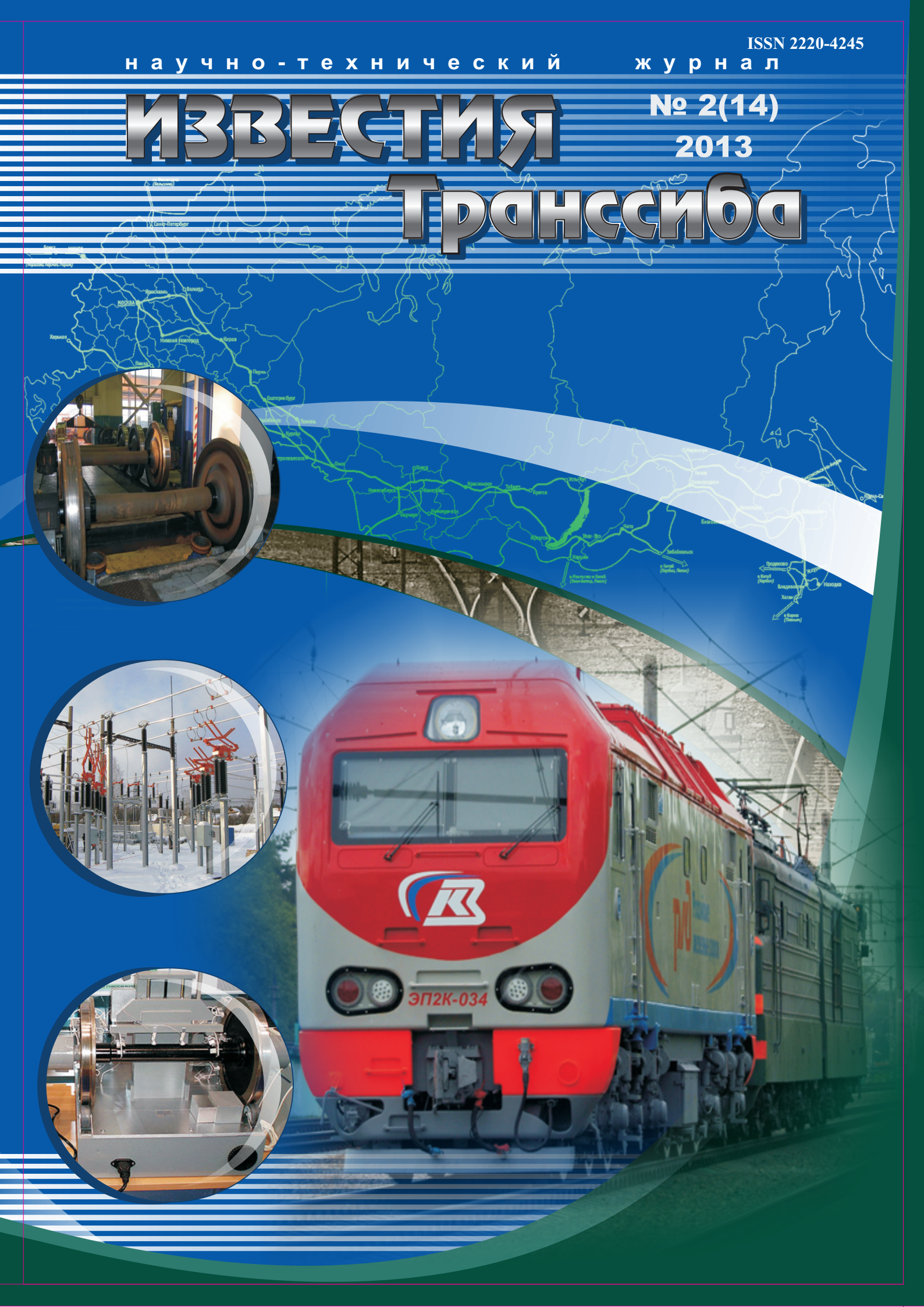
ISSN 2220-4245

научно-технический журнал

ИЗВЕСТИЯ Транссиба

№ 2(14)
2013



ИЗВЕСТИЯ Транссиба
научно-технический журнал
№ 2(14)
2013
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, д.т.н., профессор.
3. Бокарев Сергей Александрович – проректор по научной работе СГУПСа, д.т.н., профессор (Новосибирск).
4. Бирюков Виталий Васильевич – проректор по научной работе СибАДИ, д.э.н., профессор (Омск).
5. Каргапольцев Сергей Константинович – проректор по научной работе ИрГУПСа, д.т.н., профессор (Иркутск).
6. Косарев Александр Борисович – зам. генерального директора ОАО «ВНИИЖТ», д.т.н., профессор (Москва).
7. Косых Анатолий Владимирович – проректор по научной работе ОмГТУ, д.т.н., профессор (Омск).
8. Серенко Андрей Федорович – проректор по научной работе ДВГУПСа, д.т.н., доктор (Хабаровск).
9. Чугуй Юрий Васильевич – зав. лабораторией конструкторско-технологического института научного приборостроения СО РАН, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ (Новосибирск).
10. Шантаренко Сергей Георгиевич – д.т.н., начальник НИЧ ОмГУПСа (Омск).

Захаренко Елена Игоревна – ответственный секретарь (Омск).

СОДЕРЖАНИЕ

Подвижной состав железных дорог

Белан Д. Ю. Применение инновационного метода обработки для совершенствования технологии ремонта коллекторов тяговых электродвигателей 2
Бельский А. О. Анализ конструкции литой и сварной боковых рам трехэлементных тележек грузовых вагонов 6
Гурова Е. Г., Курбатов В. С., Воробьева А. К. Моделирование виброизолирующей подвески с нелинейным электромагнитным компенсатором жесткости и с линейной системой перестройки 11
Ламкин А. Г., Олешко С. Б., Пустоветов М. Ю. Определение режима загруженности по сцеплению локомотивов с асинхронными тяговыми двигателями 16
Терехов П. М., Бургонова О. Ю., Воробьёв А. А. Моделирование процесса восстановления поверхности катания бандажей колесных пар 22
Чегодаев Ф. В., Чижма С. Н., Спиридонов А. В. Моделирование асинхронного частотного привода с помощью метода взаимной нагрузки 31
Четвергов В. А., Мишин А. И., Сиряк П. А. Наработка локомотивов в едином временном пространстве 37
Шилер В. В., Шилер А. В. Напряженное состояние упругой прокладки обода колесной пары новой конструкции 45

Транспортная энергетика

Москалев Ю. В., Карабанов М. А. Повышение энергоэффективности системы тягового электроснабжения постоянного тока железных дорог с применением накопителей энергии 51
Сковородников Е. И., Анисимов А. С., Гришина Ю. Б., Глухова М. В. Методика оценки эффективности использования смесевых видов топлива в энергетических установках тепловозов 58
Третьяков Е. А., Краузе А. В., Ткач В. А. Поглощение избыточной зарядной мощности в протяженных малонагруженных линиях электропередач 110 кВ 68
Черемисин В. Т., Никифоров М. М. Оценка потенциала повышения энергетической эффективности системы тягового электроснабжения 75

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

Зачатейский Е. Д., Лаврухин А. А. Анализ и моделирование оптимизационных алгоритмов квантования сигналов для информационных систем 84
Королёва К. А. Применение метода оптимальной интерполяции вектором, нейтральным по свертке в приемном тракте коммуникационного железнодорожного оборудования 90
Любченко А. А., Разумный С. Г., Никитин И. А. Анализ отказов оборудования систем технологической радиосвязи 96
Марюхненко В. С., Мухопад Ю. Ф. Повышение качества решения задач транспортной логистики обработкой навигационных измерений подвижных объектов 102

Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

Аксенов В. А., Завьялов А. М. Пути повышения эффективности содержания объектов инфраструктуры железных дорог 113

Организация производства на транспорте

Смирнов В. А. Технологическое проектирование предприятий по ремонту подвижного состава 118

АННОТАЦИИ 127

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 629.423.31

Д. Ю. Белан

ПРИМЕНЕНИЕ ИННОВАЦИОННОГО МЕТОДА ОБРАБОТКИ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА КОЛЛЕКТОРОВ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

В данной статье рассматривается вопрос об использовании инновационной технологии – науглероживании медных пластин коллектора и устройства для формирования углеродистого слоя на рабочей поверхности коллектора тяговых электродвигателей. Для улучшения коммутационных характеристик и повышения надежности работы электрических машин постоянного тока предлагается использовать электроэрозионный метод обработки.

