:

статистические данные, получаемые из эксплуатации, должны позволять подтвердить характеристики надежности системы, полученные в процессе проектирования;

статистические данные должны позволять получить показатели надежности не только системы, но и ее элементов;

методика сбора данных должна быть предельно простой, не требующей больших усилий работника.

В настоящее время в ОАО «РЖД» ведется работа по созданию электронных паспортов локомотивов, по которым можно будет проследить весь жизненный цикл локомотива.

В результате аудита установлено, что при выполнении ремонтных работ довольно часто не соблюдается технология, приведенная в технологической документации. Это связано, на наш взгляд, с тем, что в депо отсутствует четкая организация труда (маршрутная технология). При постановке в ремонт каждого локомотива принимается индивидуальное решение о последовательности и наборе технологических операций при проведении ТР-1 или ТР-2. Возникающая при этом вариативность приводит к тому, что нет четкого закрепления технологического оборудования и оснастки за конкретными рабочими местами. Как следствие, довольно сложно добиться порядка на рабочих местах и, соответственно, высокого качества выполняемых работ.

При таком положении логичным было бы внедрение в производство современных методов менеджмента качества и «бережливого производства» с учетом особенностей локомотиворемонтного производства ОАО «РЖД». В этом случае снизится вероятность нарушения технологии вследствие определенности стандартизованных процедур ремонта и контроля.

В перечисленных выше ремонтных локомотивных депо отсутствует визуальный контроль за ходом выполнения технологического процесса ремонта электровоза. Единственным методом контроля на сегодняшний день являются надписи мелом на кузове о неисправностях, обнаруженных в ходе осмотра. Эти надписи вполне могут быть стерты слесарями без выполнения мероприятий по устранению замечаний. В результате нет возможности оценить очередность и качество выполнения технологических операций и соответствие их содержания нормам, установленным в технологической документации и руководстве по ремонту.

При ремонте тяговых электродвигателей присутствуют все те же недостатки: нехватка оборудования и инструмента для выполнения технологических операций, плохая освещенность рабочих мест, низкая культура производства.

Отчетность ремонтного персонала о ходе и объемах выполненных работ сводится в журнал формы ТУ-28, который не имеет надежной прозрачности, так как в нем приведен лишь перечень необходимых работ. Например, по механическому оборудованию: осмотр и ремонт рессорного подвешивания, осмотр и ремонт тормозной рычажной передачи, осмотр и ремонт песочного оборудования; по вспомогательным машинам: осмотр и ремонт вспомогательных машин; по электроаппаратуре: осмотр и ремонт крышевого оборудования, осмотр и ремонт токоприемников и т. д. Отсутствует информация о том, что конкретно было отремонтировано в каждом узле или сборочной единице. Поэтому сведений, приведенных в ТУ-28, не достаточно, чтобы оценить объем ремонта и произвести контроль выполненных операций.

В целом можно сказать, что цикл операций, предусмотренных правилами ремонта и содержания подвижного состава по восстановлению работоспособности его оборудования, в основном оправдывает себя там, где достаточно органолептического контроля с применением известного контрольного инструмента. В большей степени это относится к оборудованию механической части электровозов.

Для электрического оборудования качество осмотра и проверок во многом зависит от квалификации специалиста и его субъективной оценки. В то же время для прогнозирования и обнаружения таких повреждений, как межвитковые замыкания в обмотках магнитоэлектрических механизмов, нарушения регулировок электроаппаратуры, недопустимы высокие переходные сопротивления в блокировках и контактах и др., требуется качественная и количественная оценка проверяемого объекта.

Наибольшее количество повреждений приходится на долю электрической аппаратуры. Загрузка электрического оборудования определяется как его функциональными связями, так и условиями эксплуатации локомотива в целом. Поэтому при установлении сроков контрольных и ремонтных операций, а также их объема необходимо учитывать особенности конструкции локомотивов по сериям и условия их работы.

Анализ отказов электроаппаратуры в ремонтном локомотивном депо Нижнеудинское (рисунок 1) показал, что большинство неисправностей приходится на аппараты защиты, цепи управления и выпрямительные преобразователи.

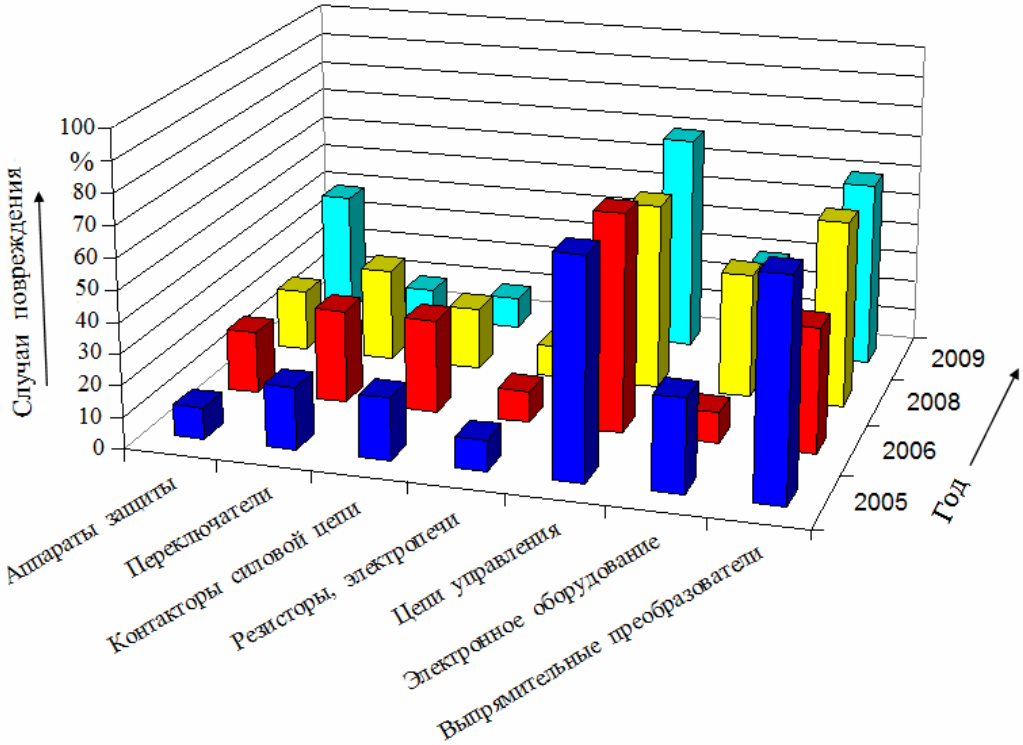


Рисунок 1 – Диаграмма повреждений электроаппаратуры на 1 млн км пробега за 2005 – 2009 гг. по ТЧР Нижнеудинское

Распределение случаев повреждения по видам аппаратов защиты и цепей управления приведено на рисунках 2 и 3 соответственно.

Как показывает практика, при выполнении текущего ремонта ТР-3 износ узлов и деталей таких сборочных единиц, как реле, незначителен (например: износ якоря в месте соприкосновения с ярмом – 0,1…0,2 мм; износ планки в месте соприкосновения со штоком блокировки – 0,7… 1,0 мм и т. п.).

Аналогичные результаты получены и по электрическим аппаратам других типов. Следовательно, возможно увеличение межремонтного пробега по некоторым аппаратам после соответствующих научных исследований.

Это приведет к снижению трудоемкости текущих ремонтов ТР-1, ТР-2, что позволит уделить более пристальное внимание лимитирующим узам, таким как быстродействующие выключатели, главные выключатели, токоприемники. Однако такого рода нововведения должны сопровождаться внедрением средств текущего контроля состояния аппаратов, таких, например, как тепловизионное диагностирование.

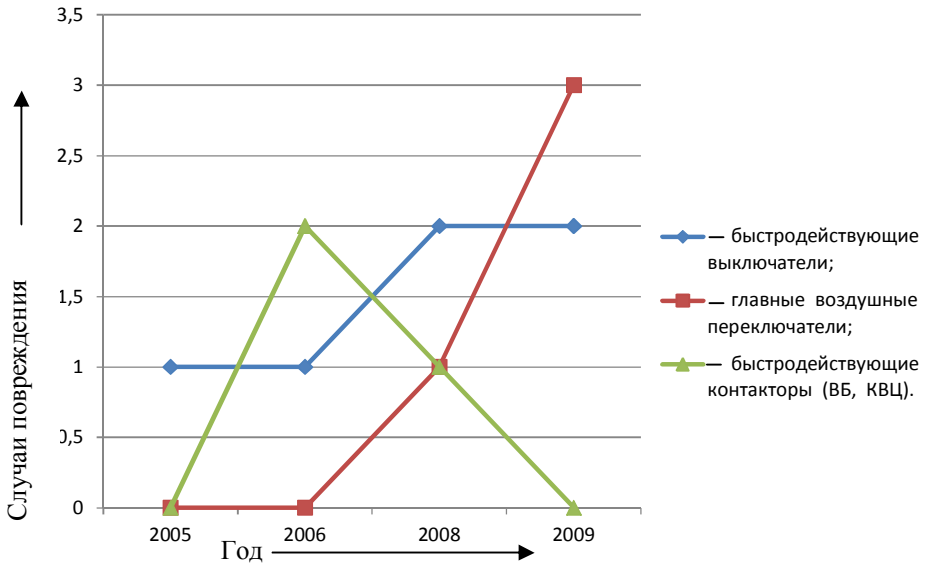


Рисунок 2 – Графики повреждения аппаратов защиты по ТЧР Нижнеудинское

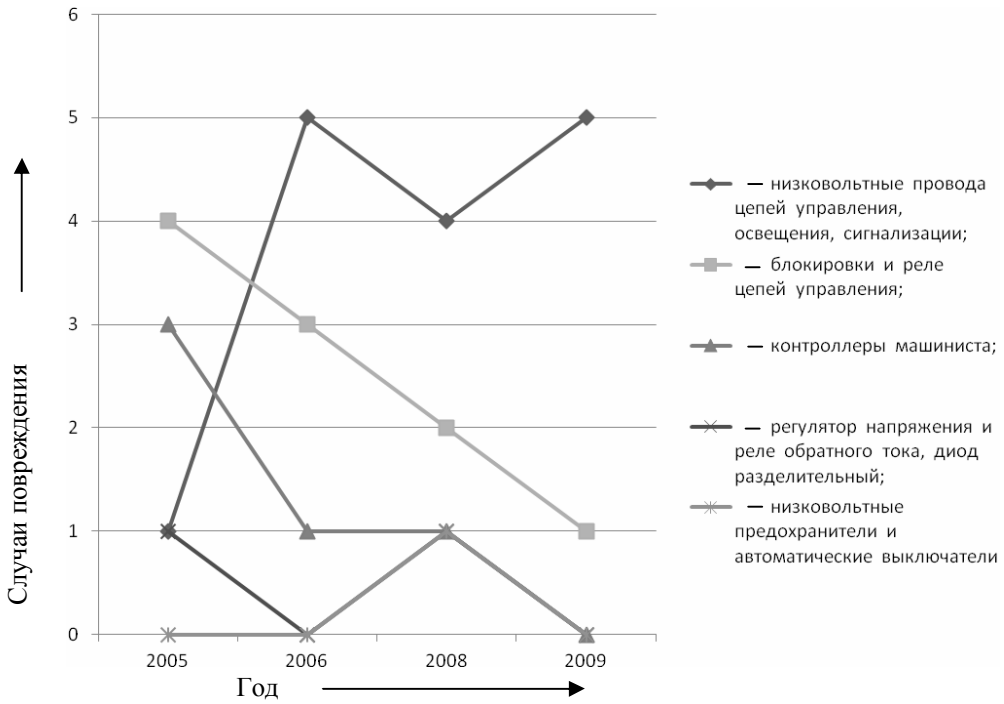


Рисунок 3 – Графики повреждения цепей управления по ТЧР Нижнеудинское

Использование современных диагностических средств совместно с применением методов пооперационного контроля позволит сократить количество отказов по электрической аппаратуре.

Другим важным показателем, влияющим на качество ремонта, является наличие полного комплекта технологической документации, что наряду со средствами технологического оснащения определяет технологическую готовность ремонтного производства.

Что касается технической документации, имеющейся в депо, то часто технологические карты выполнены не по ГОСТу и не содержат информацию о нормах времени и режимах выполнения операций. Размыта информация о том, каким инструментом выполняется каждая операция (переход), а в некоторых случаях технологические карты практически полностью повторяют текст технологических инструкций по ремонту узлов и агрегатов тягового подвижного состава.

Кроме того, карты технологического процесса не отражают действительной ситуации на производстве, а ориентированы на действующие руководства и инструкции. Даже в тех случаях, когда есть попытки внести реальную информацию, возникают неточности, которые не выявляются годами. Внесение актуальной информации затруднительно из-за отсутствия систем автоматизированного проектирования технологических процессов.

Тем не менее работы по совершенствованию технологической документации должны быть продолжены несмотря на перечисленные выше недостатки. Причем внедрение системы, при которой все технологические операции документированы, должно проводиться по инициативе сверху, поскольку этот процесс требует изменения сложившегося порядка ведения дел, стереотипов поведения сотрудников предприятия. Для полноценного использования технологической документации в системе качества необходимы сбор и мониторинг большего количества информации, требуется строгая дисциплинированность сотрудников.

При этом не надо идеализировать процесс внедрения технологической документации, которая не дает исчерпывающей информации о выполняемой работе (для этого есть производственный инструктаж). То, что технологическая карта находится непосредственно на рабочем месте, не значит, что слесарь или оператор будет сверять свои действия по ней (она находится там для специалистов, следящих за соблюдением стандарта качества). Основная цель документирования операции – устранение вариативности выполнения технологического процесса.

В ходе аудита был проведен анализ технологической оснащенности депо согласно регламенту, так как это является одним из важнейших показателей технологической готовности производства. Из приведенной на рисунке 4 диаграммы следует, что 57,6 % оборудования по регламенту при выполнении ТР-1 отнесено к электроаппаратуре и устройствам безопасности, тогда как на сегодняшний день лимитирующими узлами наряду с электроаппаратурой являются тяговые двигатели, колесные пары, моторно-осевые подшипники и механическое оборудование.

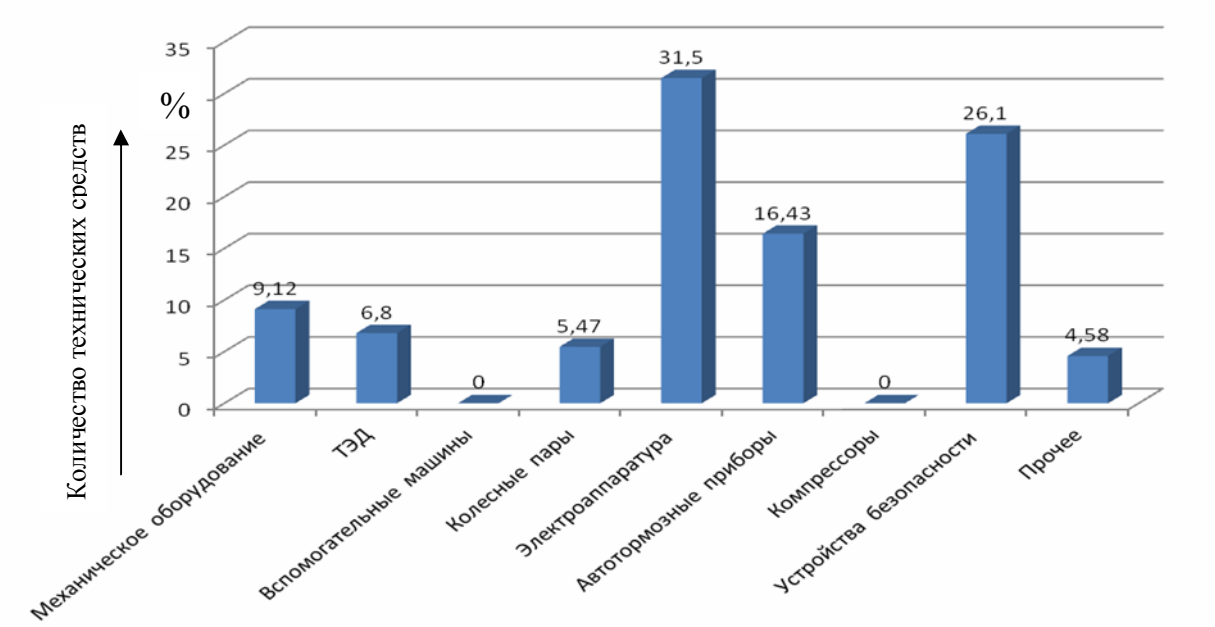


Рисунок 4 – Диаграмма распределения технических средств ремонта и средств диагностирования согласно регламенту по основным группам оборудования локомотива на ТР-1

Анализ диаграмм распределения технологического оборудования согласно регламенту при проведении ТР-1 электровоза в целом и ТР-1 электроаппаратуры, приведенных на рисунках 5 и 6, позволяет сделать вывод о том, что более 67 % оборудования запланировано для проведения контрольных операций и диагностирования и лишь не более 33 % оборудования предназначено непосредственно для выполнения ремонтых работ. В эти 33 %, которые отнесены к выполнению ремонтных работ, входит оборудование для выполнения маневровых и подъемно-транспортных операций, для очистки, для заправки смазочными

материалами, сушки песка, т. е. для выполнения подготовительных операций, и только незначительная часть – не более 8 % – оборудования предназначена для выполнения основных технологических операций, таких как разборка и сборка кранов машиниста, притирка золотников кранов машиниста, разборка и сборка концевых кранов и др. При этом 2 % из 33 % оборудования, приведенного в регламенте, в депо в наличии нет.

Рисунок 5 – Диаграмма распределения технологического оборудования согласно регламенту при проведении ТР-1 электровоза

Рисунок 6 – Диаграмма распределения технологического оборудования согласно регламенту при проведении ТР-1 электроаппаратуры

Оборудование для выполнения основных операций при проведении ТР-1 электровозов серии ВЛ-80р, таких как восстановление изношенных фасок коллекторных пластин, очистка межламельных промежутков от угольной пыли, устранение следов переброса электрической дуги, установка и снятие кожухов зубчатых передач и др., не регламентировано, и перечисленные операции выполняются вручную.

Для качественного выполнения работ необходимо пересмотреть регламенты технологического оснащения в сторону увеличения числа ремонтных позиций, современного диагностического оборудования, слесарного инструмента, средств малой механизации.

Таким образом, на основании проведенных обследований можно сделать вывод о том, что существующее положение дел в локомотиворемонтном производстве требует значительных изменений как в организационном плане, так и в пересмотре подходов при подборе технологического оборудования. В этом в значительной степени может помочь независимый технологический аудит, который не только укажет на существующие недостатки, но и определит пути повышения качества ремонта за счет инновационных подходов трансфера современных технологий.

---

1. Пильнов, Г. Как проводить технологический аудит [Текст] / Г. Пильнов, О. Тарасова, А. Яновский. – М.: Проект EuropeAid «Наука и коммерциализация технологий», 2006. – 96 с.

УДК 629.4.027.432

В. В. Шилер, П. А. Шипилов, А. В. Шилер

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ С ГИБКИМИ НЕЗАВИСИМО ВРАЩАЮЩИМИСЯ БАНДАЖАМИ

Предложено новое техническое решение конструкции колесной пары. С использованием теории «π»-подобия изготовлены макетные образцы трех вариантов колесных пар и верхнего строения пути. Выполнены сравнительные исследования динамики движения колесных пар и представлены их результаты.

На основании накопленного многообразия конструктивных решений колесных пар и опыта их эксплуатации, а также с учетом современных требований к технико-экономическим параметрам подвижного состава разработана компоновочная схема новой конструкции колесной пары, представленная на рисунке 1 [1]. Эта конструкция состоит из двух независимо вращающих дисков 3 и 5. Диск 3 жестко насажен на ось 8, которая имеет возможность вращаться в буксовых подшипниках 9. Диск 3 по периметру имеет форму гребня бандажа и воспринимает горизонтальные направляющие силы от боковой поверхности рельсов. Диск 5 посредством пары подшипников 13 установлен на оси колесной пары 8 и передает вертикальную нагрузку веса подвижного состава на бандаж 1, который катится по поверхности катания рельса.

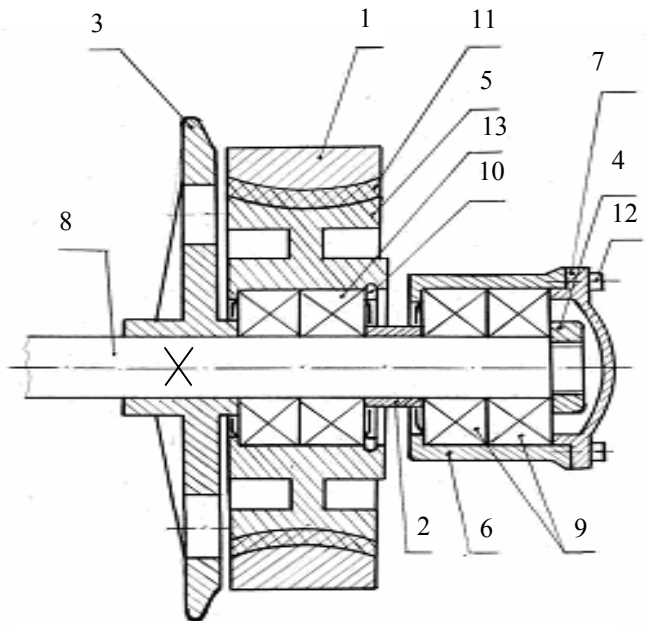


Рисунок 1 – Новая конструкция колеса колесной пары железнодорожного транспортного средства

Пространство между диском 5 и бандажом 1 заполнено упругим материалом 11, в частности резиной. Таким образом, в новой конструкции реализовано независимое вращение поверхностей катания колес, которые в процессе движения контактируют с поверхностями головок рельсовых нитей. За счет резиновой прокладки гибкий бандаж подрессорен относительно колесного центра, что обеспечивает упругое гашение колебаний, вызванное наличием неровностей на поверхностях катания колес и рельсов.

Значительные трудности проведения экспериментальных исследований динамики новой конструкции колесной пары в эксплуатационных условиях не позволяют получить исчерпывающей информации и установить влияние отдельных факторов на ее работу. Поэтому в данной ситуации метод моделирования является эффективным средством экспериментального исследования динамических свойств движения колесной пары новой конструкции. Основанием применения модели для изучения работы экипажа является теория подобия механических систем, которая составляет содержание фундаментальной теоремы, так называемой «π-теоремы» анализа размерностей в ее классическом варианте [2, 3]. Для того чтобы системы (оригинал и модель) были механически подобны, необходимо, чтобы они были подобны геометрически, материально и кинематически. Рассмотрим каждое из этих условий отдельно.

Геометрическое подобие. Две системы точек A_i и A_m или два геометрических тела будут геометрически подобными тогда, когда между соответствующими точками этих двух систем можно установить, что соответствующие их отрезки находятся в постоянном отношении, т. е.

$$A_i/A_k = \lambda = \text{const}, \quad (1)$$

где i, k = 1, 2,…,n.

Из определения геометрического подобия вытекает, что углы между соответствующими отрезками равны между собой. Кроме того, фигуры, составленные из соответствующих точек первой и второй систем, будут геометрически подобны.

Материальное подобие. Если массы m_i и m_m точек A_i и A_m двух геометрически подобных систем находятся в постоянном отношении, т. е. если

$$m_i/m_m = \mu = \text{const}, \quad (2)$$

то такие системы материальных частиц называются материально подобными. Для соблюдения материального подобия необходимо прежде всего наличие геометрического подобия и, кроме того, определенное соотношение масс, т. е. требуется выполнение условий, выраженных уравнениями (1), (2).

Кинематическое подобие. Геометрическое подобие механических систем, установленное для соответствующих моментов времени t_i и t_2, не может служить основанием кинематического подобия этих систем, так как две геометрически подобные системы могут двигаться относительно некоторой системы отсчета совершенно произвольными траекториями, скоростями и ускорениями соответствующих тел. Поэтому от одного и того же начального момента устанавливается непрерывная последовательность соответствующих моментов времени t_i и t_2, для которых системы S_i и S_2 будут геометрически подобны, с постоянным, не зависящим от времени отношением подобия (λ). При этом моменты времени t_i и t_2 связаны между собой соотношением:

$$t_1 / t_2 = \tau. \quad (3)$$

При τ = const движущие системы S_i и S_2 будут кинематически подобны, а системы векторов скоростей и ускорений для различных моментов времени представляют собой геометрически подобные фигуры.

Механическое подобие. Механическое подобие двух систем есть совокупность кинематического и материального подобия. Из кинематического подобия следует: $w_1 = \lambda \cdot \tau^{-2} \cdot w_2$, из материального подобия: $m_1 = \mu \cdot m_2$, где m_1 и m_2 – масса первой и второй систем. В механически подобных системах в соответствующие моменты времени соответственные длины, модули скоростей, ускорений и сил находятся в постоянных отношениях, равных λ, $\lambda \cdot \tau^{-1}$; $\lambda \cdot \tau^{-2}$ и $\lambda \cdot \tau^{-2} \mu$, соответственно, а векторы сил и ускорений одинаково ориентированы.

Свойства механически подобных систем, которые определяет теорема Ньютона, получим исходя из соображений размерности механических величин. Так, для получения уравнений движения второй системы, которая в λ раз меньше по размерам, время, в течение которого система переходит из одного положения в другое, – в τ раз, массы элементов системы – в μ раз меньше и силы, действующие на точки системы, – в φ раз меньше, т. е. сделаны следующие преобразования: $x_{\text{КП}1} = \lambda \cdot x_{\text{КП}2}$; $Q_{\text{КП}1} = \varphi \cdot Q_{X2}$; $m_{\text{КП}1} = \mu \cdot m_{\text{КП}2}$; $\ddot{x}_{\text{КП}1} = \lambda \cdot \tau^{-2} \cdot \ddot{x}_{\text{КП}2}$; $y_{\text{КП}1} = \lambda \cdot y_{\text{КП}2}$; $Q_{Y1} = \varphi \cdot Q_{Y2}$; $t_1 = \tau \cdot t_2$; $\ddot{y}_{\text{КП}1} = \lambda \cdot \tau^{-2} \cdot \ddot{y}_{\text{КП}2}$; $z_{\text{КП}1} = \lambda \cdot z_{\text{КП}2}$; $Q_{Z1} = \varphi \cdot Q_{Z2}$; $\ddot{z}_{\text{КП}1} = \lambda \cdot \tau^{-2} \cdot \ddot{z}_{\text{КП}2}$.

Напряжения, деформации и контактные напряжения, представляющие напряженное состояние второй системы (уменьшенной модели колесной пары), в рамках модельных испытаний не исследовались.

Модели верхнего строения пути и тележек выполнены в масштабе геометрического подобия λ = 20. Как показывает отечественный и зарубежный опыт исследований методом моделирования, модели, выполненные в масштабе λ = 20, позволяют исследовать основные физические явления, происходящие в создаваемой системе [2].

На основании формулы размерности основные соотношения между соответствующими величинами оригинала и модели для наглядности сведены в таблицу 1. С использованием соотношений таблицы 1 получены значения геометрических и весовых параметров модели тележки и верхнего строения пути для соответствующих значений оригинала.

Соотношения подобия между соответствующими величинами оригинала и модели

Наименование величины	Обозначение величины	Переходный коэффициент	Значение переходных коэффициентов	Значение параметров оригинала	Значение параметров модели
Габаритные, линейные размеры, мм:					
Колесная пара:					
диаметр колеса, мм				1250	62,5
толщина колеса, мм				140	7
ширина колесной колеи, мм				1506	75,3
Тележка:	l, $2s$, 2δ	λ	20		
длина, мм				3200	160
ширина, мм				2200	110
высота, мм				1215	67,5
Путь:					
ширина рельсовой колеи, мм				1520	76
радиус кривой, м				112	5,62
Вес тележки с учетом части кузова, кН	P_T	^{3}	$8\cdot10^3$	450	0,056
Осевая нагрузка, кН	P_o			245	0,028
Момент инерции площади, мм	I	^{4}	$16\cdot10^4$		
Время, скорость, период колебаний:					
скорость движения тележки, м/с.				3	13,41
Частота колебаний буксы, рад/с/ рельсошпальной решетки	t, υ, T	$\sqrt{\lambda}$	4,472		
Жесткость рессор, Н/м	C	λ^2	400		
Угловая скорость, рад/с	ω	$\lambda^{-\frac{1}{2}}$	0,224		
Линейное ускорение:					
буксы, м/с^2 рельсошпальной решетки, м/с^2	w	λ^0	1		
Угловое ускорение, рад/с^2	ε	λ^{-1}	0,05		
Объемный момент инерции, мм^4	I	λ^5	$32\cdot10^5$		
Мощность, Дж	P	$\lambda^{\frac{7}{2}}$	$1{,}28\cdot10^5$		
Плотность, кГ/м^3	q	λ^0	1		

Поскольку истинная природа движения новой конструкции колесной пары в реальных условиях эксплуатации неизвестна, для ее оценки используется вторая конкурирующая модель тележки со стандартными колесными парами. Это дает возможность сравнить результаты моделирования на качественном уровне, что позволяет рельефно выявить преимущества и недостатки двух конструкций колесных пар и дает более точную оценку адекватности проведенных макетных исследований к реальным условиям эксплуатации.

При планировании испытаний на моделях решаются следующие задачи научно-технического обеспечения: выбор критериев оценки эффективности испытаний, разработка методического обеспечения экспериментов, разработка моделей системы испытаний с учетом как объекта испытаний, так и используемых вспомогательных средств, выбор видов, объемов

и последовательности этапов испытаний (разработка программ), выбор контролируемых параметров, планирование материально-технического обеспечения.

В предлагаемой работе выбрано три модели конструкции колесной пары и две абсолютно одинаковые модели конструкции тележек (подобные конструкции тележки грузового электровоза ВЛ10). Модели колесных пар представлены следующими вариантами: новая конструкция, которая трансформируется в два варианта: первый – колесо с подрессоренным бандажом и второй – с независимо вращающимися подрессоренными бандажами; третий вариант модели – стандартная конструкция. Колесная пара с подрессоренными бандажами является моделью колесной пары высокоскоростного поезда ICE-1 фирмы Siemens. Такой выбор количества и типов моделей колесных пар и тележек позволяет уже в процессе модельных испытаний получить сравнительные характеристики трех вариантов конструкции колесных пар.

При изготовлении модели верхнего строения пути из-за малости размеров моделей рельсов и шпал не было возможности выполнить их точные уменьшенные копии как по геометрическим параметрам, так и по динамическим. Динамические характеристики модели системы «колесная пара – путь», подобные натурным динамическим параметрам реальной системы «колесная пара – путь», были подобраны эмпирическим методом с использованием модели стандартной конструкции колесной пары и результатов натурных измерений виброускорений буксы колесной пары. Подбор динамических параметров модели пути производился путем введения под шпалы резиновых прокладок.

По обоим концам рельсовой колеи модели установлены две горки: одна предназначена для разгона и отдачи тележки, вторая – только для отдачи. Конструктивные элементы тележек подвижного состава, которые не оказывают влияния на результаты модельных испытаний, не представлены в конструкциях моделей или выполнены с отступлениями от размеров и конфигурации.

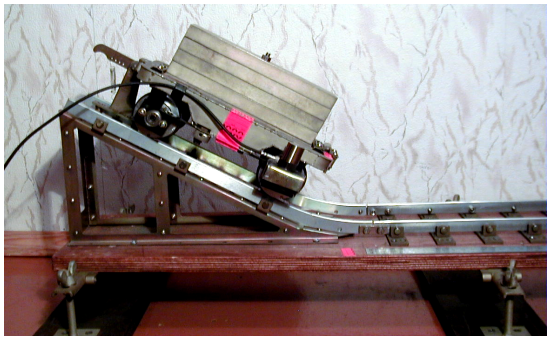


Рисунок 2 – Модели полигона верхнего строения пути и тележки экипажа

Процесс испытаний имеет эвристический характер, поэтому в модельных экспериментах предполагается, что исследователь должен активно воздействовать на решения, анализировать результаты и, если необходимо, менять критерии и состав модели, пересматривать методы испытаний, обеспечивая сходимость процесса поиска лучшего решения. В соответствии с целью испытаний и планом модельных и натурных экспениментов была предложена методика составлена и система документирования результатов измерений в виде специальных таблиц.

Сравнительные испытания конкурирующих моделей колесных пар производились при варьировании следующих параметров системы «колесная пара – путь»:

количество волн горизонтальных неровностей на одной из рельсовых нитей в прямом участке пути (в натуральном измерении длина волн горизонтальных неровностей l = 1,1 м и амплитуда h = 0,001 м);

ширина рельсовой колеи в прямом участке пути;

количество волн (n) волнообразного износа на одной из рельсовой нитей в прямом участке пути;

значение непараллельности колесных пар в тележке при движении в кривом и в прямом участках рельсовой колеи.

Для измерения виброускорений элементов моделей тележки и пути, а также шума в процессе движения модели тележки применялся измеритель шума и вибрации ВШВ-003-М2. Оценка влияния перечисленных выше параметров на характеристики движения колесных пар осуществлялась по величине пройденного тележками пути, который зависит от сопротивления движению колесной пары. Величина пройденного тележками пути измерялась стандартной метровой линейкой. Регистрация траекторий движения моделей тележек производилась с использованием лазерного излучателя, установленного на раме тележки. Луч лазерного излучателя проециро-

вался на экран, на котором фиксировалась его траектория. Сравнение результатов исследований динамики движения моделей тележек производилось по значениям пройденного пути, максимальным значениям амплитуды и частоты спектра колебаний элементов системы «колесная пара – путь».

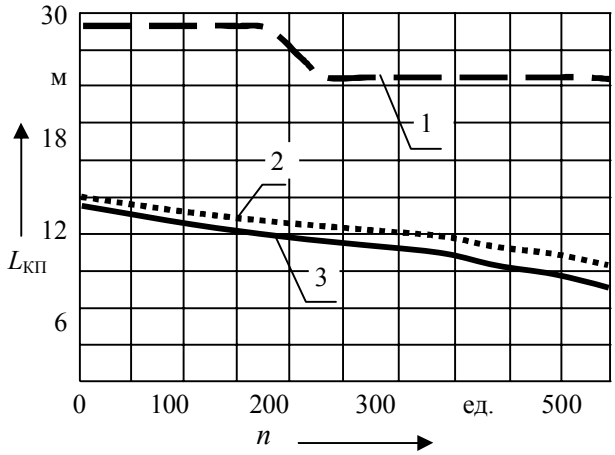


Рисунок 3 – Зависимость пройденного тележками пути от количества горизонтальных неровностей рельса: 1 – колесная пара с независимо вращающимися гибкими бандажами; 2 – колесная пара с гибкими бандажами; 3 – стандартная колесная пара

На рисунке 3 показаны зависимости пройденного тележками пути ($L_{КП}$) от количества горизонтальных неровностей на рельсовой нити (n) в прямом участке пути. Так, при отсутствии горизонтальных неровностей (см. рисунок 3, кривая 1, n = 0) у тележки с колесной парой с независимым вращением гибких бандажей пройденный путь в два раза больше, чем у тележек со стандартными колесами и подрессоренными бандажами (см. рисунок 3, кривые 2, 3, n = 0). По мере увеличения количества горизонтальных неровностей величина пройденного пути у первого варианта тележки имеет постоянное значение до средины участка пути – отметка n = 200. На этой отметке наблюдается увеличение сопротивлению движения, на кривой 1 (см. рисунок 3) указанной отметке соответствует «ступенька». Снижение пройденного пути обусловлено тем, что гребень касается боковой поверхности рельса в сечении, где была образована горизонтальная неровность.

В аналогичных условиях выполнены заезды тележек с остальными двумя вариантами колесных пар. Установлено, что с увеличением количества горизонтальных неровностей сопротивление движению этих вариантов конструкции колесных пар растет и в два раза превышает сопротивление движению тележки с новой конструкцией колесной пары. Кроме этого наличие горизонтальных неровностей на всей длине рельсовых нитей в два раза увеличивает сопротивление движению колесных пар со стандартными и с подрессоренными бандажами.

Увеличение ширины рельсовой колеи в интервале от 2 до 5 мм не оказывает влияния на величину пройденного пути тележки с независимо вращающимися гибкими бандажами. Такая же картина наблюдается и при непараллельной установке колесных пар в тележке при прохождении кривого участка пути.

Проведены исследования траекторий продольного профиля рельсовой колеи и траекторий движения тележек со стандартной колесной парой и с независимо вращающимися гибкими бандажами, которые приведены на рисунке 4, а, б и в соответственно. Траектории движения зарегистрированы с помощью лазерного излучателя по двум угловым координатам: галопирования ($\varphi_Т$) и виляния ($\psi_Т$). Согласно рисункам 4, а – в траектория движения в горизонтальной плоскости тележки со стандартными колесными парами по координате $\psi_Т$ имеет стандартное отклонение относительно траектории оси рельсовой колеи $\delta_{\psi_Т} = 0,86$ град, а у тележки с колесными парами с независимо вращающимися гибкими бандажами $\delta_{\psi_Т} = 0,487$ град. Это указывает на значительно более низкий уровень горизонтальной динамики и большей степени устойчивости движения тележки с колесными парами с независимо вращающимися гибкими бандажами.

На моделях свободные колебания букс с независимо вращающимися гибкими бандажами колес имеет три явно выраженных пика амплитуды спектра ускорений на частотах 28, 112 и 447 Гц, а свободные колебания стандартной колесной пары – только один пик на частоте 28 Гц. При движении в режиме вынужденных колебаний спектр ускорений новой конструк-

ции колеса увеличивается по амплитуде без изменения частотного состава. В тех же условиях спектр ускорений для стандартной колесной пары меняет свой частотный состав: вместо одного пика на частоте 28 Гц появляются дополнительно два пика на частотах 112 и 447 Гц. Такая разница между спектрами свободных и вынужденных колебаний стандартной колесной пары обусловлена влиянием на колебания колесной пары распределительных свойств верхнего строения пути.

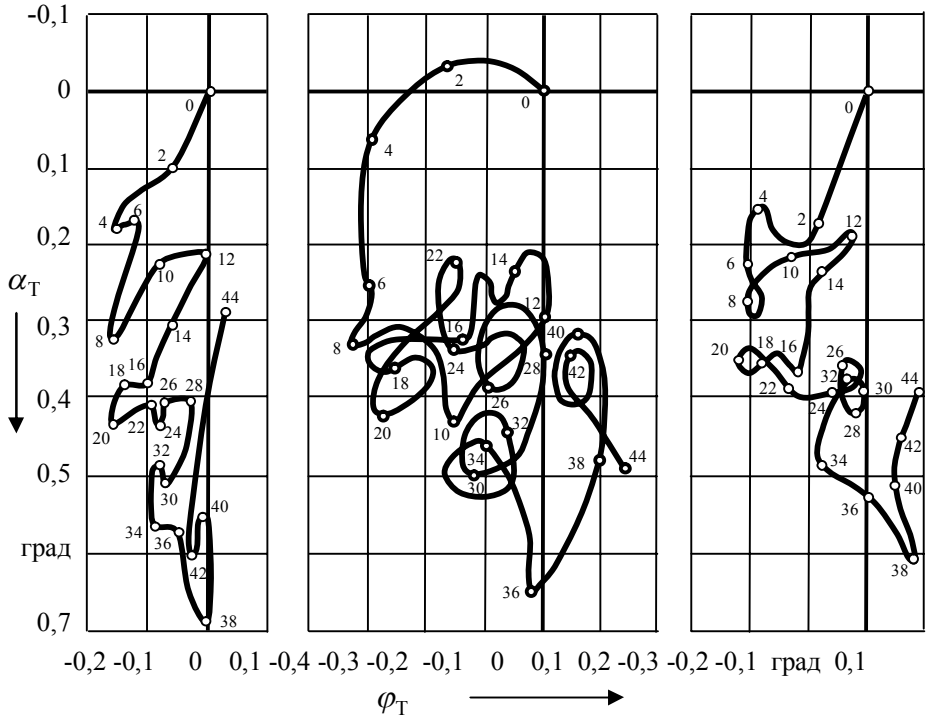


Рисунок 4 – Траектории движения оси рельсовой колеи и центра масс тележек:
а – ось рельсовой колеи; б – тележка со стандартными колесными парами;
в – тележка с новой конструкцией колесных пар

Согласно графикам на рисунке 5 (линии 1 и 2) уровень амплитуд виброускорений на высоких частотах для новой конструкции колеса в 1,5 – 2 раза меньше, чем у стандартной колесной пары. На этом же графике представлен спектр виброускорений буксы стандартной колесной пары (см. рисунок 5, линия 3), полученный в реальных условиях эксплуатации.

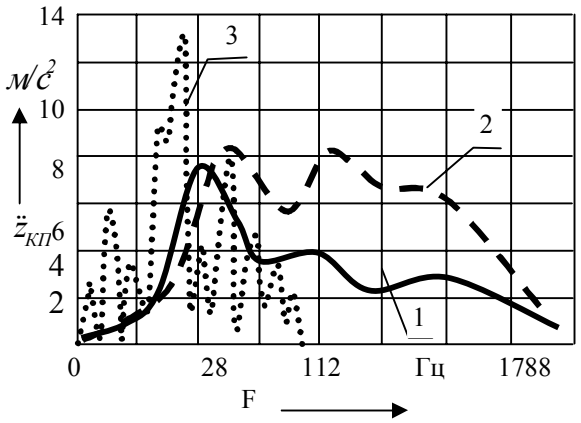


Рисунок 5 – Спектр виброускорений колесных пар:
1 – новая конструкция; 2 – стандартная; 3 – реальная стандартная

Анализ результатов экспериментов на моделях трех вариантов конструкции колесных пар показал, что для всех полученных спектров виброускорений (см. рисунок 5, линии 1 – 3) характерно совпадение зон частот собственных колебаний исследуемых моделей и оригинала (см. рисунок 5, линии 1 – 3), которые находятся в области частот 25 – 30 Гц, полученных при скорости движения 70 км/ч. Это указывает на выполнение кинематического критерия подобия модели и оригинала системы «колесная пара – путь». Использование в модельном ряде стандартной колесной пары позволило установить связь с реальными условиями эксплуатации и дать представление об уровне устойчивости, динамических свойствах и других характеристиках натурного экипажа при оснащении его

колесными парами с независимо вращающимися гибкими бандажами. В соответствии с располагаемыми результатами моделирования переход к параметрам реальной новой конструкции колесной пары осуществляется простым пересчетом – умножением экспериментальных характеристик модели на соответствующие масштабы.

На основании полученных данных сравнительных макетных испытаний можно сделать вывод о том, что использование новой конструкции колесной пары в эксплуатируемых вагонах позволит уменьшить расходы энергии на тягу поездов на 30%. За счет уменьшения необрессоренной массы новой конструкции колесной пары появляется возможность увеличить осевую нагрузку до 28т и скорости поступательного движения на 20%. При этом износ пути и подвижного состава будет снижен на 30 %.

Список литературы

1. Пат. 2207250 (РФ), МКИ 7 В 60 В 9/12. Колесо рельсового транспортного средства [Текст] / В. В. Шиллер, А. В. Шилер, А. Н. Головаш, П. Н. Рубежанский (Россия). – № 2000125462/2. Заявлено 09.10.2000.– Опубл. 27.06.2003. Бюл. № 18. – 3 с.

2. Шаповалов, Л. А. Моделирование в задачах механики элементов конструкций [Текст] / Л. А. Шаповалов. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.

3. Натурный эксперимент: Информационное обеспечение экспериментальных исследований [Текст] /А. Н. Белюнов, Г. М. Солодихин и др. – М.: Радио и связь, 1982. – 304 с.

УДК 004.021

Е. Б. Квиткова

МЕТРИКИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В АЛГОРИТМАХ ВРЕМЕННОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ OFDM-СИГНАЛА

Часто именно блок синхронизации определяет качество работы системы в целом, поэтому достаточно актуальной является задача синхронизации, возникающая в системах с ортогональным частотным разделением каналов. В данной статье рассмотрены метрики, лежащие в основе алгоритмов оценки временного рассогласования.

В последние годы разработчики систем передачи информации проявляют повышенный интерес к системам с ортогональным частотным разделением каналов OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), нашедшим применение в беспроводных системах связи благодаря высокой пропускной способности и эффективному использованию полосы спектра. Однако в таких системах вследствие расхождения частот дискретизации и опорных частот генераторов передатчика и приемника, а также наличия доплеровского сдвига в подвижной связи возникают рассогласования по времени и частоте. В настоящее время для оценки временного сдвига принимаемого сигнала разработано большое количество алгоритмов, использующих цикличность и избыточность передаваемого сигнала, суть которых состоит в поиске экстремума функции корреляции на предполагаемом символьном интервале.

Из теории цифровой обработки сигналов известно, что если объединить все принимаемые сигналы и их смещенные копии в одно множество и задать расстояние между элементами этого множества (метрику), то получим метрическое пространство и векторы, заданные в этом пространстве. Таким образом, двум разным метрикам, определенным на одном и том же множестве, соответствуют разные метрические пространства [1]. Целью данной статьи является обзор метрик, используемых для оценки временных рассогласований.

В основе алгоритмов, использующих корреляционные свойства передаваемого сигнала для получения информации о временном рассогласовании, лежит вычисление автокорреляционной функции, которая соответствует корреляции защитного интервала каждого символа с конечной частью БПФ-интервала и описывается выражением:

$$c[n] = \sum_{i=0}^{T_g-1} r^*[n+i] \cdot r[n+i+N_{FFT}], \quad (1)$$

где $r[n]$ – принимаемый сигнал;

Tg – длина защитного интервала;

N_{FFT} – размерность БПФ.