В настоящее время на сети железных дорог эксплуатируется более 70 тыс. тяговых электродвигателей (ТЭД) электровозов различных типов. За пределами установленных техническими условиями сроков службы находятся 65 % ТЭД. Около 95 % двигателей имеют срок службы более 15 лет. Это значит, что все ТЭД уже восстанавливались в объеме среднего и капитального ремонта на заводах. Одним из важнейших путей повышения эксплуатационной надежности локомотивного парка является постоянное совершенствование технологии и улучшение качества ремонта тяговых электродвигателей. Неисправности коллекторно-щеточного узла (КЩУ) составляют 10 – 15 % от общего количества отказов ТЭД электровозов [1]. Качество работы электрических машин во многом зависит от работы коллекторно-щеточного узла [2, 3]. Проблема повышения физико-механических и эксплуатационных свойств деталей машин подвижного состава, инструментов, приборов с помощью методов поверхностного легирования и упрочнения приобретает все большую актуальность. В настоящее время науке и технике известно более 100 методов поверхностного упрочнения и легирования, каждый из которых имеет свои оптимальные области применения. Все известные на сегодняшний день методы упрочнения поверхностей можно разбить на пять основных групп в зависимости от технологического приема изменения поверхностных или объемных свойств материала: 1 – образование тонких пленок на поверхности; 2 – высокоэнергетические методы, связанные с изменением химического состава и структуры поверхностного слоя; 3 – механическое воздействие на поверхность; 4 – объемное и поверхностное изменение структуры и свойств термообработкой; 5 – комбинированные методы [4]. Решение многих проблем развития современного производства было найдено на пути создания, разработки и совершенствования электрофизических и электрохимических методов обработки материалов. Данные методы основаны на использовании различных физико-химических процессов энергетического воздействия на заготовку для формообразования детали при обработке. Электрофизические и электрохимические методы обработки, связанные с удалением лишнего материала при формообразовании детали заданной формы и размеров, можно подразделить на пять основных групп, каждая из которых состоит из нескольких самостоятельных методов (рисунок 1).

Все перечисленные методы обработки характеризуются следующими общими преимуществами:

обрабатывают материалы с любыми физико-химическими свойствами при практической независимости режимов обработки от свойств материала;

выполняют обработку, невыполнимую или трудновыполнимую обычными механическими методами;

нет силового воздействия на заготовку при обработке, а при некоторых методах нет механического контакта между инструментом и заготовкой;

используют инструмент менее твердый и прочный, чем обрабатываемый материал;

имеют высокую производительность обработки при сравнительно высокой точности получения размеров;

легко автоматизируются и механизируются процессы обработки.

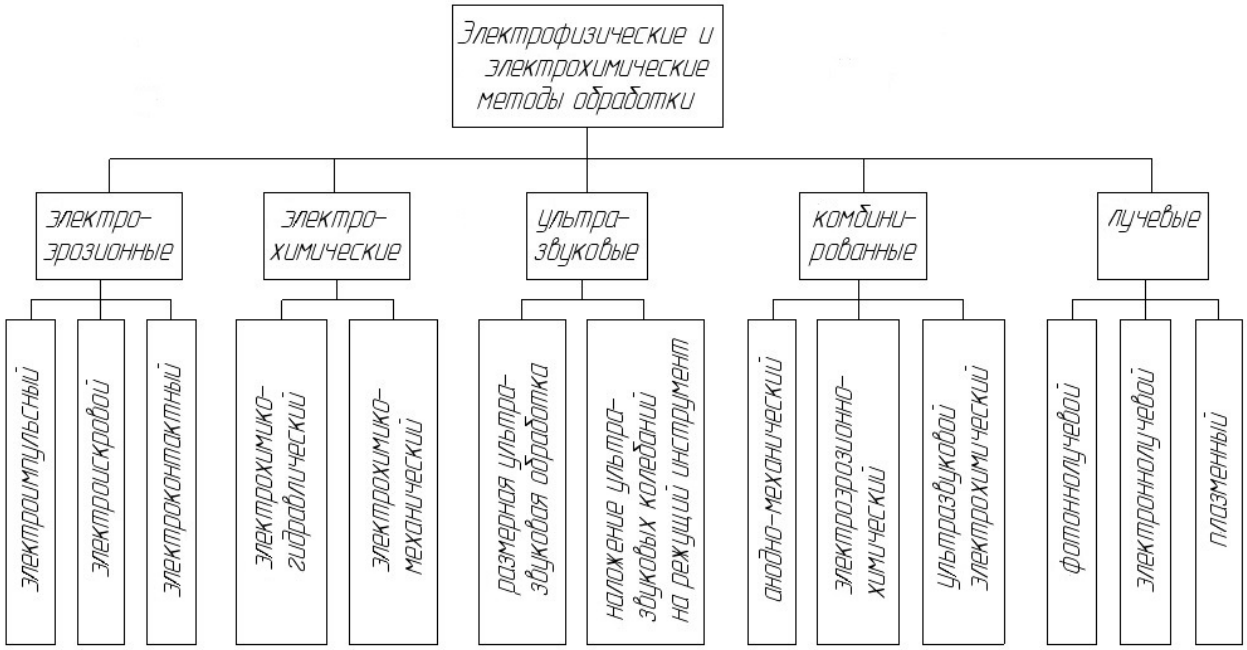


Рисунок 1 – Классификация электрофизических и электрохимических методов обработки материалов

Прогрессивным подходом в настоящее время считается исследование, разработка и совершенствование технологий получения поверхностных слоев с заданными составом, структурой и, соответственно, с требуемыми свойствами. При этом необходимо учитывать, что решающее значение при формировании структуры слоя имеют энергетическая способность взаимодействия насыщающего элемента, физико-химическая природа насыщающей среды и механизм фазовых превращений [4, 5].