Рассмотрим первую и самую простую метрику, максимум модуля которой на интервале длиной в один символ соответствует началу его полезной части и определяется выражением:

$$\tau = \max(|c[n]|). \quad (2)$$

Эта метрика характеризуется широким диапазоном значений корреляционных максимумов символов (рисунок 1), обусловленным изменениями мгновенной мощности сигнала, таким образом, повысить ее точность можно путем нормирования функции c[n] на мощность сигнала в соответствии с выражением:

$$\tau = \max\left(\frac{|c[n]|}{p[n]}\right), \quad (3)$$

где $p[n]$ – мощность сигнала, определяемая выражением:

$$p[n] = \sum_{i=0}^{T_g-1} |r[n+i]|^2. \quad (4)$$

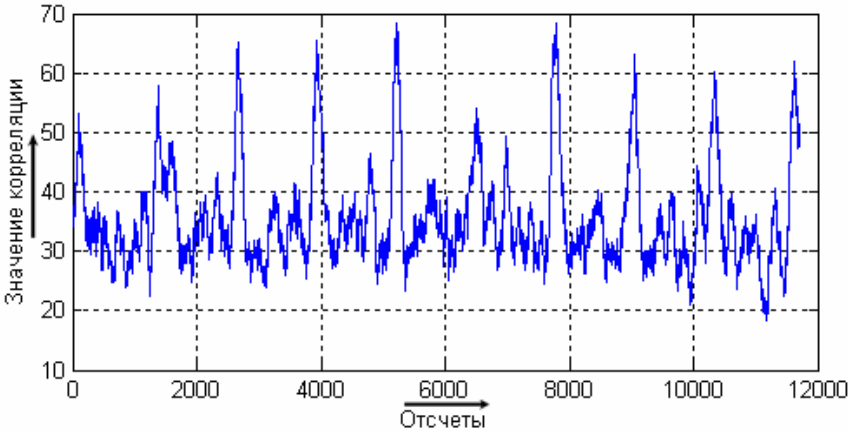


Рисунок 1 – Зависимость значений корреляции от номера отсчета для базовой метрики

Из рисунка 2 видно, что диапазон значений максимумов для нормированной метрики снижен по сравнению с базовой. Однако она требует большого количества умножений в единицу времени, что делает ее вычислительно менее эффективной. Существует упрощенная разностная версия этой метрики (рисунок 3):

$$\tau = \max(|c[n]| - p[n]). \quad (5)$$

Еще один ее вариант имеет вид:

$$\tau = \max(|c[n]| - \rho \cdot E[n]), \quad (6)$$

где коэффициент ρ и энергия сигнала $E[n]$ описываются выражениями:

$$\rho = \frac{SNR}{SNR+1}, \quad (7)$$

где *SNR* – отношение «сигнал/шум» (ОСШ), дБ,

$$E[n]=\frac{1}{2}\sum_{i=0}^{i+T_g-1}\left|r[n+i]\right|^2+\left|r[n+i+N_{FFT}]\right|^2. \qquad (8)$$

Благодаря использованию оценки ОСШ данная метрика имеет большую стабильность, чем предыдущая (рисунок 4).

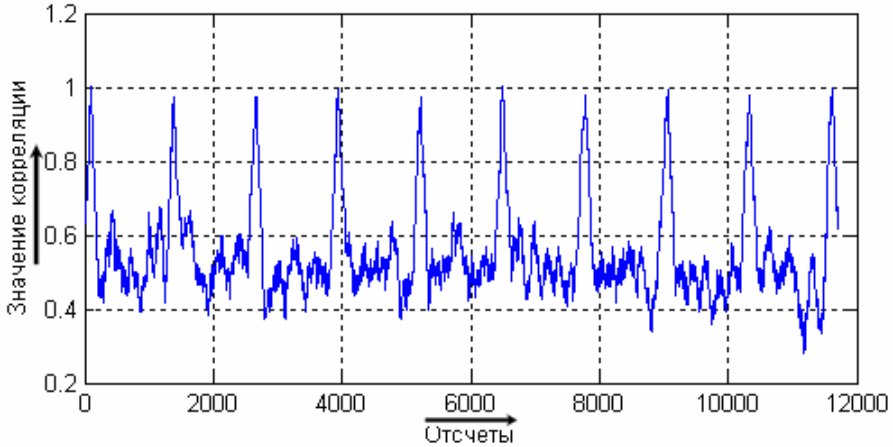


Рисунок 2 – Зависимость значений корреляции от номера отсчета для нормированной метрики

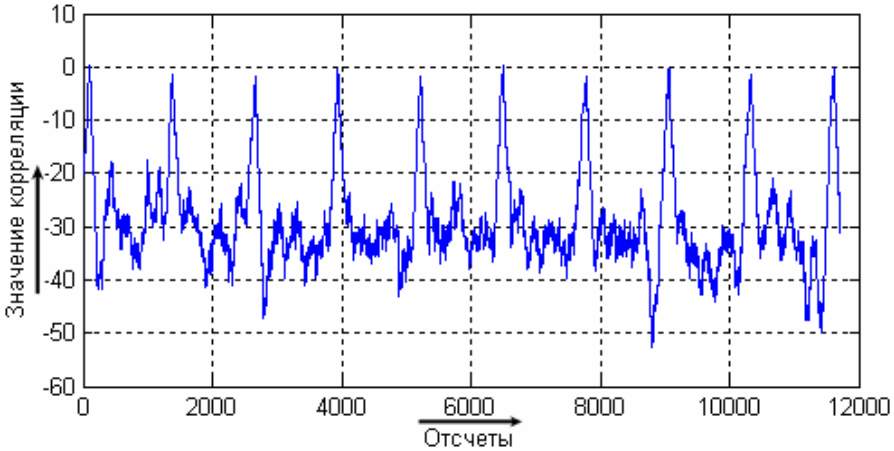


Рисунок 3 – Зависимость значений корреляции от номера отсчета для метрики, определяемой разностью коэффициента корреляции и мощности сигнала

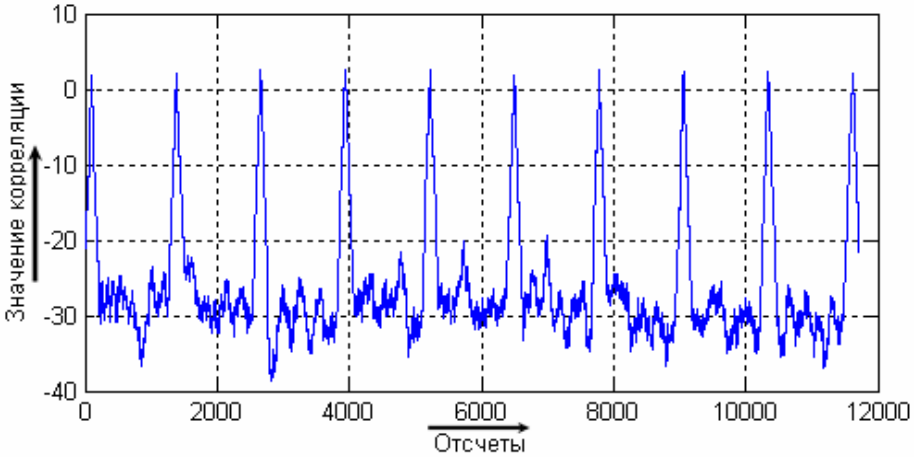


Рисунок 4 – Зависимость значений корреляции от номера отсчета для метрики, учитывающей ОСШ

Следует уточнить, что оценка временного рассогласования возможна и без вычисления автокорреляционной функции, что позволяет значительно уменьшить число операций умножения/деления. Так, Tourtier предложил в качестве метрики использовать сумму максимумов модулей разности мгновенных значений сигналов, удаленных друг от друга на полезную часть символа:

$$\tau = \min\left(\left|\xi[n]\right|\right), \tag{9}$$

где $\xi[n]$ описывается как

$$\xi[n] = \sum_{k=n}^{n+N_g-1} \left|r[k] - r[k+N_g]\right|. \tag{10}$$

Применение такого рода метрик ограничено ввиду их высокой чувствительности к шуму (рисунок 5).

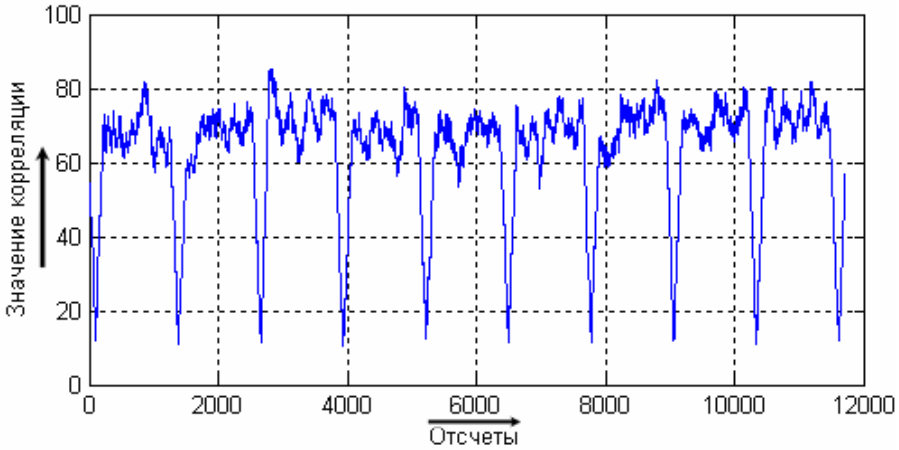


Рисунок 5 – Зависимость значений корреляции от номера отсчета для разностной метрики

Количественное сравнение перечисленных метрик выполним по дисперсии оценок, полученных на их основе. Для этого рассмотрим сигнал, состоящий из 1000 символов для случая T_g/T_u =1/9, где T_g и T_u – длительность защитного интервала и полезной части соответственно, в присутствии аддитивного белого гауссовского шума для значений ОСШ в диапазоне от 0 до 7 дБ. Результаты моделирования в среде Matlab представлены на рисунке 6.

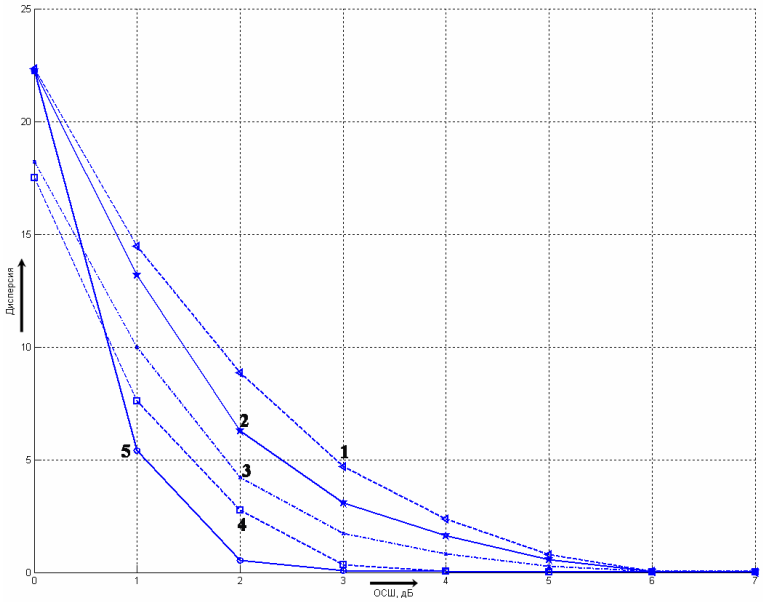


Рисунок 6 – Зависимость дисперсии оценок смещения экстремума от значений ОСШ:
для 1 – базовой метрики; 2 – метрики, описываемой разностью модуля корреляции и мощности сигнала; 3 и 4– нормированной и разностной метрики; 5 – для метрики, учитывающей ОСШ

В данной статье рассмотрены используемые для оценки временного рассогласования метрики, большинство из которых основано на вычислении автокорреляционной функции и поиске ее экстремума на предполагаемом символьном интервале. Из полученных в ходе моделирования результатов очевидно, что наиболее привлекательной является метрика, учитывающая ОСШ. Однако при этом необходимо помнить об ограниченной применимости алгоритмов временной синхронизации на основе рассмотренных метрик, связанной с тем, что дисперсия оценок и ОСШ находятся в обратной зависимости друг от друга.

1. Романюк, Ю. А. Основы цифровой обработки сигналов [Текст]: В 3 ч. Ч. 1. Свойства и преобразования дискретных сигналов: Учебное пособие / Ю. А. Романюк / МФТИ. – М., 2005. – 332 с.

УДК 004.428.4

К. А. Фирсанов

ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ СОЗДАНИИ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ БИБЛИОТЕК МАТЕМАТИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ ЦИФРОВЫХ СИГНАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОРОВ С ФИКСИРОВАННОЙ ТОЧКОЙ

В статье рассматриваются основные подходы, применяемые при создании высокопроизводительных библиотек математических функций на платформах цифровых сигнальных процессоров с фиксированной точкой. Рассмотрены основные методы, используемые при создании алгоритмов для вычисления функций, их преимущества и недостатки применительно к DSP-платформам с фиксированной точкой. Подробно рассмотрены вопросы точности и диапазона аргументов и значений реализуемых функций.

Процессоры цифровой обработки сигналов находят широкое применение в современных радиоэлектронных устройствах. Связное, телекоммуникационное оборудование, энергетические устройства включают в себя узлы и блоки, разработанные на основе этих процессоров, реализующие разнообразные алгоритмы обработки сигналов. Часто при реализации алгоритмов обработки сигналов на платформах цифровых сигнальных процессоров возникает необходимость вычисления различных математических функций. Как правило, производители цифровых сигнальных процессоров предоставляют библиотеки элементарных и специальных математических функций на бесплатной или платной основе для использования на своих платформах. Для достижения максимальной производительности процессора эти библиотеки написаны на Ассемблере и оптимизированы по использованию архитектуры процессора: КЭШа, конвейера, памяти. Функции, вызываемые из этих библиотек, имеют определенный программный интерфейс, позволяющий вызывать их как из программ написанных на Ассемблере, так и из программ, написанных на языке C/C++ для исполнения на конкретной модели процессора. К примеру, компания Texas Instruments свободно предлагает разработчикам библиотеку элементарных математических функций DSPLIB для своих сигнальных процессоров TMS. Компания Analog Devices предлагает разработчикам библиотеку элементарных математических функций в составе среды разработки для своих процессоров ADSP. Компания Verysilicon – производитель и разработчик сигнальных процессоров на платформе ZSP – предлагает библиотеку элементарных математических функций ZSPLIB на платной основе для процессоров платформ *G1, G2, G3*. Российский разработчик сигнальных процессоров на платформе Multicore, компания Элвис, предлагает реализацию библиотек математических и специальных функций, оптимизированных для выполнения на DSP ядрах *Elcore14, Elcore24, Elcore26*. Также существует множество реализацию математических библиотек для различных платформ от сторонних разработчиков. К примеру, разработчик реше-

ний на платформах *TMS320VC55, TMS320VC62, TMS320VC64* компания Integrit предлагает реализацию библиотеки элементарных математических функций, оптимизированную для этих платформ. Несмотря на то, что необходимые библиотеки можно найти у производителя конкретного сигнального процессора или у сторонних компаний, разработчики систем на цифровых сигнальных процессорах часто сталкиваются с необходимостью реализации своих собственных библиотек, которые отличаются от предлагаемых по набору реализованных функций, скорости выполнения, размеру программного кода. Порой необходимость создания собственных библиотек вызвана необходимостью реализовать уникальный программный интерфейс или обрабатывать данные определенного формата и разрядности. С точки зрения архитектуры сигнального процессора необходимость реализации библиотек математических функций обусловлена тем, что у большинства цифровых сигнальных процессоров в системе вычислительных инструкций присутствуют только арифметические, логические, сдвиговые инструкции и инструкции умножения и умножения с накоплением. Инструкции деления и тем более инструкции для вычисления элементарных математических функций обычно отсутствуют в системе команд процессоров с фиксированной точкой, поэтому для их вычисления и создаются специализированные библиотеки. Любая из существующих библиотек определяется составом функций, и каждая функция библиотеки может быть охарактеризована следующими параметрами: требуемым объемом памяти программ и памяти данных для вычисления функции, количеством тактов на вычисление одного значения, алгоритмом, используемым для реализации, точностью, с которой функция возвращает вычисленные значения, диапазоном аргументов и значений, обработкой значений, лежащих вне области определения, и прототипом вызова функции.

Эти характеристики обычно закладываются в спецификацию проектируемой библиотеки. Остановимся подробнее на перечисленных выше параметрах, рассмотрев их на примерах реализаций различных элементарных функций. Требуемый объем памяти программ и памяти данных всецело определяется алгоритмом, который используется для реализации функции. С другой стороны, выбор алгоритма для реализации той или иной функции библиотеки производится на основе заданных критериев быстродействия, доступных ресурсов – памяти программ и памяти данных и точности, с которой будет реализована каждая из функций. Как уже указывалось, на всех платформах цифровых сигнальных процессоров с фиксированной точкой отсутствуют команды для вычисления элементарных функций. Сами элементарные функции не могут быть вычислены за конечное число арифметических операций. Их можно только аппроксимировать. Большинство алгоритмов для вычисления элементарных и специальных функций используют итерационные методы, приближение при помощи рядов, полиноминальную интерполяцию или интерполяцию дробно-рациональными функциями. Как пример построения итерационного алгоритма для вычисления элементарных функций рассмотрим итерационный метод Ньютона для вычисления нуля функции и его применимость для реализации различных функций на некоторой обобщенной платформе процессора цифровой обработки сигналов. Пусть нам нужно вычислить некоторое значение y_n функции $y = f(x)$ для точки x_n. Пусть обратная функция выражается как $x = \varphi(y)$. Рассмотрим функцию $x = \varphi(y) - x_n$ и построим вычислительный алгоритм для нахождения нуля этой функции (который очевидно будет в точке y_n). Для нахождения нуля возьмем значение y_0, которое находится достаточно близко к искомому значению y_n, проведем касательную к функции $x = \varphi(y) - x_n$ в точке y_0. Касательная пересечет ось Y в точке y_1, которая будет находиться между y_0 и y_n. Уравнение касательной в точке $(y_0; x_0)$ для функции $\varphi(y)$ можно записать как

$$x_0 - x_1 = (y_0 - y_1) \cdot \phi'(y_0). \qquad (1)$$

Учитывая то, что $x_1 = 0$, а $x_0 = \varphi(y_0) - x_n$, значение y_n может быть приблизительно вычислено как

$$y_n \approx y_0 - (\phi(y_0) - x_n) / \phi'(y_0). \quad (2)$$

На следующем шаге проведем касательную в точке $(y_1; x_1)$ и получим новое приближенное значение y_n:

$$y_n \approx y_1 - (\phi(y_1) - x_n) / \phi'(y_1). \quad (3)$$

С каждым последующим шагом y_i приближается к искомому значению y_n. Число таких итераций зависит от выбора начального значения y_0 и точности, с которой необходимо получить результат. Обобщенную формулу итерационного алгоритма можно записать как

$$y_{n+1} = y_n - (\varphi(y) - x_n) / \varphi'(y) \quad (4)$$

Исходя из равенства (4) можно составить итерационные алгоритмы для вычисления различных элементарных функций. Так, вычисление функции обратной величины $y = \frac{1}{x}$ в точке А представим как нахождение нуля функции $x = \varphi(y) - A = \frac{1}{y} - A$. Выражение для производной обратной функции в точке y_0 можно записать так:

$$\phi'(y_0) = -y_0^2. \quad (5)$$

Подставляя выражение производной $\varphi'(y_0)$ и выражение для функции $\varphi(y_0)$ в уравнение (4), получим выражение для вычисления приближенного значения функции $y = \frac{1}{x}$ в точке А:

$$y_1 \approx y_0 - (\frac{1}{y_0} - A) / (-\frac{1}{y_0^2}) = 2y_0 - A \cdot y_0^2. \quad (6)$$

В обобщенном виде выражение (6) можно переписать так:

$$y_{n+1} = 2y_n - A \cdot y_n^2. \quad (7)$$

Выражение (7) представляет итерационную формулу Ньютона – Рафсона для вычисления функции обратной величины $y = \frac{1}{x}$. Найдем итерационные алгоритмы для вычисления функций $y = \sqrt[n]{x}$ и $y = \sqrt[-n]{x}$. Так, для функции $y = \sqrt[n]{x}$ обратная функция – это $x = y^n$. Выражение для производной обратной функции можно записать как $\varphi'(y) = n \cdot y^{n-1}$. Подставляя эти выражения в уравнение (4) и приводя все к обобщенной форме, можно получить итерационный алгоритм для вычисления функции $y = \sqrt[n]{x}$:

$$y_{n+1} = ((n-1) \cdot y_n + A \cdot y_n^{1-n}) / n. \quad (8)$$

Как частный случай из формулы (5) можно получить алгоритм для вычисления функции $y = \sqrt{x}$, известный как итерационная формула Ньютона:

$$y_{n+1} = 0,5 \cdot (y_n + \frac{A}{y_n}). \quad (9)$$

Для функции $y = \sqrt[-n]{x}$ обратная функция – это $x = y^{-n}$. Выражение для производной обратной функции можно записать как $\varphi'(y) = -n \cdot y^{-(n+1)}$. Подставляя эти выражения в уравнение (4) и приводя все к обобщенной форме, можно получить итерационный алгоритм для вычисления функции $y = \sqrt[-n]{x}$:

$$y_{n+1} = ((n+1) \cdot y_n - A \cdot y_n^{1+n}) / n. \tag{10}$$

Как частный случай из выражения (10) можно получить алгоритм для вычисления функции $y = \sqrt{\frac{1}{x}}$:

$$y_{n+1} = 0,5 \cdot (3 \cdot y_n - A \cdot y_n^3). \tag{11}$$

Чем ближе начальное значение y_0 выбирается к значению $f(A)$, тем меньшее количество итераций требуется для вычисления значения функции и, соответственно, тем меньше вычислительные затраты процессора. Однако если значение y_0 выбрано далеко от значения $f(A)$, итерационный алгоритм может расходиться. Для подбора начального значения можно рекомендовать его вычисление, используя метод линейной интерполяции от некоторого известного значения. К преимуществам итерационных методов стоит отнести простоту реализации, невысокие требования к памяти данных – требуется всего лишь несколько слов для хранения коэффициентов, к недостаткам – то, что такой алгоритм трудно распараллелить для вычисления одного значения, эффективная применимость этого метода для использования на платформах с фиксированной точкой ограничена определенными классами функций. Связано это с тем, что только для функции $y = x^r$, где r – действительное число, можно подобрать итерационный алгоритм, содержащий только степенные функции. Исходя из уравнения (4) итерационный алгоритм содержит обратную функцию и ее производную. Маловероятно чтобы инструкции для вычисления этих двух функций присутствовали в системе команд цифрового сигнального процессора с фиксированной точкой. Даже для вычисления (9) необходимо выполнить операцию деления в одной итерации. И для большинства процессоров, у которых отсутствует инструкция деления, вычисление функции квадратного корня $y = \sqrt{x}$ можно выполнить, вычисляя сначала $y = \sqrt{\frac{1}{x}}$ с использованием выражения (11), а затем вычисляя обратную величину с применением итерационного алгоритма Ньютона – Рафсона (7).

Использование ряда Тейлора является одним из методов приближения для реализации различных функций на платформах с фиксированной точкой. Известно, что если функция $y = f(x)$ абсолютно дифференцируема в некоторой точке x_0, то она может быть представлена в данной точке рядом Тейлора:

$$y(x) = f(x_0) + \sum \frac{1}{n!} f^{(n)}(x_0) \cdot (x - x_0)^n. \tag{12}$$

Преимущества данного подхода – это простота реализации. Достаточно держать в памяти данных предварительно рассчитанные коэффициенты $c_n = \frac{1}{n!} f^{(n)}(x_0)$ и затем с каждой итерацией для $\Delta x = x - x_0$ получить вычисленное значение с заданной точностью:

$$y(x) = ((...(((\Delta x + c_n) \cdot \Delta x + c_{n-1}) \cdot \Delta x + c_{n-2}) \cdot \Delta x + c_2) \cdot \Delta x + c_1) \cdot \Delta x + c_0. \tag{13}$$

Операция (13) может быть разбита на вычисление двух полиномов: полинома только с четными показателями степени и полинома с только с нечетными показателями степени.