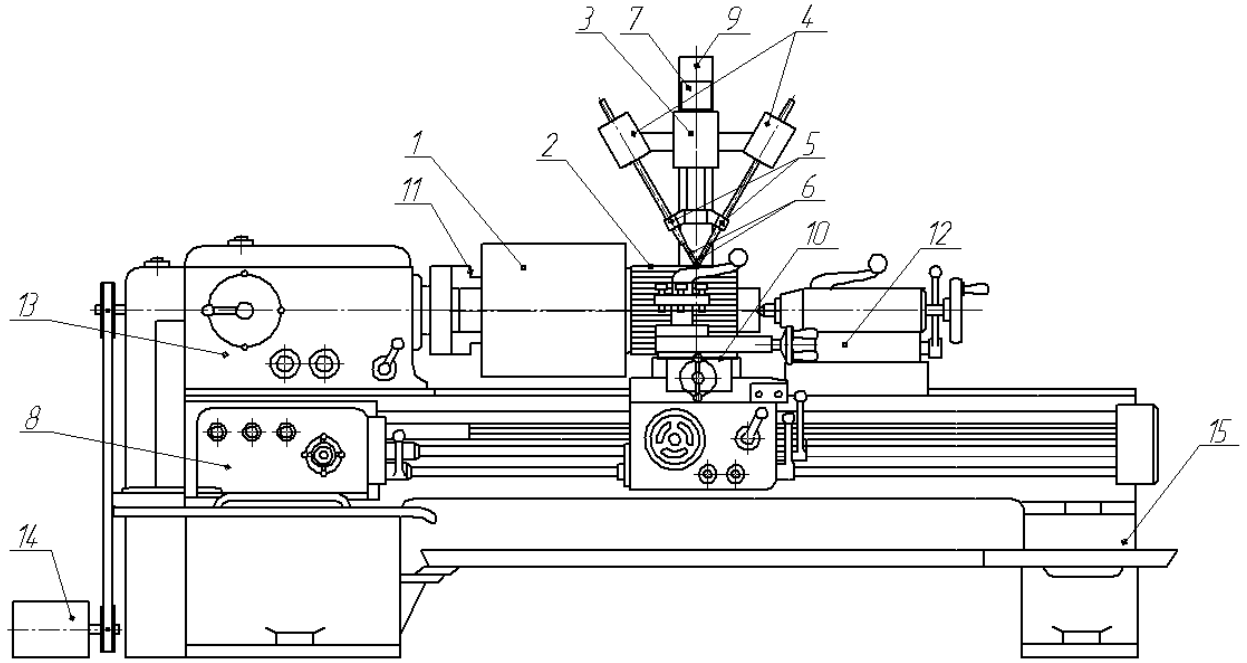


Рисунок 2 – Установка для комплексной обработки коллектора электрической машины:
1 – якорь электрической машины; 2 – коллектор; 3 – генератор импульсов; 4 – держатели угольных электродов; 5 – направляющие угольных электродов; 6 – угольные электроды; 7 – электродвигатель; 8 – коробка подач; 9 – стойка; 10 – суппорт продольного перемещения; 11 – кулачковый патрон; 12 – задняя бабка; 13 – коробка скоростей; 14 – мотор-редуктор; 15 – станина

Новые методы обработки изменяют не только технологию ремонта коллектора тягового электродвигателя, но и геометрию деталей, способствуют созданию инновационной компо-

зиционной структуры рабочей поверхности коллектора электрической машины постоянного тока (ЭМПТ) и новых конструкций машин и приборов.

Наиболее перспективным является электроэрозионный метод обработки. При электроэрозионной обработке используется энергия электрических разрядов, возбуждаемых между электродом-инструментом и электродом-заготовкой. За основу предлагаемого метода создания углеродистого слоя на рабочей поверхности медных пластин коллектора принята электроискровая обработка (ЭИО) (см. рисунок 2).

Формирование углеродистого слоя происходит в результате сложных плазмохимических, теплофизических и механотермических процессов, реализуемых на микролокальных участках воздействия единичного искрового разряда. В результате на поверхностях анода и катода образуются локальные очаги плавления и испарения, вызывающие их электрическую эрозию и взаимный массоперенос, а именно, к поверхности пластин подводятся угольные электроды, на которые через генератор импульсов подается напряжение и благодаря полярному эффекту, связанному с преимущественным переносом эродируемого материала анода на катод, на поверхности последнего формируется тонкое покрытие с определенными физико-химическими и механическими свойствами. На данное устройство для формирования углеродистого слоя на рабочей поверхности медных пластин коллектора получен патент на полезную модель № 121659 [6].

Поскольку при электроискровой обработке в зоне обработки реализуется значительная тепловая энергия, на обработанной поверхности образуется новая композиционный слой (с измененной структурой), толщина которого зависит от режимов обработки (рисунок 3).

В общем случае связь любого технологического параметра $П$ с режимами отработки может быть выражена структурной формулой (1):

$$П = K \cdot I^x \cdot U^y \cdot C^z, \qquad (1)$$

где I – рабочий ток; U – напряжение между электродами; C – емкость конденсатора в схеме; k – коэффициент, зависящий от условий проведения процесса; x, y, z – показатели степени, определяющие законы изменения режимов процесса.

Частота f импульсов определяется заданной скважностью q и длительностью T импульсов и показывает, какое количество импульсов подается в единицу времени:

$$f = \frac{1}{q \cdot T} = \frac{1}{T}. \qquad (2)$$

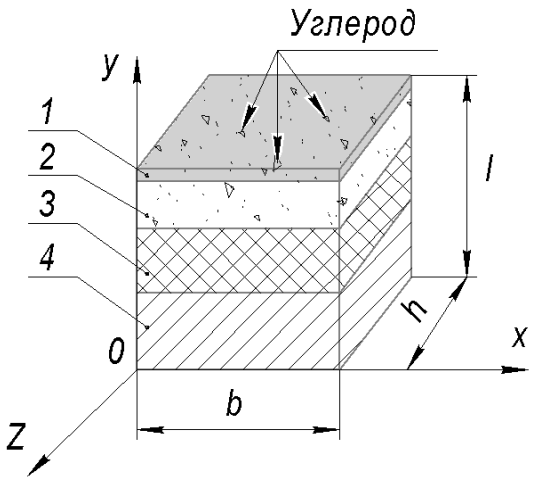


Рисунок 3 – Композиционная структура контактного элемента коллекторной пластины тягового электродвигателя: 1 – верхний слой; 2 – диффузионная зона; 3 – зона термического влияния; 4 – основной металл; b, h, l – ширина, длина и глубина контактного элемента

При электроэрозионной обработке используется диапазон частот 100 – 2000 Гц. В зависимости от емкости накопителя C и подводимого к разрядному промежутку напряжения U шероховатость обработанной поверхности определяется по выражению (2):

$$R_a = k \cdot C^{1/3} \cdot U^{2/3}, \qquad (3)$$

где Ra – критерий шероховатости по ГОСТ 2789-59.

Результат данных расчетов представлен зависимостью шероховатости науглероженной поверхности от напряжения и глубины науглероженного слоя от напряжения (рисунок 4).

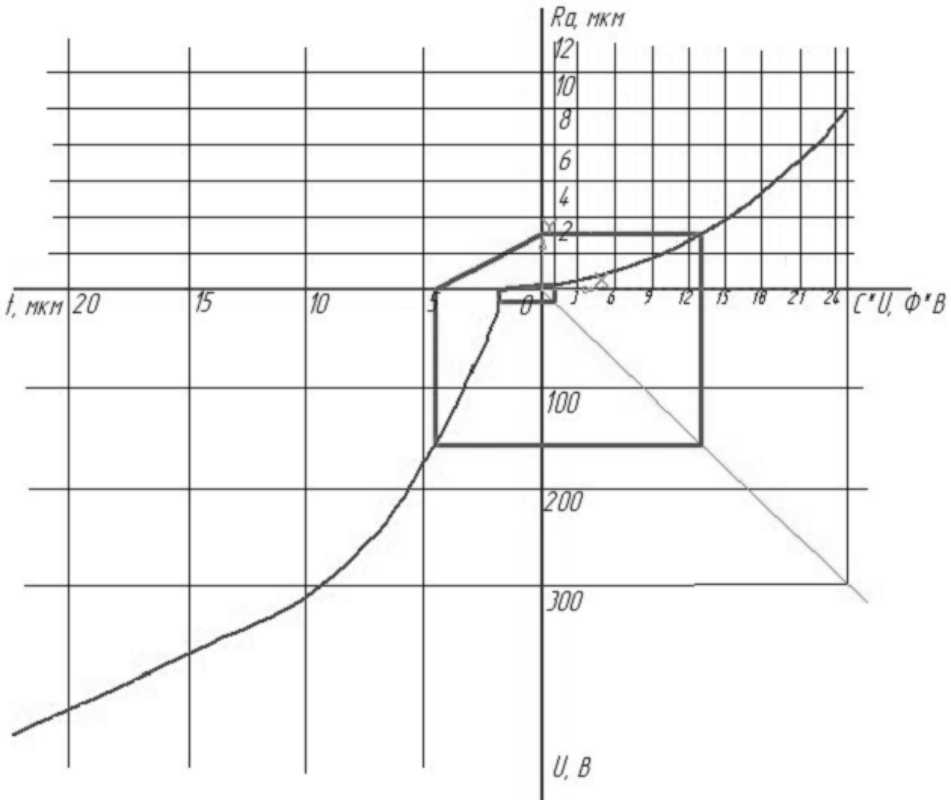


Рисунок 4 – Номограмма зависимости шероховатости науглероженной поверхности от напряжения и глубины науглероженного слоя от напряжения

Параметры импульсов тока, используемые в процессе, определяют технологические характеристики электроискровой обработки (производительность, качество обработанной поверхности, точность обработки, обрабатываемость различных материалов). Преимущества ЭИО перед другими методами обработки: высокие точность обработки и качество обработанной поверхности, незначительная глубина дефектного слоя, возможность сравнительно легкой автоматизации и механизации процесса и изменения режимов обработки в широких пределах.