Учитывая то, что для большинства «суперскалярных» и VLIW-платформ операции суммирования группируются с операциями умножения, можно построить вычислительный алгоритм так, чтобы сгруппировать операции умножения для вычисления одного полинома с операциями сложения для другого и наоборот. В конце вычисления останется только суммировать полученные результаты. В итоге применение данного приема приводит к существенному повышению производительности. В идеальном случае ряд Тейлора должен строиться по единственной узловой точке для всего диапазона значений интерполируемой функции. Однако есть существенные ограничения по применению данного метода и его оптимальности. Во-первых, необходимо выбирать узловую точку, относительно которой строится данный ряд, как можно ближе к вычисляемому значению: чем ближе данная узловая точка находится к аргументу вычисляемой функции, тем быстрее сойдется ряд Тейлора к искомому значению. Во-вторых, для ряда Тейлора, как для степенного ряда, существует радиус сходимости R – максимальное расстояние от узловой точки до аргумента вычисляемой функции. Если $x - x_0 \geq R$, то ряд будет расходящимся. В-третьих, для аргументов, которые находятся близко к узловой точке, необходимо взять меньшее число членов ряда, чем для тех, которые находятся дальше от нее, чтобы получить искомое значение с заданной точностью. Введение дополнительных шагов для анализа $\Delta x = x - x_0$, чтобы определить, сколько использовать членов ряда, или введение дополнительных узловых точек потребует введения команд ветвления, что повлечет за собой увеличение времени для вычисления искомого значения. Тем не менее данный метод может быть достаточно эффективно использован для интерполяции периодических функций и функций, которые не имеют особых точек.

Использование полиноминальной интерполяции позволяет обойти недостатки, присущие методу приближения рядом Тейлора. При интерполяции полиномом вычисляемая функция на всем или части диапазона заменяется полиномом некоторой степени n. Существует множество критериев, используемых для построения полинома. Один из критериев – это равенство значений функции значениям интерполирующего полинома в узловых точках. При использовании данного критерия для построения полинома степени n должна быть использована $n+1$ узловая точка. Затем составляется и решается система линейных уравнений относительно коэффициентов полинома a_n, ее решение и даст искомые коэффициенты:

$$\begin{aligned} y_0 &= a_0 + a_1 x_0 + a_2 x_0^2 + \ldots\ldots + a_n x_0^n; \\ y_1 &= a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_1^2 + \ldots\ldots + a_n x_1^n; \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ y_n &= a_0 + a_1 x_n + a_2 x_n^2 + \ldots\ldots + a_n x_n^n. \end{aligned} \tag{14}$$

Данный тип интерполяции – интерполяция Лагранжа. Недостаток этого подхода – это то, что необходимо учитывать ошибку интерполяции между узловыми точками, которая может превосходить точность, с которой должна быть вычисляться проектируемая функция для ряда аргументов. Увеличение количества узловых точек уменьшает ошибку интерполяции. Другой способ улучшить приближение между узловыми точками – дополнительно потребовать равенства значений производных определенных порядков аппроксимируемой функции и интерполирующего полинома во всех или определенных узловых точках. С учетом всех этих условий также составляется и решается система линейных уравнений, и если она имеет решение, то искомое решение и будет коэффициентами интерполирующего полинома. Усеченный ряд Тейлора, используемый для аппроксимации, можно также рассматривать как подмножество данного подхода. Ведь по своей сути усеченный ряд Тейлора – это полином, построенный по одной узловой точке, в которой равны значения аппроксимируемой функции и интерполирующего полинома и значения их производных. Как пример других методов в построении интерполирующих полиномов можно привести метод наименьших квадратов, построение полиномов с использованием метода Чебышева: минимизировать максимальное

отклонение. Все эти методы достаточно подробно освещены в литературе [1]. После нахождения искомого полинома его коэффициенты будут храниться в памяти данных, а сама процедура вычисления может быть представлена выражением (13). Однако далеко не для каждой аппроксимируемой функции можно подобрать полином, который будет интерполировать ее на всем диапазоне изменения аргумента. Порядок полинома может оказаться очень большим, что сведет на нет все преимущества интерполяции полиномом. Для решения данной проблемы существует множество методов, один из них – использование кусочно-полиноминальной интерполяции. При данном методе интерполируемый диапазон разбивается на множество маленьких интервалов, каждый из которых интерполируется полиномом невысокого порядка. Методы кусочно-полиноминальной интерполяции достаточно подробно освещены в работе [4]. Другой подход, который разработан для вычислительных платформ с плавающей точкой, – сжатие диапазона [2]. Используя данный подход, можно попытаться определить небольшой диапазон, на котором достаточно интерполировать вычисляемую функцию. Диапазон должен быть определен таким образом, чтобы при преобразовании значения аргумента, находящегося за пределами данного диапазона, к некоторому значению внутри этого диапазона было соответствующее преобразование значения функции. Один из примеров применения данного подхода – интерполяция периодических функций. Так, функция $y(x) = \sin(x)$ может быть интерполирована на интервале $\left[0; \frac{\pi}{2}\right]$. Значения аргумента для данной функции могут быть представлены как $\left[k\frac{\pi}{2} + \phi\right]$. После определения четверти, в которой лежит входной аргумент, вычисляется искомое значение функции. Другой пример – это функция $y = \mathrm{arctg}(x)$. Эта функция может быть интерполирована на интервале $[0;1]$. На интервале от $]1; \max Val[$, где $\max Val$ – максимальное значение в формате аргумента, функция преобразуется к виду:

$$\phi_0 = \mathrm{arctg}\left(\frac{x-1}{x+1}\right). \tag{15}$$

После вычисления φ_0 искомое значение определится как $y = \phi + \frac{\pi}{4}$.

В отличие от платформ с плавающей точкой, где точность значения фиксирована, а диапазон значений, к примеру, для стандарта IEEE-754 лежит в пределах $\pm 2^{127}$, для арифметики с фиксированной точкой диапазон возможных значений и точность, с которой эти значения представлены, есть взаимосвязанные величины. Если числовые величины с фиксированной разрядностью – целые числа, то диапазон возможных значений для них лежит в пределах $[-1 \cdot 2^n; 2^n - 1]$; если же значения рассматриваются как величины в дробном формате, то диапазон возможных значений лежит в пределах $[-1; 1 - 2^{-n}]$, где n – число разрядов операндов без учета знакового разряда. Соответственно точность в первом случае – до единиц целого, во втором – $(n-1)$ – значение после десятичной точки, где n – разрядность операндов процессора. Диапазоны возможных значений и точность промежуточных форматов вида $Qk.m$, где k – число разрядов в целой части и m – число разрядов после десятичной точки, будут ограничены величинами из указанных выше пределов. Реализуемые функции могут накладывать дополнительные ограничения на диапазоны аргументов и значений. Учитывая сказанное выше, при проектировании библиотеки имеет смысл определить для каждой реализуемой функции формат аргументов и формат, в котором функция возвращает результат вычислений. Формат определяется числом разрядов в целой и дробной частях операндов и результата. Соответственно точность определится как вес младшего значащего разряда в конкретном формате, а диапазон возможных значений – числом разрядов в целой части. Пояснить это можно на примерах элементарных функций.

Предположим, что создаваемая библиотека должна содержать функцию $y = \frac{1}{x}$, которая обрабатывает 16-разрядные целые значения и возвращает 32-разрядный результат. Учитывая то, что значения функции по модулю будут меньше 1, будет логичным, чтобы для достижения максимальной точности реализуемая функция возвращала значения в формате $Q0.31$.

Предположим, что создаваемая библиотека должна содержать функцию $y = \ln(x)$, которая обрабатывает 32-разрядные целые значения и возвращает 32- разрядный результат. Учитывая то, что аргумент для данной функции – это положительное число больше нуля, лежащее в диапазоне [1, 2147483647], значения функции для данного диапазона аргумента будут лежать в пределах [0, 21.4875625969]. Чтобы представить целую часть значения, необходимо как минимум пять двоичных разрядов, оставшиеся разряды будут представлять дробную часть значения функции. Соответственно будет логичным, чтобы формат возвращаемого значения был $Q5.26$.

Предположим, что создаваемая библиотека должна содержать функцию $y = \sqrt{x}$, которая принимает 32-разрядные целые значения и возвращает 32-разрядный результат. Учитывая то, что аргумент для данной функции – это положительное число, лежащее в диапазоне [0, 2147483647], значения функции для данного диапазона аргумента будут лежать в пределах [0, 46340.950001052]. Учитывая, что для представления целой части всего диапазона значений, функции необходимо 16 двоичных разрядов, будет логичным, чтобы формат возвращаемого значения был $Q16.15$.

В приведенных выше примерах, форматы значений выбирались как компромисс между числом разрядов, необходимых для представления целой части всего возможного диапазона значений функции и достижения максимально возможной точности. Вполне возможно, что в силу спецификации разрабатываемой библиотеки и ограничений, накладываемых на диапазоны аргументов, разработчик библиотеки примет иную спецификацию форматов выходных значений. Учитывая разнообразие форматов значений для различных функций библиотеки и то, что есть вероятность вызова последовательности функций, стоит остановиться на том, как формат значения зависит от изменения формата входного аргумента. Поясним это снова на примерах элементарных функций.

Пусть реализована функция $y = \frac{1}{x}$, которая обрабатывает 16-разрядные целые значения с формированием результата в формате $Q0.31$. Если теперь рассмотреть аргумент как величину в дробном формате $Q0.15$, то значение функции будет величиной в формате $Q16.15$, что равносильно умножению на 2^{15}. И вообще, если аргумент для данной реализованной функции – значение в произвольном формате $Qk.m$, где k – число разрядов в целой части, а m – число разрядов в дробной части и $k + m = 15$, то данная функция $y = \frac{1}{x}$ возвратит 32-разрядный результат в формате $Qr.s$, где $s = 31 - k$ – число разрядов в дробной части результата, а $r = 16 + m$ – число разрядов в целой части результата.

Пусть реализована функция $y = \ln(x)$ для 32-разрядных целых положительных данных формата $Q31.0$. Если рассмотреть аргумент для данной функции как положительную величину формата $Q0.31$, т. е. величину из диапазона]0, 1[, то значение функции лежит в пределах]-21.4875625969, 0[, т. е. выходная величина для данного формата аргумента будет смещена на $31 \cdot \ln(2)$ и для получения значения функции, если аргумент рассматривается как значение в дробном формате, необходимо будет вычесть $31 \cdot \ln(2)$ от значения функции, полученного для целого представления аргумента. Стоит отметить, что формат возвращаемого значения останется $Q5.26$. Однако необходимо будет предусмотреть реализацию еще одной функции $y = \ln(x)$ для дробного формата аргумента или библиотечная функция $y = \ln(x)$

должна быть модифицирована так, чтобы учитывать возможное изменение формата аргумента, путем передачи параметра о его формате.

Пусть реализована функция $y = \sqrt{x}$, которая принимает 32-разрядные целые значения и возвращает 32-разрядный результат. Если рассмотреть аргумент для данной функции как положительную величину формата $Q0.31$, т. е. величину из диапазона [0, 1[, то значение функции лежит в пределах [0, 0.999999999767[. Формат выходной величины будет также $Q0.31$ и дополнительно это значение необходимо будет умножить на $\frac{1}{\sqrt{2}}$. В этом случае также потребуется предусмотреть еще одну реализацию функции $y = \sqrt{x}$ для дробного формата аргумента или библиотечная функция $y = \sqrt{x}$ должна быть модифицирована так, чтобы учитывать возможное изменение формата аргумента путем передачи параметра о его формате.

Из приведенных выше примеров следует, что функции, для которых выполняется соотношение $f(x \cdot 2^n) = 2^k \cdot f(x)$, где k и n – это некоторые целые значения, меняют формат значения при смене формата аргумента. Для других функций, как показано в примерах 2 и 3 выше, если аргумент рассматривается в новом формате, то необходимо произвести дополнительные операции над возвращаемым значением. При этом формат возвращаемого значения может изменяться, а может и остаться прежним. Рассмотрим как еще один пример функцию $y = e^x$, где аргумент x – 32-разрядная величина и значение функции также представлено 32-разрядным числом, и определим оптимальные форматы аргументов и значений. Максимально возможное значение аргумента, при котором значение функции составит 2147483647 – максимально возможную величину с учетом знакового разряда – является значение 21,4875625973, т. е. значение аргумента логично представить в формате $Q5.26$. С другой стороны, так как функция $y = e^x$ является обратной к функции $y = \ln(x)$, то формат аргумента $Q5.26$ и формат значения $Q31.0$ для функции $y = e^x$ являются взаимообратными к соответствующим форматам функции $y = \ln(x)$ – $Q31.0$ и $Q5.26$. Если аргумент в формате $Q5.26$ является отрицательной величиной, то логично потребовать, чтобы значение функции возвращалось в формате $Q0.31$. Учитывая то, что если величина аргумента лежит в диапазоне [0, 1], может быть, потребуется ввести дополнительный формат для представления данных значений. Данный пример с функцией $y = e^x$ показывает, что в силу значительно меньшего диапазона значений для систем с фиксированной точкой по сравнению с системами с плавающей точкой охват возможно большего диапазона значений и максимально возможная точность – это вопрос компромисса. Стоит также отметить, что знание информации о форматах аргументов и значений функций поможет избежать введения операций сдвига для приведения значений к какому-то промежуточному формату при последовательном вызове различных функций библиотеки.

После определения форматов каждой из реализуемых функций, алгоритмов, по которым реализована каждая из функций, разработчик библиотеки определяет прототипы вызова каждой из функций и тип значения, который возвращает библиотечная функция. Как правило, в вызываемую функцию передаются указатели на входные и выходные массивы данных и ряд дополнительных параметров: к примеру, параметры управления форматами данных для входных и выходных значений. Использование массивов данных в качестве входных параметров позволяет сделать единственный вызов при итерационном вычислении функции и сэкономить время, которое будет затрачено каждый раз на выполнение команд для сохранения и восстановления контекста. Значение, которое возвращает библиотечная функция, может быть использовано для определения успешности вычисления или для характеристики разного рода исключений.

Исключительные ситуации могут быть следующего вида: аргумент находится за пределом диапазона входных данных, значение функции находится за пределом диапазона значений, определенных форматом выходных значений, аргумент является особой точкой, где значение функции не определено. В отличие от чисел с плавающей точкой, где стандартом определены значения, являющиеся величинами NaN, $\pm\infty$, в формате с фиксированной точкой приходится использовать максимальное положительное и минимальное отрицательное значения для представления данных значений.

В заключение стоит отметить, что архитектурные особенности конкретной платформы, для которой создается библиотека, также играют весьма важную роль. Правильный выбор условий в инструкциях условных переходов, если в процессоре используется статическое предсказание ветвлений, позволяет уменьшить накладные расходы в тактах процессора, которые характерны для данных команд. Выбор расположения программного модуля и сегмента данных при компиляции библиотеки может помочь избежать дополнительных тактов ожидания, требуемых процессору для обновления КЭШ памяти программ и памяти данных.

Список литературы

1. Хемминг, Р. В. Численные методы [Текст] / Р. В. Хемминг. – М.: Наука, 1972. – 398 с.
2. Muller, J-M. Elementary functions. Algorithms and implementation [Текст] / J-M. Muller. – Boston: Birkhuser, 1997. –218 с.
3. Бугров, Я. С. Высшая математика. Дифференциальные уравнения. Кратные интегралы. Ряды. Функции комплексного переменного [Текст] / Я. С. Бугров, С. М. Никольский – Ростов-на-Дону: Феникс, 1998. – 514 с.
4. Специальные математические функции и их аппроксимации: [Текст] / Под ред. К. И. Бабенко. – М.: Мир, 1980. – 256 с.
5. Фирсанов, К. А. Счетчики постоянного тока для систем учета электрической энергии на тягу поездов на основе процессоров цифровой обработки сигналов / К. А. Фирсанов, А. А. Хряков // Материалы науч.-техн. конф. СибАДИ / Сибирская автомобильна-дорожная академия. – Омск, 2008. – Кн. 2. – С.190 – 196.

УДК 656.212.6.073.22

С. А. Егоров, Л. А. Гребенюк, С. Ю. Хорунжин

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЭЛЕМЕНТОВ КРЕПЛЕНИЯ В СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМЫХ СХЕМАХ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ЕДИНИЧНОГО ГРУЗА

Безопасность движения поездов и сохранность перевозимых грузов напрямую зависят от способа размещения и крепления грузов, поэтому совершенствование методики расчета крепления грузов является актуальной прикладной задачей, имеющей существенное значение для транспортной науки и отрасли железнодорожного транспорта.

В соответствии со своей миссией ОАО «Российские железные дороги» позиционируется как вертикально интегрированная компания холдингового типа, обеспечивающая эффективное предоставление качественных транспортных услуг как на российском, так и на международном рынке. Достижение этой цели невозможно без обеспечения высокого уровня безопасности перевозок, являющегося гарантией сохранения устойчивых конкурентных преимуществ компании на транспортном рынке.

Безопасность движения поездов и сохранность грузов обеспечиваются не только содержанием в постоянной исправности всей инфраструктуры железнодорожного транспорта, но

и, в частности, надежностью крепления грузов. Поэтому одним из элементов системы обеспечения безопасности движения в сфере грузовых перевозок является снижение коммерческих браков за счет совершенствования методики расчета крепления груза, в том числе за счет автоматизации расчета размещения и крепления грузов, что является актуальной прикладной задачей, имеющей существенное значение для транспортной науки и отрасли железнодорожного транспорта.

В статически неопределимых схемах закрепления единичного груза реакции связей следует рассчитывать с учетом их деформаций (удлинений, укорочений и т. п.) в общем случае от сдвигов груза по взаимно перпендикулярным направлениям X и Y (вдоль и поперек вагона), от наклона (от опрокидывания) груза на угол θ и от поворота (разворота) груза по полу вагона на угол φ под действием внешних силовых факторов, регламентированных нормами ТУ № ЦМ-943 [1]. Предлагаемый авторами статьи новый подход к расчету элементов крепления в статически неопределимых схемах закрепления единичного груза позволит производить расчеты с большей точностью.

Расчет элементов крепления от плоскопараллельного сдвига.

Единичный груз устойчив от опрокидывания (наклон на угол θ отсутствует), закреплен симметрично (разворот на угол φ отсутствует) от сдвига вдоль оси X (вдоль или поперек вагона) растяжками из различных материалов (с различными модулями продольной упругости E_i, кгс/мм^2), различной длины l_i, м, различного сечения A_i, мм^2, с различными углами α_i° и β_{xi}° совместно с упорными элементами общей жесткостью $C_{\text{уп}}$, кгс/м, [2,3].

В общем случае усилие R_i, кгс, в i-й растяжке определяют по формуле:

$$R_i = \left(\Delta F_x + C_{\text{уп}} \cdot \delta\right) \frac{C_{xi}}{C_{\text{уп}} + C_{xo}}, \tag{1}$$

где ΔF_x – сдвигающее усилие, приходящееся на элементы крепления, кгс; определяют по рекомендациям главы 1 работы [1] (при сдвиге груза вдоль вагона $\Delta F_x = \Delta F_{\text{пр}}$, при сдвиге груза поперек вагона $\Delta F_x = \Delta F_n$);

$C_{\text{уп}}$ – жесткость упорного элемента (упора в целом) по направлению действия силы ΔF_x, кгс/м; определяют экспериментально или, если это возможно, расчетным путем;

δ – величина зазора между грузом и упором, м;

C_{xi} – жесткость i-й растяжки по направлению действия силы ΔF_x, кгс/м; определяют по формуле:

$$C_{xi} = (E_i A_i / l_i) \cos\alpha_i \cdot \cos\beta_{xi}, \tag{2}$$

где E = 20000 кгс/мм^2 для стальных стержневых растяжек;

E = 1000 кгс/мм^2 для проволочных скрученных растяжек;

E имеет значения от 7000 до 17000 кгс/мм^2 [2] для растяжек из стальных канатов;

β_{xi} – угол между проекцией растяжки на горизонтальную плоскость (пол вагона) и осью X;

C_{xo} – обобщенная жесткость всех растяжек, работающих одновременно против действия силы ΔF_x, с учетом создаваемых ими сил трения между грузом и полом вагона, кгс/м; определяют по формуле:

$$C_{xo} = \Sigma[C_{xi} (\mu \sin\alpha_i + \cos\alpha_i \cdot \cos\beta_{xi})], \tag{3}$$

где μ – значение коэффициента трения между грузом и опорной поверхностью (полом вагона или подкладками под грузом).

Усилие $R_{\text{уп}}$, кгс, приходящееся на упор, определяют по формуле:

$$R_{\text{уп}} = \left(\Delta F_x - C_{xo}\delta\right) \frac{C_{\text{уп}}}{C_{\text{уп}} + C_{xo}} \le \left[R_{\text{уп}}\right], \tag{4}$$

где $[R_{уп}]$ – допускаемое усилие на упор, кгс.

Необходимый зазор δ, м, между грузом и упором рассчитывают по формуле:

$$\delta = \frac{\Delta F_x - \left[R_{уп}\right]}{C_{xo}} - \frac{\left[R_{уп}\right]}{C_{уп}}. \quad (5)$$

Если в качестве упора на платформе с деревянным или деревометаллическим настилом пола используют не упирающиеся в борта платформы деревянные бруски, прибиваемые к полу гвоздями, то все расчеты выполняют по формуле:

$$R_i = \left(\Delta F_x + C_{гво}\delta\right)\frac{C_{xi}}{C_{гво} + C_{xo}}, \quad (6)$$

где $C_{гво}$– обобщенная жесткость всех гвоздей ($n_{гв}$), работающих одновременно в сторону действия силы ΔF_x, кгс/м; определяют по уравнению:

$$C_{гво} = n_{гв} \cdot C_{гв}, \quad (7)$$

где $C_{гв}$ – жесткость одного гвоздя, кгс/м; рассчитывают по формуле:

$$C_{гв} \approx 12000d, \quad (8)$$

где d – диаметр гвоздя, мм;

$$n_{гв} = \frac{\Delta F_x - C_{xo}\delta}{\left[R_{гв}\right]} - \frac{C_{xo}}{C_{гв}}; \quad (9)$$

$$\delta = \frac{\Delta F_x - n_{гв}\left[R_{гв}\right]}{C_{xo}} - \frac{\left[R_{гв}\right]}{C_{гв}}, \quad (10)$$

Здесь $[R_{гв}]$ – допускаемое усилие на один гвоздь, кгс.

Если жесткость упора несоизмеримо велика по сравнению с обобщенной жесткостью растяжек ($C_{уп} >> C_{xo}$) и известно допускаемое усилие $[R_{уп}]$ на него (например, торцевые борта платформ, порожки и угловые стойки кузовов полувагонов и т. п.), то все расчеты можно выполнить по формулам:

$$R_{уп} \approx \Delta F_x - C_{xo}\delta \le \left[R_{уп}\right]; \quad (11)$$

$$\delta_{\min} \approx \frac{\Delta F_x - \left[R_{уп}\right]}{C_{xo}}; \quad (12)$$

$$R_i \approx \left(\Delta F_x - \left[R_{уп}\right]\right)\frac{C_{xi}}{C_{xo}}. \quad (13)$$

Если груз закреплен только растяжками из различных материалов (с различными значениями E_i), различной длины l_i, различного сечения A_i, с различными углами α_i° и β_{xi}°, то усилия R_i в каждой растяжке можно определить по выражению:

$$R_i = \Delta F_x \cdot K_{xi}, \quad (14)$$

где K_{xi} – безразмерный коэффициент, отражающий долю усилия ΔF_x, приходящуюся на i-ю растяжку; определяют по формуле:

$$K_{xi} = (C_{xi} / C_{xo}). \quad (15)$$

При закреплении груза только растяжками из одинаковой проволоки одного диаметра с различным количеством нитей ($n_{нi}$), различной длиной l_i, с различными углами α_i° и β_{xi}° (см. прил. № 8 ТУ [1]) значения K_{xi} для каждой растяжки можно определить по формуле:

$$K_{xi} = (C'_{xi} / C'_{xo}), \quad (15')$$

где C'_{xi} – характеристика жесткости i-й растяжки по направлению оси X, 1/м; определяют по формуле:

$$C'_{xi} = (n_{\text{н}i} / l_i) \cos\alpha_i \cdot \cos\beta_{xi}, \quad (16)$$

C'_{xo} – обобщенная характеристика жесткости всех растяжек вдоль оси X, работающих по направлению против силы ΔF_x с учетом создаваемых ими сил трения между полом вагона и грузом, 1/м; определяют по формуле:

$$C'_{xo} = \Sigma[C'_{xi} (\mu \sin\alpha_i + \cos\alpha_i \cdot \cos\beta_{xi})]. \quad (17)$$

Расчет элементов крепления от опрокидывания.

Единичный груз закреплен симметрично различными растяжками совместно с упорными элементами.

Усилие R_i^o, кгс, в рассматриваемой i-й растяжке от опрокидывания определяют по формуле:

$$R_i^o = \Delta M_o \cdot K_{\theta i}, \quad (18)$$

где ΔM_o – «избыточный» момент сил относительно ребра опрокидывания, воспринимаемый растяжками, кгс·м; определяют по рекомендациям гл. 1 работы [1]:

вдоль вагона –

$$\Delta M_o^{\text{пр}} = G_{\text{гр}} (1{,}25 a_{\text{пр}} h_{\text{цт}} - l_{\text{пр}}) - [R_{\text{уп}}] \cdot h_{\text{уп}}; \quad (19)$$

поперек вагона –

$$\Delta M_o^{\text{п}} = G_{\text{гр}} (1{,}25 a_{\text{п}} h_{\text{цт}} - b_n) + 1{,}25 W_{\text{п}} h_w - [R_{\text{уп}}] \cdot h_{\text{уп}}, \quad (20)$$

где $G_{\text{гр}}$ – вес груза, кгс;

$a_{\text{пр}}$ и $a_{\text{п}}$ – удельная, продольная и поперечная инерционная сила;

$h_{\text{цт}}$ – высота центра тяжести (ЦТ) груза над опорной поверхностью, м;

$l_{\text{пр}}$ и $b_{\text{п}}$ – кратчайшее расстояние от проекции ЦТ на горизонтальную плоскость до ребра опрокидывания вдоль и поперек вагона, м;

$W_{\text{п}}$ – ветровая нагрузка, действующая на боковую поверхность груза, кгс;

h_w – высота центра приложения ветровой нагрузки над опорной поверхностью груза, м;

$[R_{\text{уп}}]$ – допускаемое усилие на упор, препятствующий опрокидыванию груза, кгс; в первом приближении его значение следует принимать не более вычисленного по формуле (4), или не более ΔF_x;

$h_{\text{уп}}$ – высота упора, препятствующего опрокидыванию груза, м;

при $\Delta M_o \leq 0$ груз не подвержен опрокидыванию, т. е. устойчив;

$K_{\theta i}$ – размерный коэффициент, отражающий долю ΔM_o, приходящуюся на i-ю растяжку от опрокидывания груза, 1/м; определяют по формуле:

$$K_{\theta i} = (C_i / C_{\theta o})(l_{pi} \sin\alpha_i + h_{pi} \cos\alpha_i \cos\beta_{xi}), \quad (21)$$

где C_i – продольная жесткость i-й растяжки, кгс/м; определяется по уравнению:

$$C_i = E_i A_i / l_i; \quad (22)$$

$C_{\theta o}$ – обобщенный момент сил упругости (жесткости) всех рабочих растяжек относительно ребра опрокидывания, кгс·м; определяется по формуле:

$$C_{\theta o} = \Sigma[C_i (l_{pi} \sin\alpha_i + h_{pi} \cos\alpha_i \cos\beta_{xi})^2]; \quad (23)$$

l_{pi} – кратчайшее расстояние от места приложения усилия R_i^o i-й растяжки к грузу до вертикальной плоскости, проходящей через соответствующее ребро опрокидывания, м;

h_{pi} – высота места приложения усилия R_i^o i-й растяжки к грузу над уровнем опорной поверхности груза, м.

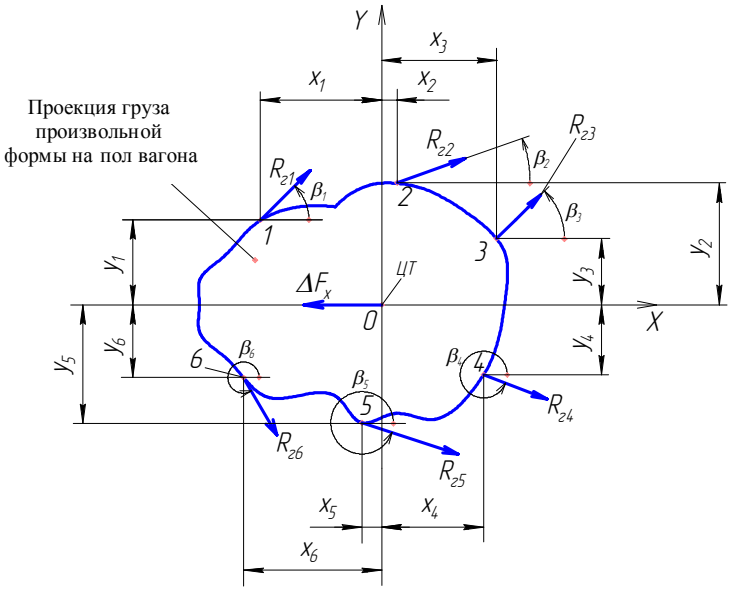
Расчет растяжек, закрепляющих устойчивый груз от сдвигов и разворота по полу вагона.

Устойчивый от опрокидывания единичный груз, закрепленный растяжками несимметрично (рисунок), под действием силы ΔF_x будет не только сдвигаться по ее направлению (по оси X), но и перемещаться перпендикулярно линии действия силы ΔF_x (по оси Y), а также разворачиваться вокруг ЦТ по полу вагона из-за несимметричного натяжения растяжек, вызывая тем самым перераспределение значений R_i за счет дополнительных приращений $\pm\Delta R_i$ усилий в растяжках в соответствии с требуемыми условиями (24) – (26) [4]:

$$\Sigma X = \sum_{i=1}^{n_p}\left[R_i\left(\mu\sin\alpha_i + \cos\alpha_i\cos\beta_{xi}\right)\right] - \Delta F_x = 0\,; \tag{24}$$

$$\Sigma Y = \sum_{i=1}^{n_p}\left(R_i\cos\alpha_i\sin\beta_{xi}\right) = 0; \tag{25}$$

$$\Sigma M_{\text{ЦТ}} = \sum_{i=1}^{n_p}\left\{R_i\left[X_i\cos\alpha_i\sin\beta_{xi} - Y_i\left(\mu\sin\alpha_i + \cos\alpha_i\cos\beta_{xi}\right)\right]\right\}, \tag{26}$$



Устойчивый от опрокидывания единичный груз, закрепленный растяжками несимметрично: $R_{ri} = R_i\cos\alpha_i$

где X – ось направлена вправо;

Y – ось направлена вверх;

ΔF_x направлена по оси X от ЦТ влево;

α_i – угол между i-й растяжкой и полом вагона (всегда положительный для работающих растяжек);

положительный угол β_{xi} измеряется от линии, параллельной оси X, начиная справа от проекции точки закрепления к грузу i-й растяжки на пол вагона, против часовой стрелки до направления проекции силы R_i на пол вагона;

X_i, Y_i – координаты проекции на пол вагона точки закрепления i-й растяжки к грузу, м; подставляются в уравнение (26) со своими знаками «+» или «–»;

n_p– количество растяжек, работающих одновременно против действия силы ΔF_x (проекции их сил на ось X направлены вправо).

Наиболее просто задачу по определению усилий R_i в растяжках можно решить методом последовательных (j-х) приближений по рекуррентным соотношениям.

Расчет усилий R_{ji} в каждой i-й растяжке в j-м приближении выполняется в следующей последовательности.

1. Определяют «избыточное» сдвигающее усилие ΔF_j^x, кгс, действующее на растяжки по оси X (по линии действия силы ΔF_x, кгс) по формуле:

$$\Delta F_j^x = \sum_{1}^{n_p}\left[R_{(j-1)i}\left(\mu\sin\alpha_i + \cos\alpha_i\cos\beta_{xi}\right)\right] - \Delta F_x\,, \tag{27}$$

где $R_{(j-1)i}$ – усилие в i-й растяжке, кгс, вычисленное в предыдущем приближении с учетом влияния смещения груза по оси Y и разворота его относительно проекции ЦТ на пол вагона. При этом следует иметь в виду, что в первом (j = 1) приближении $\Delta F_1^x = -\Delta F_x$, так как все $R_{0i} = R_{(1-1)\,i} = 0$.

2. Вычисляют приращения ΔR^x_{ji}, кгс, в растяжках по формуле:

$$\Delta R_{ji}^x = -\Delta F_j^x K_{xi}\,, \tag{28}$$

где K_{xi}– безразмерный коэффициент, определяемый по выражению:

$$K_{xi} = \frac{C_{xi}}{C_{xo}}; \tag{29}$$

C_{xi} – жесткость i-й растяжки, кгс/м, по направлению оси X; определяют по формуле:

$$C_{xi} = \frac{E_i A_i}{l_i} \cos\alpha_i \cos\beta_{xi}, \tag{30}$$

E_i – модуль продольной упругости материала i-й растяжки, кгс/мм^2: для стальных стержневых растяжек E = 20000 кгс/мм^2, для проволочных скрученных растяжек E = 1000 кгс/мм^2, для растяжек из стальных канатов E имеет значения от 7000 до 17000 кгс/мм^2 [2];

A_i –площадь поперечного сечения i-й растяжки, мм^2.

C_{xo} – обобщенная жесткость, кгс/м, всех растяжек, работающих одновременно в сторону действия силы ΔF_x (по оси X), с учетом создаваемых ими сил трения между грузом и полом вагона, кгс/м; определяют по формуле:

$$C_{xo} = \sum_{1}^{n_p} \left[C_{xi} \left(\mu \sin\alpha_i + \cos\alpha_i \cos\beta_{xi} \right) \right]. \tag{31}$$

3. Определяют усилия R_{jxi} в растяжках, кгс, с учетом приращений ΔR^x_{ji} по формуле:

$$R_{jxi} = R_{(j-1)i} + \Delta R^x_{ji}. \tag{32}$$

4. Определяют сдвигающее усилие ΔF^y_{jx}, кгс, действующее на растяжки вдоль оси Y (по линии, перпендикулярной линии действия ΔF_x) по уравнению:

$$\Delta F^y_{jx} = \sum_{1}^{n_p} \left(R_{jxi} \cos\alpha_i \sin\beta_{xi} \right). \tag{33}$$

5. Вычисляют приращения ΔR^y_{jxi}, кгс, в растяжках по формуле:

$$\Delta R^y_{jxi} = -\Delta F^y_{jx} K_{yi}, \tag{34}$$

где K_{yi} – безразмерный коэффициент, определяемый по выражению:

$$K_{yi} = \frac{C_{yi}}{C_{yo}}; \tag{35}$$

C_{yi} – жесткость i-й растяжки, кгс/м, по направлению оси Y; определяют по формуле:

$$C_{yi} = \frac{E_i A_i}{l_i} \cos\alpha_i \sin\beta_{xi}; \tag{36}$$

C_{yo}– обобщенная жесткость, кгс/м, по оси Y всех растяжек, препятствующих сдвигу груза в направлении силы ΔF_x; определяют по формуле:

$$C_{yo} = \sum_{1}^{n_p} \left(C_{yi} \cos\alpha_i \sin\beta_{xi} \right). \tag{37}$$

6. Определяют усилия R_{jxyi}, кгс, в растяжках с учетом приращений ΔR^y_{jxi} по формуле:

$$R_{jxyi} = R_{jxi} + \Delta R^y_{jxi}. \tag{38}$$

7. Определяют «вращающий» момент ΔM_{jxy}, кгс·м, действующий на растяжки, работающие в направлении силы ΔF_x, по формуле:

$$\Delta M_{jxy} = \sum_{1}^{n_p} \left\{ R_{jxyi} \left[X_i \cos\alpha_i \sin\beta_{xi} - Y_i \left(\mu \sin\alpha_i + \cos\alpha_i \cos\beta_{xi} \right) \right] \right\}. \quad (39)$$

8. Вычисляют приращения ΔR^M_{jxyi}, кгс, в растяжках по формуле:

$$\Delta R^M_{jxyi} = -\Delta M_{jxy} K_{Mi}, \quad (40)$$

где K_{Mi} – размерный коэффициент, 1/м, определяемый уравнению:

$$K_{Mi} = \frac{C_{Mi}}{C_{Mo}}; \quad (41)$$

C_{Mi} – характеристика момента силы упругости (жесткости) i-й растяжки, кгс; определяется по формуле:

$$C_{Mi} = \frac{E_i A_i}{l_i} \left(X_i \cos\alpha_i \sin\beta_{xi} - Y_i \cos\alpha_i \cos\beta_{xi} \right); \quad (42)$$

C_{Mo} – обобщенный момент сил упругости (жесткости), кгс·м, всех растяжек, работающих в направлении силы ΔF_x с учетом создаваемых ими сил трения между грузом и полом вагона; определяют по формуле:

$$C_{Mo} = \sum_{1}^{n_p} \left\{ C_{Mi} \left[X_i \cos\alpha_i \sin\beta_{xi} - Y_i \left(\mu \sin\alpha_i + \cos\alpha_i \cos\beta_{xi} \right) \right] \right\}. \quad (43)$$

9. Определяют результирующие значения усилий Rji в растяжках в j-м приближении по формуле:

$$R_{ji} = R_{jxyi} + \Delta R^M_{jxyi}. \quad (44)$$

10. Операции приближения осуществляют до тех пор, пока не будет выполняться с приемлемой точностью условие:

$$F^x_{jo} = \sum_{1}^{n_p} \left[R_{ji} \left(\mu \sin\alpha_i + \cos\alpha_i \cos\beta_{xi} \right) \right] \approx \Delta F_x. \quad (45)$$

Для практических целей вполне достаточно, когда F^x_{jo} отличается от ΔF_x не более чем на 1 %.

Тогда для соблюдения условия (24) окончательные значения усилий в растяжках можно рассчитать по формуле:

$$R_{(j+1)i} = \frac{\Delta F_x}{F^x_{jo}} R_{ji}. \quad (46)$$

В последнем приближении или значения $\Delta F^y_{(j+1)x}$ и $\Delta M_{(j+1)xy}$ практически равны нулю (близки к нулю), или значения $\Delta R^y_{(j+1)xi}$ и $\Delta R^M_{(j+1)xyi}$ практически уравновешивают друг друга.

11. Следует иметь в виду, что гибкие растяжки не могут работать на сжатие. Поэтому если в результате ближайшего приближения значение R_{ji} в какой-либо растяжке окажется отрицательным, то эту растяжку следует исключить из работы, а расчет выполнить заново, пересчитав соответствующим образом значения K_{xi} (29), K_{yi} (35) и K_{Mi} (41).

Таким же способом можно рассчитывать растяжки и при симметричных схемах закрепления единичного устойчивого от опрокидывания груза.

Следует отметить, что расчеты предлагаемыми способами являются проверочными. При отрицательных результатах они требуют повторных громоздких расчетов с измененными характеристиками элементов креплений, что вызывает определенные трудности для разработчиков не только в процессах вычислений вручную, но и при повторных вводах исходных данных, когда по различным причинам неизбежна ошибка оператора. Поэтому возникает

острейшая необходимость в автоматизации подобных расчетов, позволяющих не только облегчить вычислительные процессы, но и исключить вероятность ошибки при вводе многочисленных исходных данных для формирования расчетно-пояснительной записки.

Список литературы

1. Технические условия размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах [Текст] (ТУ № ЦМ-943). – М.: Юртранс, 2003. – 544 с.

2. Зылев, В. Б. Расчет элементов крепления в статически неопределимых схемах закрепления груза [Текст] / В. Б. Зылев, С. А. Егоров // Совершенствование эксплуатационной работы железных дорог / Сибирский гос. ун-т путей сообщения. Новосибирск, 2000. – С. 103 – 112.

3. Егоров, С. А. О расчете креплений груза в вагонах [Текст] / С. А. Егоров // Совер шенствование эксплуатационной работы железных дорог / Сибирский ун-т путей сообщения. – Новосибирск, 2004. – С. 80 – 84.

4. Егоров, С. А. Расчет усилий в статически неопределимых схемах растяжек, закрепляющих груз в вагоне от сдвигов и разворота [Текст] / С. А. Егоров // Совершенствование эксплуатационной работы железных дорог / Сибирский гос. ун-т путей сообщения. – Новосибирск, 2004. – С. 61 – 80.

УДК 656.027.3, 658.012

Д. А. Комсюкова, А. Н. Смердин, Ю. А. Усманов

ЧАСТНЫЕ ВОПРОСЫ ОРГАНИЗАЦИИ СКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ НА СИБИРСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ

В статье рассматриваются актуальные вопросы, связанные с организацией скоростного движения на реконструируемых участках. Описаны механизмы увеличения затрат на содержание и эксплуатацию линий при повышении скоростей движения. Проведен анализ методов расчета эффективности инвестиционных вложений в инфраструктуру, подвижной состав, а также в исследования их взаимодействия. Показана возможность снижения затрат на эксплуатацию при рациональном расходовании средств на мониторинг и испытания.

Наметившийся выход российской экономики из кризиса ставит перед железнодорожным транспортом Сибири ответственнейшие задачи: повышение массы грузовых поездов, увеличение скоростей движения, обеспечение ритмичности работы и, наконец, полное удовлетворение спроса грузоотправителей на перевозки. Решение перечисленных задач коренным образом влияет на эксплуатационные показатели железных дорог.

Повышение скоростей движения поездов порой ограничивается состоянием двух контактирующих систем: контактной сети и подвижного состава. Токоприемники электровозов в ходе эксплуатации получают повреждения, разрегулировки, износ. Неисправные токоприемники повреждают контактную сеть, что является причиной нарушения системы токосъема.

С другой стороны, состояние контактной сети на отдельных участках не отвечает требованиям эксплуатационной работы. Повышение масс поездов приводит к увеличению токовой нагрузки в контактной сети, и, как следствие, происходит обрыв струн и повреждение токоприемников.

По данным газеты «Транссиб» (№ 24 от 24 – 30.06.2011 г.) в Омском регионе Западно-Сибирской железной дороги за прошедшие пять месяцев 2011 г. было пропущено около 4,8 тыс. составов весом свыше 7 тыс. т и 1111 составов весом 9 тыс. т и более при среднем весе грузового поезда в Омском регионе 4,4 тыс. т. Работа по организации обращения поездов по-

вышенной массы и длины подвижного состава на Западно-Сибирской железной дороге будет продолжаться, что будет способствовать повышению пропускной способности железных дорог в целом.

Затраты при оценке эффективности проектов в железнодорожном строительстве включают в себя инвестиционные вложения и эксплуатационные расходы (текущие издержки) с учетом налогов и процентных ставок за кредиты.

Неудовлетворительное качество токосъема приводит к увеличению износа контактных проводов в 2 – 3 раза, а также снижает срок службы токоприемников в 1,5 – 2 раза, что в масштабах пассажирского и грузового движения, по экспертным оценкам, приносит ущерб более 1 млрд р. в год.

В нескольких организациях в России и за рубежом разрабатываются способы диагностики токосъемных устройств по видеоинформации. Шведская компания Sensys разработала систему автоматического мониторинга токоприемника, позволяющую регистрировать изображение приближающегося токоприемника при помощи цифрового фотоаппарата. На основании полученных снимков происходит определение исправности токосъемных пластин токоприемника.

Основным недостатком существующих систем является необходимость контроля процесса оператором. Этот способ отличается высокой трудоемкостью, недостаточными точностью, эффективностью и информативностью.

Известны также работы ученых СамГУПСа, посвященные данной проблеме [1]. Однако в настоящее время в России не существует эффективной системы автоматизированного контроля исправности токоприемников при выходе из депо и на перегонах.

Внедрение стационарного комплекса для контроля исправности токоприемников электроподвижного состава планируется осуществлять с привлечением средств госбюджета, собственных средств ОАО «РЖД», долгосрочных кредитов и средств акционеров.

Отказы технических средств на магистральных участках железных дорог наносят не только значительный экономический ущерб и нарушение непрерывного процесса производства в смежных отраслях, но и могут сопровождаться загрязнением окружающей среды, возникновением пожаров и даже человеческими жертвами.

При обнаружении дефектов технических средств возникает необходимость в обосновании тех или иных способов восстановления работоспособности магистральных участков железных дорог (капитальный или выборочный ремонт дефектов, подлежащих немедленному устранению, расположенных на значительном удалении друг от друга).

Одной из проблем оценки экономической эффективности инновационного проекта является проблема расчета и учета стоимости предотвращенных расходов. Если в результате применения нового технического средства предотвращен отказ оборудования, то рассчитать экономический эффект сложно, так как основа расчета – затраты на восстановление работоспособности оборудования, поврежденного в результате отказа. Не имея точных данных об объемах повреждений, нельзя предположить и объем затрат, связанных с ликвидацией последствий повреждений.

Для оценки затрат, связанных с ликвидацией аварийных ситуаций, предлагается руководствоваться статистическими данными, которые могут быть получены из отчетов служб электроснабжения. Так, например, из анализа работы службы электроснабжения Западно-Сибирской железной дороги в 2008 г. следует, что допущено 50 отказов в работе различного оборудования системы токосъема [2].

Одним из перспективных направлений финансирования в любой сложной системе является развитие диагностической подсистемы. Диагностика в энергетике железнодорожного транспорта имеет ряд особенностей, связанных с обеспечением постоянной работоспособности диагностируемого узла и с затруднением вывода его в ремонт, поэтому широкое распространение получили устройства для бесконтактного (дистанционного) контроля и проверки.

Большое число готовых технических решений, предназначенных, например, для дистанционного определения мест перегрева и, следовательно, плохого контакта либо перегрузки,

позволяет подобрать вариант для решения любой технической задачи, однако богатство выбора делает его достаточно сложным, особенно с учетом нынешней экономической ситуации.