Электроискровая обработка обеспечивает довольно высокое качество обработанной поверхности (рисунок 5).

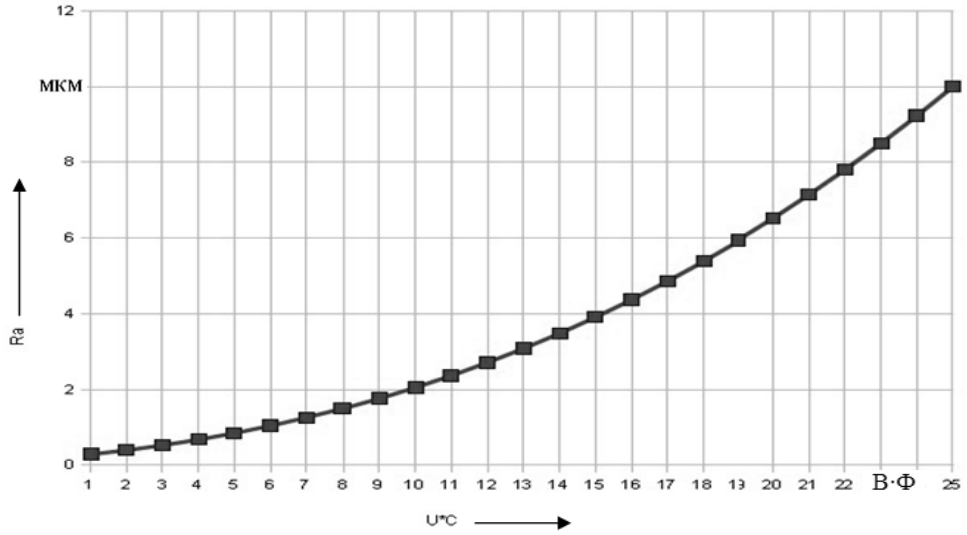


Рисунок 5 – График зависимости шероховатости поверхности от разрядного промежутка напряжения и емкости накопителя генератора импульсов

Значение шероховатости материала рабочей поверхности коллектора ТЭД после обработки достигает порядка 0,3 мкм при регламентированной технологическим процессом ремонта 3,2 мкм. Исходя из изложенного выше осуществляется выбор генератора импульсов. Наиболее подходящим является высокочастотный транзисторный генератор импульсов типа ГТИ-3.

Таким образом, использование предлагаемой инновационной технологии ремонта тяговых электрических машин и установки для формирования углеродистого слоя на рабочей поверхности медных пластин коллектора позволит повысить износостойкость рабочей поверхности коллектора, улучшить физико-механические и эксплуатационные свойства рабочей поверхности коллектора, что приведет к увеличению ресурса работы электрической машины постоянного тока.

Список литературы

1. Анализ технического состояния электровозного парка по сети железных дорог России за 2009 год [Текст] / Департамент локомотивного хозяйства ОАО «РЖД». М., 2009. – 77 с.

2. Харламов, В. В. Диагностирование состояния коммутации коллекторных электродвигателей с использованием прибора ПКК-5М [Текст] / В. В. Харламов, П. К. Шкодун, А. П. Афонин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2011. – № 3 (7). С. 52 – 57.

3. Авилов, В. Д. К вопросу о повышении коммутационной устойчивости коллекторных электрических машин постоянного тока [Текст] / В. Д. Авилов, П. Г. Петров, Е. М. Моисеенок // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – № 2 (2). – С. 2 – 6.

4. Белан, Д. Ю. Повышение надежности работы коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей [Текст] / Д. Ю. Белан, В. М. Лузин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – № 4 (4). – С. 6 – 11.

5. Гадалов, В. Н. Локальное избирательное нанесение электрофизических покрытий на металлообрабатывающий инструмент [Текст] / В. Н. Гадалов, Д. Н. Романенко, И. М. Горякин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. № 4. – С. 20 – 24.

6. Пат. 121659 Российская Федерация, МПК H 01 R 43/06. Устройство для формирования углеродистого слоя на рабочей поверхности медных пластин коллектора [Текст] / Белан Д. Ю., Ражковский А. А., Волошин А. С., Логвиненко А. А.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – № 2012119539/07; заявл. 11.05.12; опубл. 27.10.12. Бюл. № 30.

УДК 629.46:629.4.027.23

А. О. Бельский

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ ЛИТОЙ И СВАРНОЙ БОКОВЫХ РАМ ТРЕХЭЛЕМЕНТНЫХ ТЕЛЕЖЕК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

В статье выполнен анализ конструкции литой и сварной боковых рам трехэлеметных тележек. Рассмотрены направления дальнейшего совершенствования конструкции боковой рамы тележки.

В последнее время на сети железных дорог ОАО «РЖД» сложилась крайне неудовлетворительная ситуация, связанная с эксплуатацией тележек грузовых вагонов [1, 2]. С 2002 по 2011 г. включительно произошло 89 изломов боковых рам тележек грузовых вагонов. При этом число изломов боковых рам из года в год постоянно увеличивается (рисунок 1).

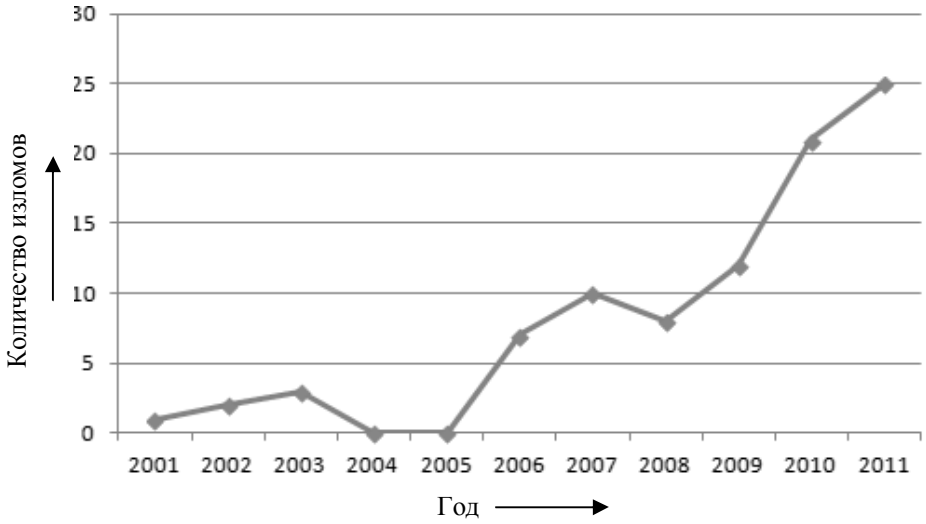


Рисунок 1 – Распределение изломов

На вагонных ремонтных предприятиях ОАО «РЖД» за 2011 г. было забраковано 17,8 тыс. боковых рам, на вагонных эксплуатационных предприятиях порядка 7,5 тыс. При этом вагоностроительные заводы не могут перекрыть образовавшийся дефицит, так как основные свои литейные мощности из-за сложившейся экономической ситуации в стране вынуждены направлять на выпуск новых вагонов.