Если считать, что применение тепловизионного контроля предотвратит отказы оборудования, позволит выявить остродефектные места, устранить их до возникновения аварийной ситуации и тем самым минимизировать затраты на ремонт и восстановление, то экономический эффект будет рассчитываться как разница между затратами на диагностику плюс предупредительный ремонт и затратами на восстановительные мероприятия.

Очевидно, что из года в год количество повреждений меняется: уменьшается из-за постоянного ввода новых технических средств, увеличивается из-за морального и материального износа находящихся в эксплуатации. Однако зная этапы жизненного цикла основных технических средств, которые применяются в том или ином энергетическом хозяйстве, можно прогнозировать периодичность увеличения и снижения выхода из строя и нарушения в нормальной работе того или иного вида оборудования. С учетом этих знаний можно закладывать в наш расчет коэффициент, значение которого должно выбираться с учетом срока службы того или иного оборудования.

Применение любых технических решений можно обосновать экономически исходя из возможности предотвращения этими техническими решениями всех ситуаций, которые возникали в предыдущие годы, потому что ущерб от каждой аварийной ситуации значительно превышает стоимость одного или даже целой серии приборов. Вместе с тем, как правило, применение новых приборов не гарантирует автоматически исчезновения таких ситуаций. Действительное снижение аварийности и частоты выхода из строя того или иного устройства системы электроснабжения может подтвердиться только в прошедшем периоде, т. е. экономический эффект от внедрения может быть подсчитан после внедрения технического средства.

Эффективность инновационного проекта в данной отрасли может быть оценена с различных позиций, в том числе с технической, технологической, экологической, социальной, организационной. Однако важнейшим критерием для обоснования эффективности проекта служат экономические показатели. От правильной и объективной оценки эффективности реальных инвестиций зависят сроки возврата вложенного инвестором капитала и перспективы развития отрасли в целом [3].

Поскольку большинство инвестиций являются долгосрочными, то при оценке инновационных проектов следует учитывать:

а) временную стоимость денег (с течением времени деньги теряют свою стоимость вследствие инфляции);

б) рискованность проектов (чем длительнее срок окупаемости, тем выше риск);

в) привлекательность проекта по сравнению с альтернативными вариантами с точки зрения максимизации дохода.

Эффективность инвестирования определяется прежде всего соотношением результатов осуществления проекта и затрат, необходимых для достижения этих результатов. Необходимым критерием принятия инновационного проекта является положительное значение накопленного потока наличности на любом шаге расчетного периода. Появление отрицательных значений свидетельствует о дефиците финансирования.

Реализации любого инновационного проекта в условиях рыночной экономики должно предшествовать решение двух взаимосвязанных методических задач:

1) оценка выгодности каждого из возможных вариантов осуществления проекта;

2) сравнение вариантов и выбор наилучшего из них.

В состав затрат проекта, как правило, включаются предусмотренные в проекте и необходимые для его реализации текущие и единовременные затраты всех участников осуществления проекта, исчисленные без повторного счета одинаковых затрат одних участников в составе результатов других участников.

В настоящее время разработано несколько основных методов определения экономической эффективности инвестиционной деятельности, которые можно подразделить на два

больших класса: простые методы и методы дисконтирования.

Так как значительная продолжительность жизненного цикла инноваций приводит к экономической неравноценности осуществляемых в разное время затрат и получаемых результатов, предлагается применять метод дисконтирования для оценки эффективности инвестиций в технические средства.

Для приведения разновременных затрат, результатов и эффекта, как правило, используется норма дисконта E, равная приемлемой для инвестора норме дохода на капитал. Для дисконтирования разновременные затраты, результаты и эффект умножаются на коэффициент дисконтирования α_t, определяемый для постоянной нормы дисконта E.

Внутренняя норма доходности (ВНД) представляет собой ту норму дисконта $E_{ВН}$, при которой величина приведенных эффектов равна приведенным капиталовложениям.

В случае, когда ВНД равен или больше требуемой инвестором нормы дохода на капитал, инвестиции в данный проект оправданны и может рассматриваться вопрос о его принятии. В противном случае инвестиции в данный проект должны быть обоснованы технической необходимостью.

Срок окупаемости – период, начиная с которого первоначальные вложения и другие затраты, связанные с инвестиционным проектом, покрываются суммарными результатами его осуществления. Срок окупаемости рекомендуется определять с использованием дисконтирования.

Инновационные мероприятия, связанные с разработкой, например, нового метода дистанционного диагностирования, можно свести к следующим этапам:

фундаментальные научные исследования и нахождение нового технического решения, позволяющего качественно поднять эксплуатационные характеристики разрабатываемого метода или технического решения;

проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок (НИОКР), позволяющих отработать на макетах и прототипах найденные на предыдущем этапе решения;

освоение опытного образца, необходимого для проведения всесторонних испытаний;

налаживание серийного производства продукции тиражом, необходимым заказчику.

Особенную сложность представляют собой первые два этапа, так как затраты на фундаментальные и опытно-конструкторские исследования не могут принести доход в краткосрочной перспективе. Однако проведение заключительных этапов без них невозможно. В силу специфики некоторых задач, стоящих перед исследовательской организацией, результаты выполненных на первых двух этапах работ могут оказаться неудовлетворительными, приводящими к остановке проекта. В таком случае организация понесет убытки, так как выпуска продукции не будет.

Интеграция научно-исследовательских институтов с производственными предприятиями, заинтересованными в производстве наукоемкой продукции, позволила бы менее осторожно развивать поисковые направления, позволяющие в конечном итоге получить определенное техническое и экономическое преимущество над фирмами, использующими проверенные временем технологии.

В настоящее время распространена практика возложения затрат, связанных с фундаментальными и опытно-конструкторскими исследованиями, на специализированные фирмы, занимающиеся разработкой и выпуском наукоемкой продукции. Конечный потребитель такой продукции оплачивает эти затраты опосредованно (они учтены в стоимости продукции).

В смежных отраслях широко используется аренда дорогостоящей техники, применяются лизинговые схемы дооснащения предприятий наукоемкими устройствами технической диагностики и другими инновационными проектами. Некоторое повышение затрат на этапе приобретения компенсируется возможностью в ходе пробной эксплуатации убедиться в эксплуатационных качествах закупаемой продукции.

При оценке инвестиционных проектов используются показатели общественной и коммерческой эффективности.

Показатели общественной эффективности применяются, как правило, для народнохозяйственных и крупномасштабных проектов. Показатели общественной эффективности

инвестиций учитывают затраты и результаты, допускающие стоимостное измерение последствия осуществления инвестиционного проекта для общества в целом, затраты и результаты в смежных секторах экономики, а также экологические и социальные эффекты, выходящие за пределы финансовых интересов участников инвестиционного проекта.

Показатели коммерческой эффективности, используемые в настоящее время для обоснования большинства инвестиционных проектов на железнодорожном транспорте, учитывают непосредственно финансовые интересы участников реализации инвестиционного проекта.

Показатели общественной эффективности инвестиционных проектов на железнодорожном транспорте могут рассчитываться на народнохозяйственном, региональном и отраслевом уровнях.

При расчете показателей общественной эффективности на народнохозяйственном и региональном уровнях учитываются как результаты, достигаемые непосредственно на железнодорожном транспорте, так и внетранспортные результаты реализации проектов.

Необходимо разработать систему контроля состояния токоприемников путем фиксации изображения проходящего локомотива в контрольных точках с выводом видеоинформации к энергодиспетчеру, в границах которого находится контрольная точка.

Предлагаемый стационарный комплекс для контроля исправности токоприемника для электроподвижного состава, установленный на выходе из депо или в начале перегона, позволит в автоматическом режиме или под контролем оператора оценивать ряд важнейших параметров токоприемников, расположенных на движущемся электроподвижном составе со скоростью до 20 км/ч.

В качестве способа измерения геометрических параметров и определения технического состояния контактных пластин токоприемников электроподвижного состава может применяться цифровая система технического зрения. Основным преимуществом данной системы является бесконтактный способ измерения, позволяющий выполнять регистрацию без влияния на исследуемый объект с необходимой степенью электробезопасности персонала.

Если один или несколько параметров выходят за пределы допустимых значений, соответствующая запись вносится в базу данных, а на диспетчерский пульт и локомотивной бригаде поступает сигнал о неисправности.

Внедрение стационарного комплекса для контроля исправности токоприемников электроподвижного состава позволит снизить повреждаемость системы токосъема за счет предотвращения эксплуатации неисправных токоприемников и таким образом повысить надежность и безотказность перевозок пассажиров и грузов ОАО «РЖД».

Анализ эксплуатационной документации [2] показал возможность снижения износа контактных проводов минимум на 20 % (в зависимости от участков), снизить повреждаемость инфраструктуры системы токосъема в среднем на 50 %, уменьшить расход токосъемных накладок токоприемника на 30 % с соответствующим увеличением межремонтного интервала. Указанный эффект достижим при размещении разрабатываемых комплексов при выходе электроподвижного состава из депо, а также в начале и в конце скоростных перегонов.

В соответствии с программой развития скоростного и высокоскоростного движения на сети железных дорог России до 2018 г. необходимо оснастить подобным комплексом магистрали, связывающие Москву, Санкт-Петербург, Калининград, Казань, Нижний Новгород, Самару, Волгоград, Ярославль, Краснодар, Ростов-на-Дону, Сочи, Екатеринбург.

Список литературы

1. Гаранин, М. А. Распознавание проводов контактной сети по измерениям бесконтактных лазерных сканеров [Текст] / М. А. Гаранин, А. Г. Бахрах, С. А. Митрофанов // Актуальные проблемы проектирования и эксплуатации контактных подвесок и токоприемников электрического транспорта: Сб. науч. ст. / Омский гос. ун-т путей

сообщения. – Омск, 2011. – 238 с.

2. Анализ работы хозяйства электрификации и электроснабжения в 2010 году / ЦЭ ОАО «РЖД» [Текст]. – Новосибирск. 2011 г. – 122 с.

3. Проектно-сметное дело в железнодорожном строительстве: Учебник [Текст] / Б. А. Волков, Т. А. Беляев и др. – М.: Желдориздат, 2000.

УДК 340.132.2:351.812.5:341.1/8

В. А. Троицкий

ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ И СТАНДАРТЫ В ПРОЦЕССЕ МЕЖДУНАРОДНОЙ ИНТЕГРАЦИИ СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

В статье рассмотрены проблемы статуса и содержания технических норм, опосредующих процесс строительства и эксплуатации объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта. Особое внимание уделено вопросам унификации и гармонизации технических правил государств в ходе международной интеграции транспортных систем.

Унификация и гармонизация технических стандартов при создании общих рынков транспортных услуг и единого транспортного пространства – необходимый элемент формирования любого интеграционного объединения. Для Российской Федерации это приобретает особое значение в свете развития и интернационализации систем железнодорожного транспорта, которые происходят на глобальном, региональном и локальном уровнях. Если говорить о глобальном уровне, то институциональной формой такой деятельности можно считать участие России в работе Экономического и социального совета ООН, в особенности его вспомогательных органов – Комитета по стандартизации ООН и региональных экономических комиссий, которые имеют в своей структуре профильные подкомитеты по железнодорожному транспорту, призванные развивать транспортные системы как ключевой фактор устойчивого развития: членство в Международной организации стандартизации (ИСО), сотрудничество России с Всемирной торговой организацией (ВТО) в целях гармонизации внутреннего законодательства с Генеральным соглашением по тарифам и торговле 1947 и 1994 гг. (ГАТТ 47, 94), Соглашением по техническим барьерам в торговле 1996 г.

На региональном уровне Российская Федерация развивает сотрудничество по гармонизации технических норм, связанных с деятельностью железнодорожного транспорта в рамках Содружества Независимых Государств (СНГ), участвуя в работе Координационного транспортного совещания стран СНГ, в рамках ЕврАзЭС и деятельности Евро-Азиатского транспортного союза, а также в ходе технического сотрудничества с Европейским союзом, Европейской конференцией министров транспорта, Шанхайской организацией сотрудничества (ШОС).

Под локальным уровнем транспортной интеграции следует понимать сотрудничество двух или нескольких государств в этой сфере. Такая форма сотрудничества представляется наименее эффективной. В то же время деятельность государств в этой сфере ведется. Примерами могут быть соглашения между Российской Федерацией, Республикой Беларусь, Республикой Казахстан и Кыргызской Республикой о формировании транспортного союза от 22 января 1998 г. или Соглашение между Китайской Народной Республикой и Республикой Казахстан о сотрудничестве в области железнодорожного транспорта от 14 мая 2004 г.

С точки зрения конвенционного (нормативно-правового) механизма задача унификации и гармонизации технических стандартов в области железнодорожного транспорта находит свое выражение в международных договорах, подписываемых сторонами, а также в актах внутреннего законодательства.

При этом два названных процесса – унификация и гармонизация технических стандартов в области железнодорожного транспорта, хоть и являются оба следствием интернационализации технического права, тем не менее различаются по своему содержанию.

Унификация технических норм – это создание одинаковых, т. е. единообразных по своему содержанию стандартов, регламентов и иных технических норм двух или нескольких государств. Гармонизация технического права – это процесс, направленный на уменьшение различий в нормативно-техническом регулировании государств. Существенное отличие этих двух безусловно сонаправленных процессов – в отсутствии международно-правовых обязательств государств по гармонизации и наличии договорной формы обязательств по унификации.

Особенность системы технического регулирования железнодорожного транспорта заключается в сложности и взаимосвязанности самого комплекса железнодорожной инфраструктуры. Упрощая это утверждение до прикладных примеров, можно говорить о том, что велосипед, собранный в противоречие нормам ГОСТ Р 52111-2003 (Велосипеды. Общие технические условия) с применением нестандартных болтов, скорее всего поедет, а указанные технические нормы лишь облегчают процесс кооперации предприятий при производстве. Поезд же, изготовленный для колеи 1520, не поедет по колее 1435. Несомненна важность двух проявлений интернационализации технико-правового регулирования на железной дороге, которые представляются ключевыми целями интеграции транспортных систем Российской Федерации и государств-партнеров.

Независимо от приоритетности одного из названных проявлений деятельность государств в этой области следует рассматривать не только с точки зрения приведения к единообразию «результата», т. е. текста нормативно-технических актов, регулирующих процессы, связанные с железнодорожным транспортом, но и процесса, т. е. унификации или гармонизации процедуры принятия технических норм в государствах. Сказанное обосновывает необходимость рассмотрения правогенеза технического регулирования в России и государствах, объединениях государств, с котороми осуществляется интеграция железнодорожно-транспортных комплексов. В рамках настоящей статьи будут рассмотрены способы создания и формы закрепления технических норм в странах СНГ (в первую очередь ЕврАзЭС) и Европейского союза.

В СССР техническое регулирование являлось сферой деятельности государства, действовала трехуровневая система технических норм, где по нисходящей шкале по степени важности выделялись государственные стандарты, отраслевые стандарты и регламенты предприятий. Последние хоть и не принимались органами государства непосредственно, тем не менее в условиях полного огосударствления хозяйствующих субъектов опосредованно являлись выражением воли государства. Россия в 1991 г., равно как и государства, ставшие членами Содружества Независимых Государств, унаследовала советскую систему технического регулирования, принципы построения которой входили в противоречие с новой экономической политикой и рыночной экономикой. Исходя из охарактеризованного подхода место технического регулирования в системе национального права можно было бы определить как комплексную подотрасль административного права.

В правовой системе Европейского союза, где в экономике традиционно господствовали принципы рыночной экономики, а в праве доминировал принцип диспозитивности, сложилась принципиально иная система технического регулирования, где основным субъектом нормотворчества выступают отраслевые союзы и объединения, а не государство. В отличие от советского подхода, стандартизация в Европе – это задача, решение которой берут на себя заинтересованные стороны и которая всем приносит выгоду в той или иной форме. Она выражается в первую очередь в активности хозяйствующих субъектов, их ассоциаций и сообществ, прочих организаций третьего сектора, и уже во вторую очередь – в участии правительства в таких секторах, как безопасность, государственная политика по управлению эффективностью, поддержка качества, защита интересов потребителей, защита окружающей среды. Так, одним из основных принципов технического регулирования в Германии, закрепленном в DIN 820, наряду с гласностью и добровольностью является участие всех заинтере-

сованных сторон, равноправие всех участвующих в стандартизации юридических лиц. Подтверждением сказанного является и статус структур, управляющих созданием технических норм и стандартов. Французская ассоциация по стандартизации (AFNOR), Немецкий институт стандартизации (DIN), Ассоциация по стандартизации и сертификации Испании (AENOR), Австрийский институт стандартов (ON) и т. д. – все это негосударственные организации, которым государством делегирована такая важная функция, как разработка технических норм и стандартов. Аналогичный подход отражен и в общеевропейских документах по техническому регулированию. Однако сказанное не означает полного ухода государств региона из сферы европейского технического регулирования. Можно выделить три прямых исключения из охарактеризованного подхода. Во-первых, ряд европейских государств имеют государственную систему технического регулирования и стандартизации. Так, в Люксембрге проблемами стандартизации занимается Государственная служба энергетики Люксембурга (SEE), а в Эстонии – Департамент стандартов правительства Эстонии (EVS). Отметим, что названные государства заявляют о реформировании своей системы технического регулирования и постепенном уменьшении роли гоударства в ней. Во-вторых, в ряде сфер, связанных с необходимостью обеспечения безопасности населения, охраны окружающей среды, защиты публично-правовых интересов, сохранена система государственного технического регулирования путем принятия обязательных к исполнению технических норм. В-третьих, несмотря на то, что основными участниками процесса создания технических норм являются субъекты частного права, государство, тем не менее, формирует общие правила их доступа к такого рода нормотворческой деятельности, тем самым санкционируя эти нормы.

Существуют значительные особенности технико-правового регулирования в сфере железнодорожного транспорта. Сам транспорт и железнодорожная инфраструктура являются, с одной стороны, объектами повышенной опастности, а с другой стороны, областью, имеющей стратегическое значение для интересов государства. В то же время правоотношения, которые возникают в сфере железнодорожных перевозок, строительства и эксплуатации объектов инфраструктуры, носят приоритетно коммерческий, т. е. частноправовой характер.

Вопрос об отнесении технических норм в целом и технических норм в сфере регулирования железнодорожного транспорта к публичному или частному праву следует считать весьма актуальным. Значимость этого деления для методологии правового регулирования, правоприменения и толкования трудно переоценить. Как уже отмечалось, традиционно в отечественной доктрине техническое регулирование рассматривалось исключительно как функция государства. После вступления в силу ФЗ «О техническом регулировании» от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ ситуация стала меняться, появились двухзвенная система технических норм и разделение на обязательно применимые и добровольные. Аналогичные реформы были проведены в Казахстане, Киргизии, Белоруссии, Украине и в ряде других стран СНГ. Так, приняты новые нормативные акты: закон Республики Казахстан «О техническом регулировании»; законы Украины «О стандартизации», «О подтверждении соответствия» и «О стандартах, технических регламентах и процедурах оценки соответствия»; законы Республики Беларусь «О техническом нормировании и стандартизации» и «Об оценке соответствия требованиям технических нормативных правовых актов в области технического нормирования и стандартизации»; закон Республики Молдова «Об оценке соответствия»; закон Кыргызской Республики «Об основах технического регулирования в Кыргызской Республике»; законы Республики Армения «О стандартизации» и «Об оценке соответствия». Большинством государств СНГ провозглашены цели интеграции в пространство технического регулирования ЕС и ВТО, и на основании принятых новых нормативных актов, которые основывались уже на европейских принципах технического регулирования, ведется поэтапная реформа системы технического регулирования, одним из основных проявлений которой является процесс уменьшения роли государства при формировании технических норм. Исходя из сказанного в структуру технического регулирования в России и большинстве стран СНГ входят следующие подгруппы норм: обязательные к применению государственные технические регламенты, обеспечивающие жизнь и здоровье граждан, экологическую безопасность и ос-

новные права потребителей; технические стандарты разных уровней, применяемые добровольно, принимаемые специальным органом государства, но с активным привлечением к их созданию отраслевых объединений и иных заинтересованных лиц, направленные на повышение эффективности хозяйственной деятельности и улучшение качества выпускаемой продукции, оказываемых услуг и иные технические нормы. Последние – самая сложная и разнообразная категория норм, включающая в себя стандарты организаций, стандарты научно-технических обществ и других общественных объединений, в частности, саморегулируемых организаций.

Если провести поверхностный диахронный компаративный анализ системы технического регулирования в большинстве стран Европы и системы, к построению которой стремятся многие страны СНГ, включая Российскую Федерацию, можно говорить о том, что они схожи, но имеют одно существенное отличие. Это отличие заключается в институциональной форме регулирования процесса стандартизации, т. е. второй группы технических норм, объединяемых в большинстве стран СНГ понятием «технические стандарты». Если в большинстве европейских стран добровольно применяемые стандарты создаются негосударственными структурами и лишь санкционируются государством, то в России и ряде стран СНГ стандарты создаются и принимаются органами государства в области стандартизации с привлечением к их разработке отраслевых объединений и иных заинтересованных лиц.

Ситуация в сфере технического регулирования железнодорожного транспорта характеризуется значительным своеобразием, обусловленным самой сецификой этого вида сообщения.

В СССР традиционно железнодорожный транспорт рассматривался как самостоятельная отрасль народного хозяйства. Техническим регулированием как одним из механизмов управления огромной системой занималось Министерство путей сообщения. Таким образом появлялись акты технического регулирования, которые по правовой природе являлись отраслевыми техническими нормами. Постановлением Правительства Российской Федерации № 585 от 18.09.2003 было создано открытое акционерное общество «Российские железные дороги», одной из задач которого в соответствии с п. 10 Устава стало обеспечение единой технической политики. Одним из элементов технической политики является и внутрикорпоративное техническое регулирование, т. е. с точки зрения принципов ФЗ «О техническом регулировании» – создание технических стандартов предприятия и иных внутренних технических норм «РЖД». Фактическое положение дел с техническим регулированием в сфере железнодорожного транспорта в России существенно отличается от идеологии, заложенной в ФЗ «О техническом регулировании». Железнодорожный транспорт и его инфраструктура – объекты повышенной опасности, с одной стороны, стратегической значимости, с другой, и организация, оказывающая услуги миллионам потребителей ежегодно, с третьей. От его нормального, безаварийного функционирования и успешного развития зависят жизнь и здоровье людей, обеспечение военно-стратегической и экономической безопасности государства, защита окружающей среды. То есть регулятивное воздействие, направленное на непрерывное нормальное функционирование и развитие железнодорожного транспорта, – область публичного интереса, следовательно, она должна входить в объем предмета публичных отраслей права. Все это обосновывает необходимость регулирования большей части рассматриваемых общественных отношений в технической сфере путем принятия технических регламентов или иных обязательных технических норм, исходящих от государства в лице его уполномоченных органов. Отметим, что так как железнодорожный транспорт – сложная единая система, включающая в себя подвижной состав, инфраструктуру, непосредственно связанную с движением (путевое хозяйство, контактную сеть, устройства СЦБ и др.), и вспомогательную инфраструктуру, вопрос обеспечения работы этого вида транспорта – вопрос обеспечения работы всех элементов названной системы. Ситуацию с распространением категории «публичный интерес» не стоит абсолютизировать. Большая разновидность общественных отношений в технической сфере на сетях железных дорог не влияет на безопасность жизнедеятельности, экологию и даже права потребителей. Скажем, технические нормы, утверждающие стандарты окраски подвижного состава или корпоративный стандарт оформления стан-

ций не оказывают прямого влияния на названные объекты публичного интереса и безусловно не относятся к сфере компетенции государственного технического регулирования. Однако большая часть технических правил, регулирующих вопросы строительства объектов инфраструктуры, производства и эксплуатации оборудования, комплектующих и подвижного состава, действующих на сети железных дорог, как раз и имеет целью обеспечение названных выше публичных интересов государства. В этом смысле большинство технических норм в названной области должны относиться к административному праву. Однако на практике мы наблюдаем несколько иную картину.

В настоящее время можно выделить четыре основных группы технических норм, применяемых в сфере строительства и эксплуатации железнодорожных объектов в России. Первая – универсальные нормативные акты, т. е. акты технического регулирования, не созданные исключительно для применения в связи с функционированием данной транспортной системы.

Вторая группа – специальные акты – законы и акты правительства Российской Федерации, к которым, в частности, относится Федеральный закон «О железнодорожном транспорте», постановление правительства РФ от 15 июля 2010 г. № 525 «Об утверждении технического регламента о безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта», № 524 «О безопасности железнодорожного подвижного состава», № 533 «О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта» и др. К этой же группе относятся и продолжающие действовать акты государственного технического регулирования СССР и Российской Федерации, принятые до вступления в силу ФЗ «О техническом регулировании» 2004 г. (ГОСТ, СНиП).

Третья группа – отраслевые акты технического регулирования, издаваемые органами государства. Отраслевые акты в сфере технического регулирования железнодорожного транспорта до 2004 г. принимались государством в лице Министерства путей сообщения, совмещавшего в одном лице хозяйствующего субъекта и регулятора. Нормотворчество МПС представляло собой многообразную, но согласованную и иерархичную линейку нормативных актов, включавшую в себя нормативные акты Министерства и его подразделений – департаментов и, в некоторых случаях, территориальных подразделений – дорог. После создания ОАО «РЖД» с точки зрения действующей в России доктрины технического регулирования функции регулятора должны были перейти к Министерству транспорта и созданному в его структуре Федеральному агентству железнодорожного транспорта (Росжелдору). Данный орган исполнительной власти действительно выполняет ряд функций в области технического регулирования, в частности, организует работу по стандартизации и подтверждению соответствия, для чего в рамках агентства создан регистр сертификации на федеральном железнодорожном транспорте. Однако значительная часть функций в сфере государственного технического регулирования, которая принадлежала МПС, ФАЖТ не перешла. В этой связи, особого внимания заслуживает четвертая группа технических норм в рассматриваемой области – акты ОАО «РЖД».

С точки зрения доктрины технического регулирования, заложенной в основу ФЗ «О техническом регулировании», все процессы, напрямую затрагивающие жизнь и здоровье людей, безопасность государства и права потребителей, должны регулироваться техническими регламентами, которых на данный момент принято три и которые вступят в силу через три года после их опубликования, т. е. в июле 2013 г. В развитие данных регламентов должны приниматься технические стандарты добровольного применения, и эта работа, как было отмечено выше, координируется Росжелдором. А вопросы, напрямую не влияющие на безопасность государства, жизнь и здоровье людей и права потребителей, сопутствующие решению технологических и организационно-технические задач производства (оказания услуг), должны регулироваться внутрикорпоративными техническими нормами. Можно ли говорить о том, что нормы, принимаемые подразделениями ОАО «РЖД», не являются охранительными и не оказывают прямого влияния на названные объекты публичного интереса государства? Трудно сформулировать однозначный ответ на этот вопрос по причине многообразия видов технических норм, принимаемых РЖД, и объектов, на которые направлено их регулятивное воздействие, поэтому более корректной будет следующая формулировка исследуемой проблематики: существуют ли технические нормативные акты ОАО «РЖД»,

оказывающие прямое влияние на жизнь и здоровье людей, безопасность государства или охраняемые государством права потребителей? Для ответа на этот вопрос рассмотрим некоторые примеры объектов правовой охраны, которые включены в технический регламент Российской Федерации «О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта», с целью провести функциональный сравнительный анализ с объектами, не попавшими под регулятивное воздействие названного регламента, но в отношении которых действуют нормы ОАО «РЖД». Рассмотрим систему токосъема, в которой участвует контактная сеть и токоприемники подвижного состава. Технический регламент регулирует и требует обязательного подтверждения соответствия техническим нормам опор контактной сети, контактного провода и токоприемников. В то же время, по мнению многих специалистов [1, 4, 5], контактная сеть и токоприемник являются единой системой, обеспечивающей токосъем для электропоездов, и подход к обеспечению безопасности, работоспособности и надежности этой системы возможен только комплексный. Такой подход представляется технически оправданным, неработоспособность или недостаточная надежность отдельных элементов может привести к выходу из строя системы в целом. Важность применения надежных и надлежащих типов консолей, стыковых зажимов, несущего троса эквивалентна важности применения надлежащего контактного провода, опор или токоприемника, последствия выхода из строя любого из названных элементов могут быть также эквивалентны. Следовательно, и подход к обеспечению безопасности всей системы также должен быть комплексным, одинаковым должен быть уровень требований к надежности и безопасности отдельных элементов системы и к системе контроля качества. Все это не дает оснований говорить о технических правоотношениях, являющихся предметом регулирования технических нормативных актов «РЖД», как о «не имеющих прямого отношения к защите жизни и здоровья людей, безопасности государства и правам потребителя», т. е., с точки зрения предмета и объекта правового регулирования не позволяет охарактеризовать данные нормы как внутрикорпоративные. Тем не менее источники права именно этого вида – нормативные акты юридических лиц – содержат основной объем такого рода технических норм, регулирующих вопросы строительства и эксплуатации системы электрификации на российском железнодорожном транспорте. Названная проблема поднималась в 2006 г. в «Концепции развития системы технического регулирования на железнодорожном транспорте», разработанной Департаментом государственной политики в области железнодорожного транспорта Министерства транспорта Российской Федерации.

Можно ли говорить о том, что рассмотренная ситуация является опасной и требует безусловного государственного регулятивного вмешательства путем срочного принятия новых государственных технических стандартов в рассматриваемой области? Представляется необходимым рассмотреть три аспекта данной проблемы: особенности исторических причин формирования действующей системы технико-правового регулирования на железнодорожном транспорте, последствия существования данной системы, правовая оценка статуса внутрикорпоративных технических норм ОАО «РЖД».

Сложный процесс создания на базе Министерства путей сообщения Российской Федерации коммерческой организации в форме открытого акционерного общества выразился на первом этапе в рецепции структуры и, как следствие, основных функций «РЖД» от министерства. Стали сотрудниками «РЖД» и большинство сотрудников МПС. В сложившейся ситуации функции технического регулирования, выражавшиеся в большом объеме каждодневной работы высококвалифицированных технических специалистов, просто некому было на себя взять кроме тех же людей, которые осуществляли эту деятельность ранее, т. е., сотрудников подразделений ОАО «РЖД», между которыми кроме прочего сохранились почти в неизменном виде вертикальные и горизонтальные связи. Кроме того, система нормативно технического регулирования «РЖД» начала формироваться еще до принятия и вступления в силу ФЗ «О техническом регулировании» в условиях значительной правовой неопределенности и переходного периода для системы технического регулирования в стране в целом.

Следствия и обстоятельства функционирования системы нормативно-технического регулирования на железнодорожном транспорте многообразны и имели с течением времени различные позитивные и негативные проявления. Однако с определенностью можно говорить о том, что

железнодорожный транспорт переживает постоянное техническое развитие. В приведенном ранее примере системы токосъема на момент создания «РЖД» существовал разработанный силами ЗАО «Универсал – контактные сети» типовой проект контактной сети для скорости движения 200 км/ч (КС-200), являющийся, по нашему мнению, формой акта технического регулирования, вскоре появился проект КС-250. В настоящее время осуществляется создание инфраструктурных проектов для дальнейшего повышения скоростей движения при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации. ЗАО «Универсал – контактные сети» и Омским университетом путей сообщения разрабатываются новые модели магистральных токоприемников для применения в модернизированной инфраструктуре, ведутся исследования для повышения скоростей до 400 км/ч. При этом государственное техническое регулирование, т. е. создание новых технических стандартов – длительный и сложный процесс. Развитие правового регулирования часто отстает от достижений научно-технического прогресса, но в сфере динамично меняющейся инфраструктуры железнодорожного транспорта такое отставание может просто тормозить развитие технической оснащенности железных дорог, делать их менее конкурентоспособными и даже понижать уровень безопасности. В то же время внутрикорпоративное техническое регулирование как более гибкая, менее бюрократизированная форма принятия технических норм позволяет относительно быстро внедрять и применять достижения научно-технического прогресса, оперативно совершенствовать нормативно-техническую базу строительства и эксплуатации железных дорог. Данный подход нашел свое отражение в «Концепции единой технической политики холдинга «Российские железные дороги», утвержденной президентом ОАО «РЖД» В. И. Якуниным 18 июля 2009 г. и в Стратегии инновационного развития ОАО «Российские железные дороги» на период до 2015 года («Белая книга» ОАО «РЖД»), утвержденной 26 октября 2010 г.

С точки зрения места технических норм «РЖД» в системе правового регулирования с учетом оценки факта выхода предмета за рамки традиционных внутрикорпоративных норм, представляется целесообразным говорить о том, что за прошедшие с момента ликвидации Министерства путей сообщения годы в результате многократного единообразного применения принимаемых технических норм как общеобязательных, в отсутствие возражений со стороны участников правоотношений и третьих лиц, сложилась обычная норма, на основании которой государство санкционирует нормы технического регулирования «РЖД», напрямую затрагивающие объекты публичного интереса.

Еще более сложным является вопрос о статусе международных технических норм в сфере регулирования железнодорожного транспорта.

Традиционным является отнесение международных технических норм к системе международного публичного права, что является логичным развитием подхода, господствовавшего в национальном праве. Такая позиция выглядит абсолютно оправданной, если принять во внимание историю формирования технического права. Активно нормы, поименованные Т. Б. Вандановым, рассматривавшим проблемы международного технического регулирования транспорта, в первую очередь – водного, «прозелитными» [2], стали развиваться в 50 – 60-х гг. прошлого века и связаны были с необходимостью защиты международно значимых интересов общества от побочных последствий применения достижений науки и техники. Именно с этим и связывали применение названного термина, обозначающего переход в новое качество. Соответственной была и отраслевая принадлежность указанных норм: международное морское, воздушное, космическое право, право международной безопасности. Очевиден был и круг субъектов международного технического права – государства и международные организации и содержание задач, которые они решали с помощью принятия международных технических норм, это меры в целях обеспечения экологической безопасности, безопасности транспортных систем, недопущение бесконтрольного распространения опасных веществ и т. д. Теоретический подход к международным техническим нормам как к нормам международного публичного права, заложенный в период начала их комплексного развития М. И. Лазаревым, Т. Б. Вандановым, Г. Р. Мешерой, С. А. Малининым [2, 3], остался практически неизменным. В то же время сами правоотношения в этой области притерпели

значительные изменения. Темпы научно-технического прогресса значительно выросли, международная техническая кооперация и интеграция достигли немыслимых ранее уровней, и следствием этого стало расширение области технического регулирования. Задача обеспечения различных аспектов безопасности, связанных с эксплуатацией технически сложных устройств и систем, как и другие задачи межгосударственного уровня, сохранилась, однако появились и новые аспекты международно-правового технического регулирования.

С учетом этого фактора применение исключительно международного публичного права не всегда способно решать всю совокупность задач, стоящих перед международным техническим правом. Вопрос о принадлежности части технических норм к международному частному праву и их соотношения с техническими нормами международного публичного права широко не рассматривался и требует дальнейшего глубокого теоретического изучения с учетом практического опыта и потребностей технико-правового регулирования, однако по меньшей мере в ряде отраслей экономики представляется возможным говорить о существовании на сегодняшний день международного публичного и международного частного технического права.

Если распространить такой подход на проблемы международного технического регулирования строительства и эксплуатации железнодорожного транспорта, то можно сделать интересные выводы из рассмотренного в настоящей статье, касающиеся проблемы международной гармонизации и унификации технического регулирования. С учетом рассмотренных различий в концепции систем технического регулирования ЕС/ВТО и России фактически действующая сегодня система технического регулирования на железнодорожном транспорте Российской Федерации значительно ближе с точки зрения процесса формирования технических норм к аналогичной системе ЕС/ВТО, а следовательно, процесс дальнейшего сближения нормативно-технических систем в этой области может протекать быстро и эффективно. Важное значение с точки зрения институционального механизма гармонизации и унификации технического регулирования будут иметь наряду с названными в начале статьи международными межправительственными организациями (IGO) международные неправительственные организации (INGO). На глобальном уровне особая роль в развитии данной деятельности должна принадлежать Международному союзу железных дорог, который изначально был создан для гармонизации и совершенствования условий строительства железных дорог и членство в котором было «восстановлено» ОАО «РЖД» в 2007 г.

Список литературы

1. Бурков, А. Т. Развитие инфраструктуры энергообеспечения железнодорожного транспорта [Текст] / А. Т. Бурков, А. В. Мизинцев, Е. В. Кудряшов // Транспорт Российской Федерации (Наука и транспорт). 2010. – №3 (28). – С. 28 – 33.

2. Ванданов, Т. Б. Влияние технического прогресса на развитие норм международного права [Текст] / Т. Б. Ванданов // Советский ежегодник международного права. 1971. – М., 1973. – С. 244 – 247.

3. Малинин, С. А. Правовая природа административно-консультативных актов, издаваемых межгосударственными организациями [Текст] / С. А. Малинин, Т. М. Ковалева // Правоведение. – 1999. – № 2. – С. 52 – 60.

4. Смердин, А. Н. Железнодорожный транспорт – инструмент для решения задач Организации Объединенных Наций / А. Н. Смердин, С. В. Заренков // ООН: задачи и механизмы. Сб. науч. ст. / Санкт-Петербургский гос. ун-т. – СПб, 2011. – С. 160 – 173.

5. Kiesling F. Contact lines for electric railways. Planning, design, implementation / F. Kiesling, R. Puschman, A. Schmider. – Berlin and Munich: Siemens, 2001. – 822 p.

УДК 629.424.3:621.436

УПРАВЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЕМ ВПРЫСКА ТОПЛИВА В ЦИЛИНДРЫ ТЕПЛОВОЗНЫХ ДИЗЕЛЕЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЕЖИМОВ РАБОТЫ

Беляев Андрей Александрович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г.Омск, пр. Маркса, 35.
Аспирант, заведующий лабораторией кафедры «Локомотивы».
Тел.:(3812) 31-34-17.
E-mail: Belyaevaa@list.ru

Данковцев Вячеслав Тихонович
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.
Тел.:(3812) 31-34-17.

Четвергов Виталий Алексеевич
Доктор технических наук, профессор кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.
Тел.:(3812) 31-34-17.

В статье предложено новое конструктивное решение, улучшающее количественные и качественные показатели протекания процессов впрыскивания топлива в цилиндры тепловозных дизелей. Приведен сравнительный анализ использования штатной топливной аппаратуры и топливной аппаратуры, оборудованной пневматическими догружателями форсунок.

Ключевые слова: *тепловозный дизель, расход топлива, форсунка, пневматический догружатель.*

MANAGEMENT FUEL INJECTION PRESSURE IN THE CYLINDER DIESEL ENGINES IN THE DIFFERENT MODES OF OPERATION

Belyaev Andrey Aleksandrovich
Omsk State Transport Univirsity (OSTU).
35, Marx av. m Omsk, 644046, Russia.
The post-graduate student, head of laboratory of chair «Locomotives».
Phone: (3812) 31-34-17.
E-mail: Belyaevaa@list.ru

Dankovcev Vjacheslav Tihonovich
Cand.Tech. Sci., the senior lecturer of chair «Locomotives», OSTU.
Phone: (3812) 31-34-17.

Chetvergov Vitalij Alexeevich
Dr.Sci. Tech., professor of chair «Locomotives», OSTU.
Phone: (3812) 31-34-17.

The paper proposed a new design solution that improves the quantity and quality of the processes in-cylinder fuel injection diesel engines. A comparative analysis of the standard fuel system and fuel system, equipped with pneumatic amplifier injectors.

Keywords: *diesel engines, fuel injectors, pneumatic amplifier.*

УДК 629.424.3:621.436

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ТЕПЛОВОЗНОМ ДИЗЕЛЕ

Володин Александр Иванович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Локомотивы», первый проректор, проректор по учебной работе.
Тел.: (3812) 31-34-17.
E-mail: VolodinAI@omgups.ru

Балагин Дмитрий Владимирович
Аспирант, инженер кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-17.
E-mail: BalaginDV@omgups.ru

Комкова Юлия Сергеевна
Аспирант кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 44-26-20.
E-mail: KomkovaYS@mail.ru

В статье рассматриваются вопросы математического моделирования нестационарных температурных полей на поверхности цилиндропоршневой группы тепловозного дизеля.

Ключевые слова: *дизельный двигатель, математическая модель, тепловизор, тепловой баланс, 3D-модель, метод конечных элементов, гильза, температурные градиенты.*

RESEARCH OF PROCESSES OF THE HEAT TRANSFER IN THE DIESEL ENGINE

Volodin Alexander Ivanovich
Omsk State Transport Univirsity (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr.Sci.Tech., professor, heat of chair «Locomotives», 1st Pro-Rector, Pro-Rector on the educational.
Phone: (3812) 31-16-72.
E-mail: VolodinAI@omgups.ru

Balagin Dmitry Vladimirovich
The post-graduate student, engineer of chair «Locomotives», OSTU.
Phone: (3812) 31-16-72.
E-mail: BalaginDV@omgups.ru

Komkova Yulya Sergeevna
The post-graduate student of chair «Locomotives», OSTU.
Phone: (3812) 44-26-20.
E-mail: KomkovaYS@mail.ru

In article questions of mathematical modeling non-stationary temperature fields on a surface cylinder-piston group of a diesel engine are considered.

Keywords: *the diesel engine, mathematical model, infrared imager, thermal balance, 3D-model, a method of final elements, a cylinder liner, temperature gradients.*

УДК 621.332

ОСОБЕННОСТИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТОКОПРИЕМНИКОВ И КОНТАКТНЫХ ПОДВЕСОК НА СОПРЯЖЕНИЯХ

Дербилов Евгений Михайлович
Начальник дирекции аварийно-восстановительных средств Западно-Сибирской железной дороги.
Россия, г. Новосибирск, ул. Движенцев, 1, к. 512.
Тел.: 8-962-834-17-64.
E-mail: svz-05@mail.ru

В статье рассмотрена динамическая модель взаимодействия токоприемника с контактной подвеской для расчета контактного нажатия в сопряжениях анкерных участков. Предложены алгоритмы расчета жесткости, высотного положения и приведенной массы контактной подвески в зоне сопряжения. Описаны характеристики разрабатываемого асимметричного токоприемника, приведены результаты расчета взаимодействия данного токоприемника с контактной подвеской КС-200-06.

Ключевые слова*: сопряжение, токоприемник, контактная сеть, взаимодействие, эластичность, контактное нажатие*

PARTICULARITIES OF SIMULATE MODELING OF THE INTERACTION BETWEEN PANTOGRAPH AND OVEHEAD CONTACT SYSTEMS INTERFACING

Derbilov Evgeny Mihailovich
Chief of the department emergency-reconstruction facility of West-Siberian railroad.
Of. 512, 1 Dvizhencev str., Novosibirsk, Russia.
Phone: 7-962-834-17-64.
E-mail: derbilovem@mail.ru

In the article is considered dynamic model of the interaction between pantograph and overhead contact systems for calculating of contact force during interfacing. In the article is offered algorithms for calculating of elasticity, contact wire height and contact system mass during interfacing area. In the article is decrypted the features of new asymmetry pantograph and results of calculating the interaction between pantograph and overhead contact systems CS-200-06.

Keywords: *interfacing, pantograph, overhead contact system, interaction, elasticity, contact force.*

УДК 621.332.531

МЕТОД РАСЧЕТА ЭЛАСТИЧНОСТИ КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКИ НА ОСНОВЕ ПРОСТОЙ КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ. ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛАСТИЧНОСТИ

Кудряшов Евгений Владимирович
ЗАО «Универсал – контактные сети».
199048, г. Санкт-Петербург, 5-я линия В. О., д. 70 лит. А, пом. 11Н.
Кандидат технических наук, заместитель генерального директора по науке.
Тел.: 8-921-957-87-43.
E-mail: kev@uks.ru

Заренков Семен Валерьевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта».
Тел.: 8-908-313-91-34.
E-mail: svz-05@mail.ru

Ходунова Олеся Андреевна
Аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.
Тел. (3812) 31-34-46.

В статье рассмотрена математическая модель контактной подвески, построенная на основе метода конечных элементов и позволяющая выполнять расчеты эластичности с высокой точностью. В числе преимуществ модели – простота, доступность для воспроизведения, универсальность. Перспективная область применения – расчеты контактных подвесок для высоких скоростей движения в соответствии международными требованиями. Приведено сравнение результатов расчетов на основе модели с экспериментальными данными, полученными при испытаниях скоростной контактной подвески на участке Лихославль – Калашниково Октябрьской железной дороги в 2005 – 2009 гг. Описаны усовершенствованные приборы и методы измерений, использованные при проведении экспериментов.

Ключевые слова: *контактная подвеска, эластичность, метод конечных элементов.*

THE METHOD OF CALCULATING OF THE CATENARY WIRE ELASTICITY BASED ON SIMPLE FINITE ELEMENT MODEL. ELASTICITY MEASUREMENTS

Kudryashov Evgeny Vladimirovich
«Universal Contact Nets» JSC.
Cand. Tech. Sci, the deputy director for science.
5th line 70-A, Basil Island, Saint-Petersburg, 199048, Russia.
Phone: 8-921-957-87-43.
E-mail: kev@uks.ru

Zarenkov Semyon Valerevich
Omsk State Transport Univirsity (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Cand. Tech. Sci, the teacher of chair «Power supply of Railroad Transport».
Phone: 8-908-313-91-34.
E-mail: svz-05@mail.ru

Khodunova Olesya Andreevna
The postgraduate student of chair «Power supply of Railroad Transport», OSTU.
Phone: (3812) 31-34-46.

There is the mathematical model of the catenary, built on the basis of the finite element method in this article. This model allows to perform calculations of elasticity with high accuracy. The advantages of the model are simplicity, accessibility for playback versatility. The area of application are calculations for high speed catenary in accordance with international requirements. There is the comparison of the results of calculations based on the model with experimental data obtained in tests on high-speed catenary distance Likhoslavl - Kalashnikov (Oktyabrskaya Railway) in 2005-2009. Improved devices and calculation methods used in the measurements are described in this article.

Keywords: *catenary system, elasticity, finite element method.*

УДК 629.4.016.015

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК С УЧЕТОМ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ТЕПЛОВОЗА

Овчаренко Сергей Михайлович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Локомотивы».
Тел.: (3812) 31-34-17.
E-mail: ovcharenkosm@mail.ru

Корнеев Павел Сергеевич
Аспирант кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-17.
E-mail: korneev-pavel@mail.ru

Приводится методика формирования расходных характеристик дизель-генераторной установки тепловоза по результатам реостатных испытаний или контрольной поездки. Модель позволяет скорректировать паспортные расходные характеристики с учетом снижения экономичности работы дизеля, которые необходимы для решения задач оценки расхода топлива и контроля технического состояния.