По подсчетам НП «Объединение производителей железнодорожной техники» (НП «ОПЖТ») в конце 2011 г. на рынке не хватало 30000 вагонокомплектов литья. Можно констатировать, что дефицит боковых рам стал одной из причин увеличения срока ремонта вагонов, предусмотренного договорами между собственниками и вагонными ремонтными предприятиями. Так, если в 2007 г. средний простой одного вагона в деповском ремонте составлял четверо суток, то в 2011 г. – уже семь. Все это привело к тому, что цены на боковые рамы достигли рекордных значений: сегодня стоимость новой боковой рамы для собственника подвижного состава достигла 140000 р.

Руководство компании ОАО «РЖД» пытается перекрыть сложившийся дефицит боковых рам различными способами:

совершенствованием существующих моделей тележек;

импортом литья из Китая;

переходом на сварные конструкции.

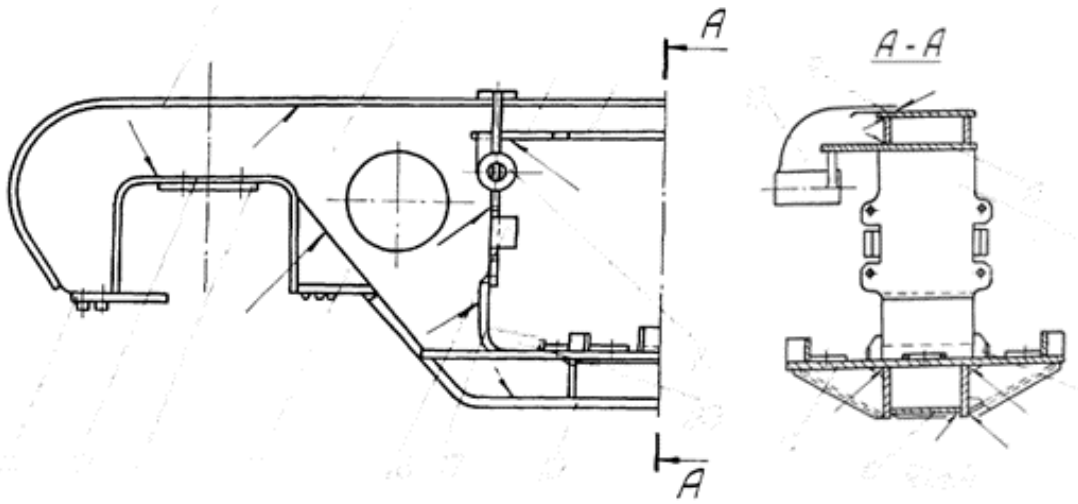
В 2010 г. в соответствии с классификатором ИВЦ ЖА КЖА-211510 «Тележки грузовых вагонов. Классификатор» помимо тележки модели 18-100 на сети железных дорог колеи 1520 мм были допущены к эксплуатации еще 13 моделей тележек грузовых вагонов. Всего же на сегодняшний день разработано более 30 разнообразных моделей тележек грузовых вагонов. Новые решения связаны в основном с введением упругих скоб и полиуретановых элементов между буксой и боковой рамой тележки, износостойких элементов пары трения и амортизаторов беззазорных скользунов. Такой путь решения проблемы, особенно при необходимости увеличения осевой нагрузки и маршрутной скорости движения грузовых поездов, по мнению многих ученых, не является перспективным [2].

Импорт литья из Китая предназначен также для удовлетворения текущих потребностей, а создание сварных конструкций боковых рам должно сработать и на перспективу.

Возможность изготовления сварной конструкции боковой рамы предусмотрена как действующими [3], так и разрабатываемыми стандартами двухосных тележек для грузовых вагонов, однако до настоящего времени, кроме отдельных случаев для специальных вагонов, такая тележка для массового использования не создана. В вагонах стран Евросоюза такие конструкции тележки созданы, например *Y*-25, с нагрузкой на ось 23,5 т и подобные ей конструкции 25 т на ось [4]. Применение принципов, заложенных в конструкции тележки *Y*-25,

для отечественных грузовых вагонов неприемлемо по нескольким причинам, главными из которых являются разные условия эксплуатации – горизонтальное формирование составов в Европе и роспуск с сортировочных горок в РФ и, соответственно, более высокие нормативные требования к прочности конструкции. Если же учесть перспективу создания тележек с увеличенной нагрузкой на ось [5], а также вопросы взаимозаменяемости элементов ходовой тележки и минимизации ее воздействия на железнодорожный путь, то становится ясно, что необходимо иметь свое направление в разработке тележки грузового вагона со сварными элементами взамен литых.

Для перспективных тележек грузовых вагонов ОАО «Крюковский вагоностроительный завод» (КВСЗ) создана конструкция сварной боковой рамы (рисунок 2) [6]. Боковая рама КВСЗ изготавливается из листового проката низколегированной стали 09Г2Д-12 или 09Г2С. Сварная боковая рама КВСЗ имеет аналогичные по форме элементы в конструкции, что и литая: объединенные пояса и колонки, образующие в средней части проем для размещения комплекта центрального рессорного подвешивания, а по концам – буксовые проемы для размещения корпусов букс колесных пар.



а б

Рисунок 2 – Чертеж сварной боковой рамы КВСЗ

Применение сварных боковых рам теоретически позволяет иметь следующие преимущества перед аналогичными литыми рамами:

меньший уровень брака, возникающего при изготовлении, из-за появления возможности исправления дефектов боковой рамы (вырезания окон, приварки ребер);

большая жесткость при одинаковом с литыми рамами габаритом сечений и при меньшем, чем у литых, весе;

уменьшенные затраты времени на изготовление, вследствие чего повышается конкурентоспособность изготовляемой боковой рамы;

экономия металла при изготовлении, которая может достигать 30 %, за счет уменьшения припусков на обработку и более высокой механической прочности сварных боковых рам;

уменьшение стоимости изготовления – капитальные затраты литейных цехов значительно превосходят затраты на сварочное оборудование (нет необходимости плавления большого количества металла);

возможность создания полностью автоматизированного и механизированного производства.

Расчет напряженно-деформированных состояний (НДС) на прочность сварной и литой боковых рам был выполнен в соответствии с «Нормами для расчета и проектирования грузовых вагонов железных дорог колеи 1520 мм Российской Федерации» [7] методом конечных элементов в программном комплексе SolidWorks Simulation.

SolidWorks Simulation обладает некоторыми преимуществами перед другими программными комплексами при решении подобных задач [8]:

– упрощен процесс создания модели конструкции;

– осуществляется задание силовых и граничных условий;

– возможность моделирования сложных сварных соединений в конструкции.

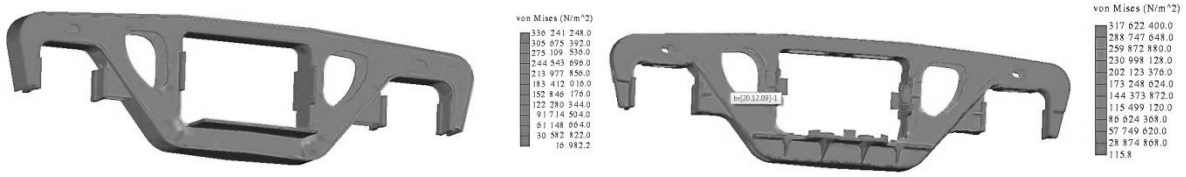
Расчет НДС был выполнен для I и III режимов нагружения:

I расчетный режим характеризует относительно редкое сочетание экстремальных нагрузок. Основное требование при расчете на прочность по этому режиму – не допустить появление остаточных деформаций (повреждений) в элементах боковой рамы. В эксплуатации I расчетному режиму соответствуют осаживание и трогание тяжеловесного состава с места; соударение вагонов при маневрах, в том числе при роспуске с сортировочных горок; экстренное торможение в поездах при малых скоростях движения;

III расчетный режим рассматривает относительно частое возможное сочетание умеренных по величине нагрузок, характерное для нормальной работы вагона в движущемся поезде. Основное требование при расчете по этому режиму – не допустить усталостного разрушения элементов боковой рамы. В условиях эксплуатации III расчетный режим соответствует движению вагона в составе поезда по прямым и кривым участкам пути и стрелочным переводам с допускаемыми скоростями, вплоть до конструкционной; при периодических служебных и регулировочных торможениях; периодических умеренных рывках и толчках; штатной работе механизмов и узлов вагона.