Ключевые слова: *техническое состояние, переходные процессы, отбор мощности, режимы работы, расчет нормы, расход топлива.*

MODELLING CONSUMED CHARACTERISTICS, TAKING INTO ACCOUNT THE TECHNICAL CONDITION THE DIESEL ENGINE-GENERATING INSTALLATION OF THE DIESEL LOCOMOTIVE

Ovcharenko Sergey Mihajlovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr. Sci. Tech., professor of chair «Locomotives».
Phone: (3812) 31-34-17.
E-mail: ovcharenkosm@mail.ru

Korneev Pavel Sergeevich
The post-graduate student of chair «Locomotives», OSTU
Phone: (3812) 31-34-17.
E-mail: korneev-pavel@mail.ru

The technique formation consumed characteristics a diesel engine-generating installation of diesel locomotive by results of reostatic tests or a control trip is resulted. The model allows correcting passport consumed characteristics taking into account decrease in profitability of work of a diesel engine which are necessary for the decision problems an estimation of fuel consumption and control the technical condition.

Keywords: *technical state, transients, capacity selection, operating modes, norm calculation, fuel consumption.*

УДК 621.436

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОПЛИВНЫХ СМЕСЕЙ РАЗЛИЧНОГО ЭЛЕМЕНТАРНОГО СОСТАВА

Сковородников Евгений Иванович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Локомотивы».
Тел.: (3812) 31-34-17.

Анисимов Александр Сергеевич
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 32-08-97.

Гришина Юлия Борисовна
Аспирант кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 43-81-41.

В статье изложена методика оценки термодинамических характеристик комбинированного топлива для двигателей внутреннего сгорания, состоящего из стандартного дизельного топлива и различного количества альтернативных добавок, предложена методика расчета средней мольной теплоемкости, теплоты сгорания и теоретически необходимого количества воздуха для сгорания единицы топлива в зависимости от процентного содержания альтернативной добавки.

Ключевые слова: альтернативные виды топлива, теплота сгорания, теоретически необходимое количество воздуха для сгорания, средняя массовая и мольная теплоемкость.

TECHNIQUE OF DEFINITION PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS OF FUEL MIXES OF THE VARIOUS ELEMENTARY STRUCTURE

Skovorodnikov Evgenie Ivanovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr.Sci.Tech., the professor of chair «Locomotives».
Phone: (3812) 31-34-17.

Anisimov Alexander Sergeevich
Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of chair «Locomotives», OSTU.
Phone: (3812) 32-08-97.

Grishina Julia Borisovna
The post-graduate student of chair «Locomotives», OSTU.
Phone: (3812) 43-81-41.

In article the technique of an estimation of thermodynamic characteristics of kombiniro-bathing fuel for the internal combustion engines, consisting of standard di-zelnogo fuel and various quantity of alternative additives is stated, the design procedure of average мольной is offered a thermal capacity, warmth of combustion and theoretically necessary quantity of air for combustion of unit of fuel depending on percentage containing-nija an alternative additive.

Keywords: *alternative kinds of fuel, warmth of combustion, theoretically not-obhodimoe quantity of air for combustion, average mass and мольная a thermal capacity.*

УДК 629.47: 658.2

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ РЕМОНТЕ И ТЕХНИЧЕСКОМ ОБСЛУЖИВАНИИ ЛОКОМОТИВОВ

Смирнов Виктор Александрович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог».
Тел.: (3812) 31-34-19, 44-36-62.
E-mail: SmirnovVA@bk.ru

Талызин Александр Сергеевич
Омский техникум железнодорожного транспорта – филиал Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПСа).
644005, г. Омск, ул. Академика Павлова, 24.
Директор.
Тел.: 8-905-098-63-10.

В статье рассматриваются вопросы энергосбережения в локомотивном хозяйстве, анализируется технологическое потребление топливно-энергетических ресурсов на ремонтных предприятиях, формулируются основные направления повышения энергетической эффективности на основе предлагаемой классификации энергетических затрат, приводятся типовые мероприятия по экономии топливно-энергетических ресурсов, основанные на результатах практического опыта работы специалистов ОмГУПСа в данном направлении.

Ключевые слова: *ремонт и техническое обслуживание локомотивов, топливно-энергетические затраты, энергосбережение.*

ENERGY SAVINGS BY LOCOMOTIVE REPAIR AND PREVENTIVE MAINTENANCE

Smirnov Victor Alexandrovich
Omsk State Transport Univirsity (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Cand. Tech. Sch., the senior lecturer of chair «Rolling stock of electric railways».
Phone: (3812) 31-34-19, 44-36-62.
E-mail: SmirnovVA@bk.ru

Talyzin Aleksandr Sergeyevich
Omsk technical school of railway transportation – branch OSTU.
24, Academicial Pavlova, Omsk, 644020, Russia.
Director.
Phone: 8-905-098-63-10.

In the article questions of energy savings in locomotive sector are considered. Technological consumption of energy resources at the repair enterprises is analyzed. Principal directions of energy efficiency increase on basis of supposed energy costs classification are formulated. Standard arrangements for economization of energy resources based on the results of practical experience of OmGUPS specialists in this field are adduced.

Keywords: *repair and preventive maintenance of locomotives, fuel and energy resources, power saving.*

УДК 621.332

ОСОБЕННОСТИ УСТРОЙСТВ ТОКОСЪЕМА ЗАРУБЕЖНЫХ МОНОРЕЛЬСОВЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Томилов Валерий Викторович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, преподаватель кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта».
Тел. (3812) 31-34-46.

Беккер Антон Владимирович
Аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.
Тел. (3812) 31-34-46.

Яковлев Вениамин Николаевич
Сибирский федеральный университет (СФУ).
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Транспорт».
Тел. (391) 244-86-25.

В статье описаны виды монорельсовых систем, представленные крупнейшими международными проектно-конструкторскими организациями компаний Hitachi, Bombardier, Scomi, Intamin, AG, Siemens, Rowin, International Kish Control Mechanic Company (IKCM) и др., рассмотрены особенности устройств токосъёма зарубежных монорельсовых транспортных систем, их расположения на монобалке, возможности их применения в российских условиях, отмечены преимущества монорельсового транспорта в городских и пригородных условиях.

Ключевые слова: *монорельсовая транспортная система, монобалка, токосъем, пантограф.*

DEVICE FEATURES CURRENT COLLECTION FOREIGN MONORAIL SYSTEMS

Tomilov Valery Viktorovich
Omsk State Transport Univirsity (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Cand. Tech. Sci, the teacher of chair «Power supply of Railroad Transport».
Phone: (3812) 31-34-46.

Bekker Anton Vladimirovich
The postgraduate student of chair «Power supply of Railroad Transport», OSTU.
Phone: (3812) 31-34-46.

Jakovlev Veniamin Nikolaevich
Siberian federal university (SFU).
660041, Krasnoyarsk, avenue Free, 79.
Dr.Sci.Tech., the professor of chair «Transport».
Phone: (391) 244-86-25.

There are monorail systems presented by the largest international design organizations of the companies Hitachi, Bombardier, Scomi, Intamin, AG, Siemens, Rowin, International Kish Control Mechanic Company (IKCM) and others in the article. Also there are current collection devices features of foreign monorail transport systems, their arrangements on a monobeam, their application capabilities in the Russian conditions. There are getting some advantages of monorail transport in the city and suburb conditions.

Keywords: *a monorail transport system, a monobeam, power collection, pantograph.*

УДК 621.313

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ИЗНОСА КОЛЛЕКТОРНО-ЩЕТОЧНОГО УЗЛА ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Харламов Виктор Васильевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Электрические машины и общая электротехника».
Тел.: (3812) 31-18-27.
E-mail: emoe@omgups.ru

Шкодун Павел Константинович
Кандидат технических наук, профессор кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-18-27.
E-mail: emoe@mail.ru

Долгова Анна Владимировна
Аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-18-27.
E-mail: emoe@omgups.ru

В статье рассмотрены особенности применения теории подобия для создания физической модели коллекторно-щеточного узла тягового электродвигателя ТЛ-2К1. Вопрос моделирования рассмотрен с позиции оценки механической и электроэрозионной составляющих процесса изнашивания для модельной электрической машины П31М. Получены численные значения параметров процесса изнашивания коллекторно-щеточного узла и масштабные соотношения, связывающие натурный объект и модель.

Ключевые слова: *тяговый электродвигатель, износ, модель, теория подобия, размерность, критерий подобия, масштаб подобия.*

APPLICATION THE SIMILARITY THEORY FOR SIMULATION OF THE COMMUTATOR-BRUSH CONNECTION WEAR OF A TRACTION MOTOR

Harlamov Victor Vasilevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx Av., Omsk, 644046, Russia.
Dr. Sci. Tech., professor of chair «Electrical machines and common electrotechnic».
Phone: (3812) 31-18-27.
E-mail: emoe@mail.ru

Shkodun Pavel Konstantinovich
Cand.Tech.Sci., senior lecturer of chair «Electrical machines and common electrotechnic», OSTU.
Phone: (3812) 31-18-27.
E-mail: emoe@mail.ru

Dolgova Anna Vladimirovna
Post-graduate student of chair «Electrical machines and common electrotechnic», OSTU.
Phone: (3812) 31-18-27.
E-mail: emoe@mail.ru

This article is devoted to using a similarity theory for physical modeling of the «commutator-brush» connection of the TL-2K1 traction motor. The modeling studies a traction motor from the point of mechanical and electrical wear estimation. As a model unit for the research the P31M electrical motor was used. Results of the research are values of the parameters of the «commutator-brush» connection wear process and scale coefficients that associate the model with the real traction motor.

Keywords: traction motor, wear, model, similarity theory, dimension, criterion of similarity, similarity scale.

УДК 629.488

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ АУДИТ КАК ИНСТРУМЕНТ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ЛОКОМОТИВОВ

Шантаренко Сергей Георгиевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, заведующий кафедрой «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава».
Тел.: 8(381-2) 31-16-27.
E-mail: nich@omgups.ru

Капустьян Михаил Федорович
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.
Тел.: 8(381-2) 31-18-11.
E-mail: ttm@omgups.ru

В ходе технологического аудита проанализировано техническое состояние электровозного парка. Определены основные причины снижения надежности электровозов, такие как несовершенство нормативно-технической документации, нарушения технологии ремонта, низкий уровень механизации технологических процессов, отсутствие входного и выходного контроля узлов и деталей, недостаточная квалификация исполнителей и руководителей среднего звена. Определены меры по предотвращению негативных факторов, влияющих на качество ремонта и эксплуатационную надежность электровозов.

Ключевые слова: *надежность локомотивов, технология ремонта, управление качеством ремонта, технологический аудит.*

TECHNOLOGY AUDIT AS A TOOL FOR ENSURING THE RELIABILITY OF LOCOMOTIVES

Shantarenko Sergey Georgeevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marks av., Omsk, 644046.
Dr. Sci. Tech., head of chair «Technology of transport mechanical engineering and repair of a rolling stock».
Тел.: 8(381-2) 31-16-27.
E-mail: nich@omgups.ru

Капустьян Михаил Федорович
Cand. Sci. Tech., the senior lecture of chair «Technology of transport mechanical engineering and repair of a rolling stock», OSTU.

Тел.: 8(381-2) 31-18-11
E-mail: ttm@omgups.ru

During the audit process analyzes the technical condition of the electric locomotives. Identified the main causes of reduced reliability of electric locomotives, such as imperfection of technical standards, violations of technology of repair, low level of mechanization of technological processes, the lack of input and output control units and components, lack of qualified workers and managers. Identify measures to prevent the negative factors affecting the quality of repair and reliability of electric locomotives.

Keywords: *reliability of locomotives, repair technology, quality control, technology audit.*

УДК 629.4.027.432

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ С ГИБКИМИ НЕЗАВИСИМО ВРАЩАЮЩИМИСЯ БАНДАЖАМИ

Шилер Валерий Викторович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог»
Тел.: 8-913-626-87-53.
E-mail: shiler_vai@inbox.ru

Шипилов Павел Александрович
Соискатель кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.
Тел.: 8-908-102-68-30.
E-mail: shipilov_omsk@mail.ru

Шилер Александр Валерьевич
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.
Тел.: 8-913-969-90-99.
E-mail: shiler_alex@inbox

Предложено новое техническое решение конструкции колесной пары. С использованием теории «π»-подобия изготовлены макетные образцы трех вариантов колесных пар и верхнего строения пути. Выполнены сравнительные исследования динамики движения колесных пар и представлены их результаты.

Ключевые слова: *колесная пара, макет, физическое моделирование.*

NVESTIGATION OF DYNAMIC PROPERTIES WHEEL SET INDEPENDENTLY ROTATING FLEXIBLE BANDAGE

Shiler Valeri Viktorovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx Av., Omsk, 644046, Russia.
Cand. Tech. Sch., the senior lecturer of chair «Rolling the same electricsion of roads».
Phone: 8-913-626-87-53.
E-mail: shiler_vai@inbox.ru

Shipilov Pavel Aleksandrovich
The applicant of the department «Rolling the same electricsion of roads», OSTU.
Phone: 8-908-102-68-30.

Shiler Aleksandr Valerevich
Cand. Tech. Sch., the senior lecturer of chair «Automatics and control system», OSTU.
Phone: 8-913-969-90-99.
E-mail: shiler_alex @ inbox

A new technical solution design wheel set. With the use of the theory of «π» - the similarity manufactured prototypes of the three options of wheel sets and track structure. A comparative study of the dynamics of the movement to-wood pairs and present their results.

Keywords: *wheelset, layout, physical modeling, dynamic parameters.*

УДК 004.021

МЕТРИКИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В АЛГОРИТМАХ ВРЕМЕННОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ OFDM-СИГНАЛА

Квиткова Елена Борисовна
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Аспирантка.
Тел.: 8-908-809-94-50.
E-mail: e-kvitka@mail.ru

Часто именно блок синхронизации определяет качество работы системы в целом, поэтому достаточно актуальной является задача синхронизации, возникающая в системах с ортогональным частотным разделением каналов. В данной статье рассмотрены метрики, лежащие в основе алгоритмов оценки временного рассогласования.

Ключевые слова: *метрика, OFDM, временная синхронизация, автокорреляционная функция.*

THE METRICS USED IN TIME SYNCHRONIZATION ALGORITHMS OF OFDM SIGNAL

Kvitkova Elena Borisovna
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx Av., Omsk, 644046, Russia.
Postgraduate student.
Phone: 8-908-809-94-50.
E-mail: e-kvitka@mail.ru

Frequently the synchronization block defines quality of system work as a whole. Therefore the problem of synchronization arising in systems with orthogonal frequency division of channels is enough actual. In given article the metrics underlying estimation algorithms of a time mismatch are considered.

Keywords: *metrics, OFDM, time synchronization, autocorrelation function.*

УДК 004.428.4

ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ СОЗДАНИИ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ БИБЛИОТЕК МАТЕМАТИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ ЦИФРОВЫХ СИГНАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОРОВ С ФИКСИРОВАННОЙ ТОЧКОЙ

Фирсанов Константин Александрович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Аспирант, инженер отдела «Нанотехнологии».
Тел.: 61-13-44, 903-983-15-35.
E-mail: Konstantin.firsanov@gmail.com

В статье рассматриваются основные подходы, используемые при создании высокопроизводительных библиотек математических функций на платформах цифровых сигнальных процессоров с фиксированной точкой. Рассмотрены основные методы, используемые при создании алгоритмов для вычисления функций, их преимущества и недостатки применительно к DSP-платформам с фиксированной точкой. Подробно рассмотрены вопросы точности и диапазона аргументов и значений реализуемых функций.

Ключевые слова: *связное, телекоммуникационное оборудование, процессор цифровой обработки сигналов, итерационные алгоритмы, диапазон, точность.*

BASIC APPROACHES, THAT ARE USED FOR CREATION HIGH PERFORMANCE MATH LIBRARIES ON FIXED POINT DSP PLATFORMS

Firsanov Konstantin Alexandrovitch
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx Av., Omsk, 644046, Russia.
Postgraduate, engineer Nanotechnology department.
Phone: 61-13-44, 903-983-15-35.
Email: Konstantin.firsanov@gmail.com

The article covers principal approaches for creation high performance math libraries on fixed point DSP platforms. The analysis of basic methods, used for creation algorithms for calculation math lib functions on the fixed point DSP platform, the advantages and drawbacks of each method are examined in the article. The subject of accuracy and the range of the arguments and values of created functions are considered in details.

Keywords: *the coherent, telecommunication equipment, the processor of digital processing of signals, iterative algorithms, range, accuracy.*

УДК 656.212.6.073.22

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЭЛЕМЕНТОВ КРЕПЛЕНИЯ В СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМЫХ СХЕМАХ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ЕДИНИЧНОГО ГРУЗА

Егоров Степан Андреевич
Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).
630043, г. Новосибирск, Д. Ковальчук, 191.
Кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИЛ «ДЦГР».
Тел.: (383) 328-04-38.
E-mail: dcgr@stu.ru

Гребенюк Леонид Александрович
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности», СГУПС.
Тел.: 8-923-114-74-38.
E-mail: Grebenuk@stu.ru

Хорунжин Сергей Юрьевич
Инженер-технолог НИЛ «ДЦГР».
Тел.: 8-923-222-51-71.
E-mail: khorunzhinsu@mail.ru

Безопасность движения поездов и сохранность перевозимых грузов напрямую зависят от способа размещения и крепления грузов, поэтому совершенствование методики расчета крепления грузов является актуальной прикладной задачей, имеющей существенное значение для транспортной науки и отрасли железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: *безопасность движения, груз, крепление, жесткость.*

ABOUT INFORMATION AND PERFECTION OF A DESIGN PROCEDURE OF ELEMENTS OF FASTENING IN STATICALLY SCHEMES OF FASTENING OF INDIVIDUAL CARGO

Egorov Stepan Andreevich
Siberian State Transport Univirsity (SGUPS).
191, D. Kovalchuk, Novosibirsk, 630049, Russia.
Cand. Tech.Sci., the senior research assistant NIL «DCGR».
Phone: (383) 328-04-38.
E-mail: dcgr@stu.ru

Grebenjuk Leonid Aleksandrovich
Cand. Tech. Sci., the senior lecturer of chair «Health and safety», SGUPS.
Phone: 8-923-114-74-38.
E-mail: Grebenuk@stu.ru

Khorunhin Sergey Jurevich
The process engineer NIL «DCGR».
Phone: 8-923-222-51-71.
E-mail: khorunzhinsu@mail.ru

In article the advanced design procedure of elements of fastening in statically indefinable schemes of fastening of individual cargo is considered. The advanced technique will allow to make calculations of elements of fastening of individual cargo with большей accuracy.

Keywords: *traffic safety, cargo, fastening, rigidity.*

УДК 656.027.3, 658.012

ЧАСТНЫЕ ВОПРОСЫ ОРГАНИЗАЦИИ СКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ НА СИБИРСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ

Комсюкова Дарья Александровна
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Аспирант кафедры «Экономика транспорта, логистика и управление качеством».
Тел.: 8-913-649-56-79.
E-mail: danika2003@inbox.ru

Смердин Александр Николаевич
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.
Тел.: 8-904-588-40-48.
E-mail: SmerdinAN@omgups.ru

Усманов Юрий Ахкемович
Кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Экономика транспорта, логистика и управление качеством», ОмГУПС.
Тел.: 8-913-974-63-19.

В статье рассматриваются актуальные вопросы, связанные с организацией скоростного движения на реконструируемых участках. Описаны механизмы увеличения затрат на содержание и эксплуатацию линий при повышении скоростей движения. Проведен анализ методов расчета эффективности инвестиционных вложений в инфраструктуру, подвижной состав, а также в исследования их взаимодействия. Показана возможность снижения затрат на эксплуатацию при рациональном расходовании средств на мониторинг и испытания.

Ключевые слова: *скоростное движение, токоприемник, экономическая эффективность, стационарный видеокомплекс.*

THE AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF HIGH-SPEED ELECTRIC ROLLING STOCK

Komsyukova Darya Alexandrovna
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Postgraduate student of chair «Economics of Transport, Logistics and Quality Management».
Phone: 8-913-649-56-79.
E-mail: danika2003@inbox.ru

Smerdin Alexander Nikolaevich
Cand. Tech. Sci, Senior lecturer, the Senior lecturer of chair «Power supply of Railroad Transport», OSTU.
Phone: 8-904-588-40-48.
E-mail: SmerdinAN@omgups.ru

Usmanov Yuri Ahkemovich
Cand. Tech. Sci, Senior lecturer, the professor of chair «Economics of Transport, Logistics and Quality Management».
Phone: 8-913-974-63-19.

In the article mention current issues related to the organization of high-speed traffic on the reconstructed areas. Mechanisms of increased costs for maintenance and operation of the lines at higher speeds. Considered analysis methods for calculating the efficiency of investments in infrastructure, rolling stock, as well as in the study of their interaction. The possibility of reducing the operating costs for a rational expenditure of funds for monitoring and testing.

Keywords: *high-speed traffic, pantograph, economic efficiency, stationary computer vision.*

УДК 340.132.2:351.812.5:341.1/8

ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ И СТАНДАРТЫ В ПРОЦЕССЕ МЕЖДУНАРОДНОЙ ИНТЕГРАЦИИ СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Троицкий Владимир Александрович
Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ).
191160, Россия, Санкт-Петербург, ул. Смольного, 1/3.
Кандидат юридических наук, доцент кафедры «Теория и история международных отношений».
Тел.: 8-812-576-42-28.
E-mail: troitsky@richwise.ru

В статье рассмотрены проблемы статуса и содержания технических норм, опосредующих процесс строительства и эксплуатации объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта. Особое внимание уделено вопросам унификации и гармонизации технических правил государств в ходе международной интеграции транспортных систем.

Ключевые слова: *интеграция, техническое регулирование, международное право, железнодорожный транспорт, международная организация.*

TECHNICAL REGULATIONS IN RAILWAY SYSTEMS INTERNATIONAL INTEGRATION

Troitskiy Vladimir Alexandrovich
Saint-Petersburg state university (SPbSU).
1/3 Smolnii str., St. Petersburg, 191160, Russia.
Phd in law, docent of chair «Theory and history of international relations».
Phone: 8-812-576-42-28.
E-mail: troitsky@richwise.ru

The article is devoted to status and content of technical regulations in field of construction and exploitation of railway infrastructure. Special attention is focused on unification and harmonization of technical rules and standards as important factors of international transport systems integration.

Keywords: *integration, technical regulations, international law, railway transport, international organization.*

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 редактору журнала Михалевой Светлане Сергеевне 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);
Сидорова Елена Анатольевна – 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).

Редактор – Майорова Н. А.
Компьютерная верстка – Михалева С. С.

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.

Номер ISSN – 2220-4245.
Подписной индекс в общероссийском каталоге «Роспечать» – 66087.
Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Адрес редакции (издательства): 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35;
тел.: (3812) 31-05-54; e-mail: izvestia_transsiba@mail.ru

Подписано в печать 20.12.2011.
Тираж 500 экз.
Распространяется бесплатно.