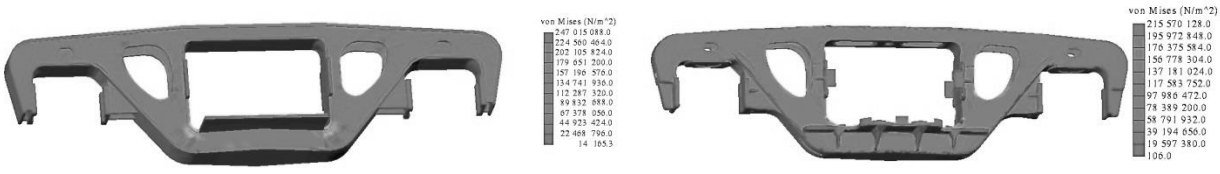
При расчетах на прочность принималось допущение, что литая и сварная конструкции боковых рам воспринимают идентичные нагрузки как по величине и направлению, так и по месту приложения. Модели боковых рам рассчитывались для осевой нагрузки 23,5 т. Для более точного сравнения результатов конечно-элементные модели боковых рам были составлены из конечных элементов, имеющих одинаковые свойства.

Анализ НДС (рисунки 3 и 4) показывает, что сварные боковые рамы имеют те же слабые элементы в конструкции, что и литые, а именно: внутренний и наружный угол буксового проема, углы рессорного проема, кромки технологических окон [9]. При этом напряжения в аналогичных сечениях в сварной боковой раме на 10 – 15 % ниже, чем в литой.



а б

Рисунок 3 – НДС боковых рам при I расчетном режиме: сварная (а) и литая (б) конструкция



а б

Рисунок 4 – НДС боковых рам при III расчетном режиме: сварная (а) и литая (б) конструкция

К недостаткам сварной боковой рамы, кроме этого, относятся трудности, возникающие при изготовлении сварных соединений, а именно:

необходимость обеспечения плотного прижатия верхнего и нижнего листов нижнего пояса к вертикальной перегородке по всей поверхности соединения при осуществлении сварочных работ, для обеспечения непосредственной передачи вертикальных усилий в эксплуа-

тации. Если это условие не будет выполнено хотя бы на небольшом отрезке боковой рамы, то вертикальное усилие будет передаваться посредством только сварного шва, что приведет к возникновению концентратора напряжений и, возможно, к образованию трещины;

изменение в сторону ухудшения механических свойств основного металла при сварке из-за нагрева места шва;

возникновение остаточных напряжений из-за неоднородного нагрева свариваемых листов и, как следствие, появление остаточных деформаций;

существенная анизотропия свойств материала в сварном шве;

возникновение в области сварного шва местных напряжений, существенно влияющих на его прочность, особенно в условиях переменного нагружения;

высокие концентрации напряжений и другие неблагоприятные факторы делают сварные соединения недолговечными при переменной внешней нагрузке и особенно в условиях ударного нагружения;

довольно сложный контроль качества сварного шва.

Сложность создания сварной боковой рамы, помимо всего, заключается в отсутствии в нормативных документах на расчет и проектирование железнодорожной техники полного объема критериев, характеризующих различные сварные соединения, в частности, коэффициентов концентрации и др.

В настоящее время вопросом создания сварной боковой рамы, кроме КВСЗ, занимаются многие научные и производственные организации России и СНГ, такие как ОАО «НПК «УралВагонЗавод» (УВЗ), НВЦ «Вагоны», НИЦ УК «РэйлТрансХолдинг» и др. Появление сварной боковой рамы откладывается на неопределенный срок, и, следовательно, сегодня необходимо параллельно рассматривать другие способы улучшения технических характеристик литых боковых рам трехэлементных тележек грузовых вагонов.

Одним из способов улучшения технических характеристик литых боковых рам является применение метода упругопластического деформирования (УПД), применяемого при изготовлении боковых рам на УВЗ. Применение метода УПД позволяет обеспечивать формирование в трещиноопасных зонах остаточных напряжений обратного знака рабочим напряжениям и, как следствие, повысить срок службы боковой рамы.

ПКБ ЦВ ОАО «РЖД» с 1999 г. для повышения технических характеристик боковых рам внедряется проект М1698. В настоящее время по нему модернизированы почти все тележки собственности ОАО «РЖД». Модернизация боковой рамы по проекту М1698 предусматривает установку сменной накладки в буксовый проем боковой рамы тележки на опорную поверхность, а также замену типовых фрикционных планок боковой рамы составными. Применение проекта М1698 позволяет снизить износ трущихся поверхностей, одновременно повышая межремонтный пробег со 120 до 160 тыс. км, но не позволяет снизить вероятность возникновения трещин.

На кафедре «Вагоны и вагонное хозяйство» ОмГУПСа рассматривается вопрос повышения технических характеристик боковой рамы путем ввода в буксовый проем дополнительных устройств, предназначенных для снижения и перераспределения нагрузок, действующих на элементы боковой рамы. Применение данного устройства теоретически позволяет снизить вероятность возникновения и развития трещин в буксовом проеме. В данный момент ведется подготовка к проведению натурных испытаний.

Список литературы

1. Галиев, И. И. Безопасность движения, проблемы тяги и динамики поезда и их исследование методом фракционного анализа [Текст] / И. И. Галиев, В. А. Нехаев, В. А. Николаев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – 1(1). – С. 98 – 106.

2. Галиев, И. И. Безопасность движения грузовых поездов и динамические свойства ходовой части вагона [Текст] / И. И. Галиев, В. А. Нехаев, В. А. Николаев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2012. – 1(9). – С. 107 – 112.

3. ГОСТ 9246-2004. Тележки двухосные грузовых вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Технические условия [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 2005. – 18 с.

4. Лукин, В. В. Вагоны: Учебник [Текст] / В. В. Лукин, П. С. Анисимов, Ю. П. Федосеев. – М.: Маршрут, 2004. – 424 с.

5. Стратегические направления научно-технического развития ОАО «Российские железные дороги» на период до 2015 г. («Белая книга» ОАО «РЖД») [Текст]. – 2007. – 54 с.

6. Пат. 2246416 С2 Российская Федерация, МПК В 61 F 5/52. Двухосная тележка грузового вагона [Текст] / Дейнеко С. Ю., Приходько В. И., Бондарь Н. А. и др. (Украина). – № 2002133547/11; заявл. 10.12.02; опубл. 20.06.04.

7. Нормы для расчета и проектирования грузовых вагонов железных дорог колеи 1520 мм Российской Федерации [Текст] / ВНИИЖТ. М., 1996. – 212 с.

8. Матяш, Ю. И. Выбор программного комплекса для расчета боковой рамы тележки [Текст] / Ю. И. Матяш, А. О. Бельский // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2011. – 1 (5). – С. 11 – 14.

9. Лукин, В. В. Расчет боковой рамы тележки грузового вагона методом конечных элементов [Текст] / В. В. Лукин, А. О. Бельский // Совершенствование технологии ремонта и технического обслуживания вагонов: Межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2009. – 72 с.

УДК 629.4

Е. Г. Гурова, В. С. Курбатов, А. К. Воробьева

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРОИЗОЛИРУЮЩЕЙ ПОДВЕСКИ С НЕЛИНЕЙНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ КОМПЕНСАТОРОМ ЖЕСТКОСТИ И С ЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМОЙ ПЕРЕСТРОЙКИ

В статье выполнено математическое описание, позволяющее оценить свойства системы на стадии ее теоретической разработки. Рассмотрена модель виброизолирующей подвески с линейной системой перестройки, которая позволяет исследовать динамические характеристики виброизолирующей системы с электромагнитным компенсатором жесткости. Приведены результаты моделирования в программе Matlab.

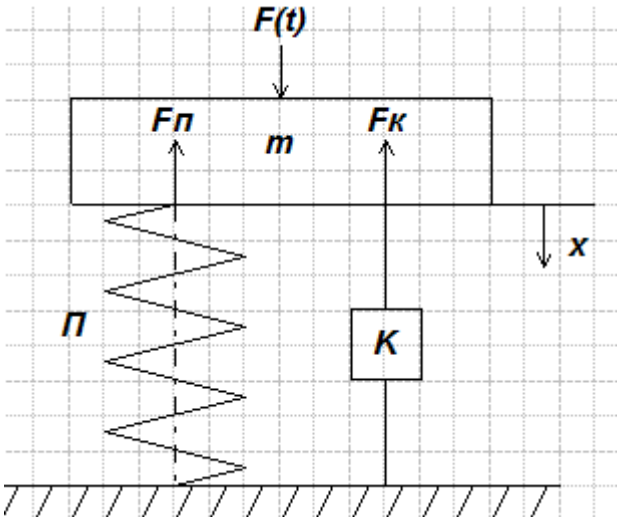


Рисунок 1 – Математическая модель виброизолирующей подвески с компенсатором жесткости без системы перестройки

Сегодня одними из главных проблем на железнодорожном транспорте являются шум и вибрация, создаваемые работающими двигателями и механизмами. Вредное влияние вибрации заключается в том, что она, распространяясь, разрушает машины и сооружения, оказывая влияние на их надежность и работоспособность, и нередко приводит к авариям. Решением проблемы снижения вибрационных колебаний занимается не один коллектив авторов по разработке пассивных, активных виброизоляторов, виброзащитных устройств. Наиболее перспективными следует считать виброизолирующие устройства с плавающим участком нулевой жесткости [4, 5]. В работах [1, 3, 6] предложено виброизолирующее устройство с электромагнитным компенсатором жесткости. Разработанный компенсатор характеризуется рядом преимуществ по сравнению с предлагаемыми ранее механическими компенсаторами [3, 6].

Для определения свойств виброизолирующей подвески с нелинейным компенсатором жесткости на стадии ее теоретической разработки целесообразно исследовать ее математическую модель, показанную на рисунке 1.

На основании математической модели в работе [3] получено дифференциальное уравнение виброизолирующей подвески с компенсатором жесткости (без системы перестройки):

$$m\ddot{x} + cx - F_k(x) = F(t), \tag{1}$$

где m – масса объекта;

x – перемещение объекта;

c – жесткость упругого элемента;

$F_k(x)$ – функция, описывающая характеристику компенсатора;

$F(t)$ – возмущающая сила.

Работа компенсатора жесткости невозможна без специальной системы перестройки. Как отмечалось в работах [1, 3], регулятор может быть линейным и нелинейным.

Рассмотрим случай виброизолирующей подвески с линейной системой перестройки. В работах [2, 3] получено дифференциальное уравнение виброизолирующей подвески с учетом линейного регулятора, которое имеет вид:

$$\begin{aligned} T^2 \cdot m\frac{d^4x}{dt^4} + 2T \cdot m\frac{d^3x}{dt^3} + \left(T^2 \cdot c + m\right)\frac{d^2x}{dt^2} - T^2 \cdot K_э \frac{d^2\left(a \cdot x^3 + c \cdot x\right)}{dt^2} + \\ + 2T \cdot c\frac{dx}{dt} - 2T \cdot K_э \frac{d\left(a \cdot x^3 + c \cdot x\right)}{dt} - K_э\left(a \cdot x^3 + c \cdot x\right) + \\ + \left(c + K_э \cdot K_u \cdot K_y \cdot c_k \cdot z\right)x = T^2\frac{d^2F(t)}{dt^2} + 2T\frac{dF(t)}{dt} + F(t). \end{aligned} \tag{2}$$

Решение полученного дифференциального уравнения виброизолирующей подвески с линейным регулятором (2) позволит оценить свойства всей системы.

Для решения дифференциального уравнения (2) удобнее всего применить метод, используемый в теории автоматического управления при помощи программы Matlab.

На основе уравнения (2) получена структурная схема виброизолирующей подвески, показанная на рисунке 2.

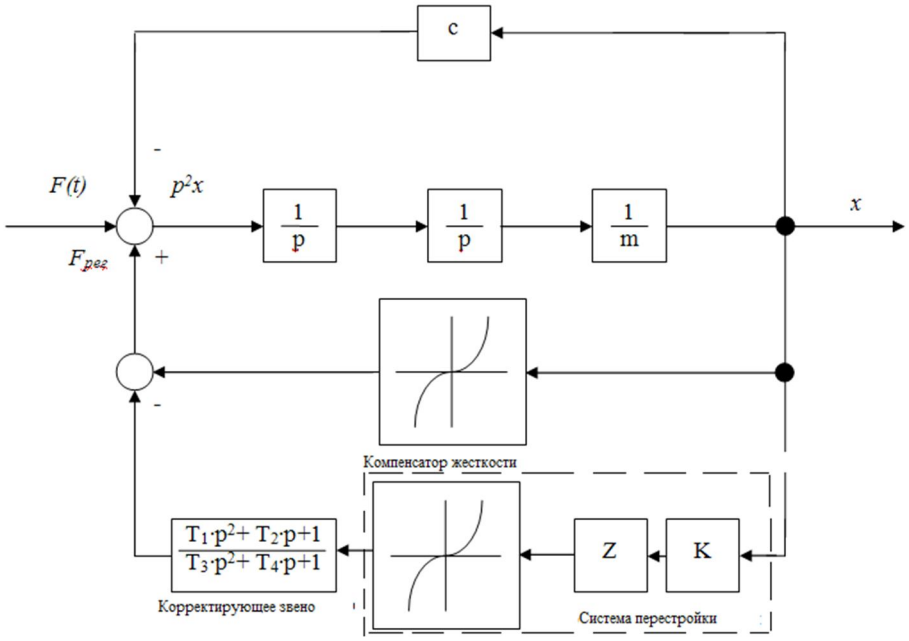


Рисунок 2 – Структурная схема виброизолирующей подвески
с линейным инерционным регулятором и корректирующим звеном

На основании структурной схемы, приведенной на рисунке 2, в программе Simulink смоделирован виброизолятор с линейной системой перестройки. Вид модели виброизолирующей подвески с нелинейным компенсатором жесткости, с линейной системой перестройки и корректирующим звеном показан на рисунке 3.

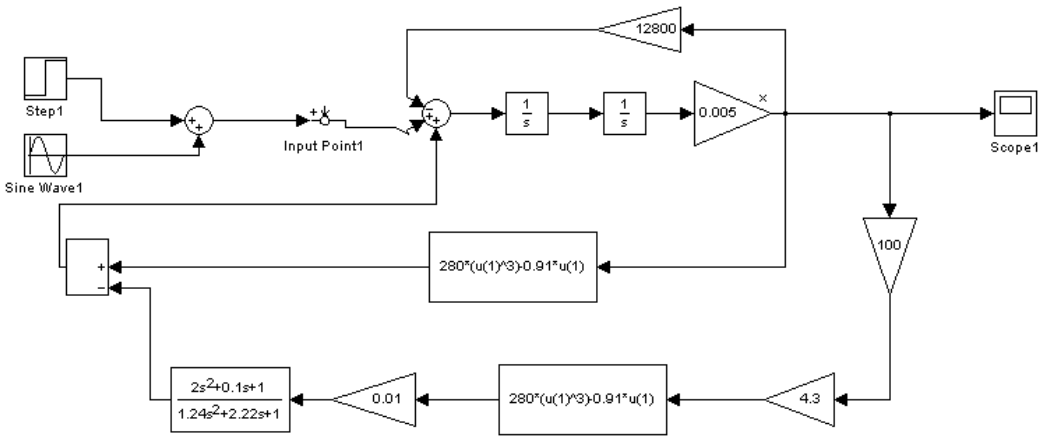


Рисунок 3 – Модель виброизолирующей подвески с нелинейным компенсатором жесткости, с линейной системой перестройки и корректирующим звеном

Результаты моделирования виброизолятора с линейной системой перестройки представлены на рисунках 4 – 10.

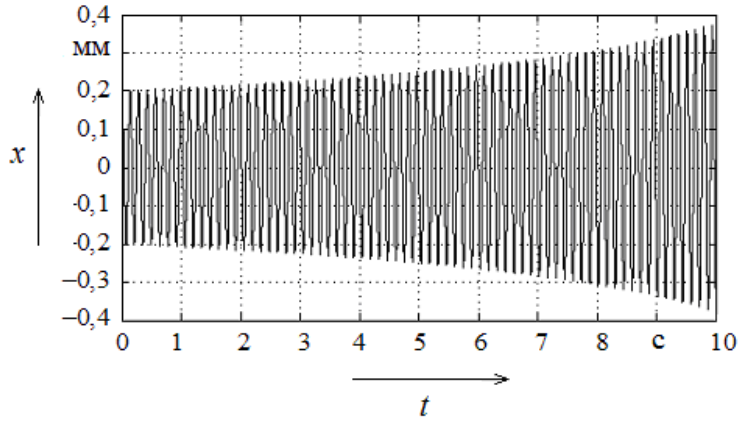


Рисунок 4 – Осциллограмма работы виброизолятора с линейным регулятором, без корректирующего звена

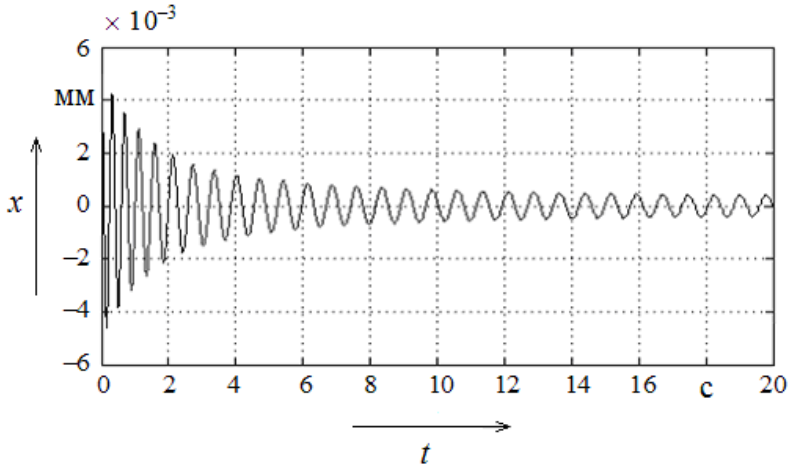


Рисунок 5 – Осциллограмма работы виброизолятора с линейным регулятором и с введенным корректирующим звеном $T_1 = 2$ с, $T_2 = 0{,}1$ с, без наброса нагрузки

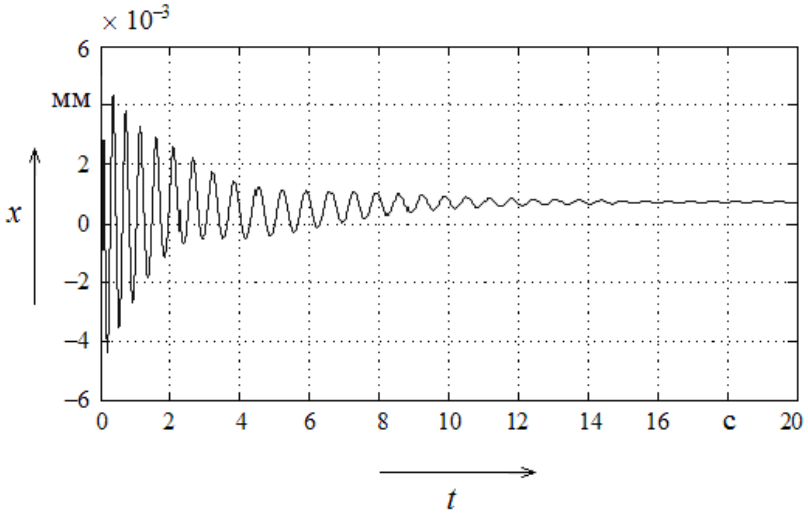


Рисунок 6 – Осциллограмма работы виброизолятора с линейным регулятором, с введенным корректирующим звеном $T_1 = 2$ с, $T_2 = 0{,}1$ с и с набросом нагрузки

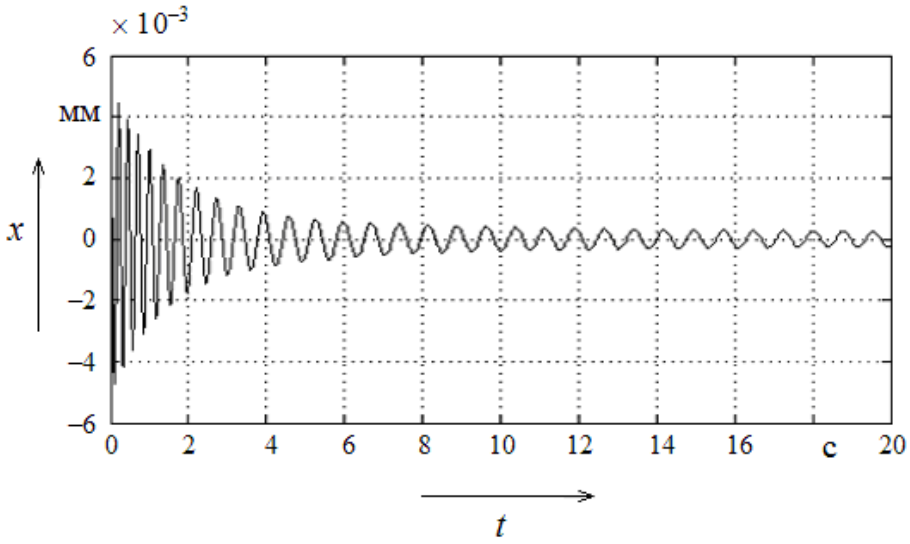


Рисунок 7 – Осциллограмма работы виброизолятора с линейным регулятором и с введенным корректирующим звеном $T_1 = 5$ с, $T_2 = 0{,}1$ с, без наброса нагрузки

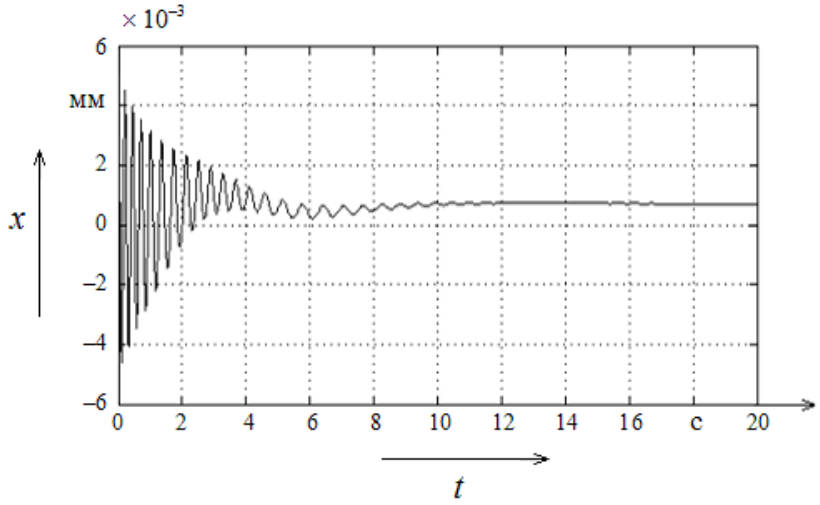


Рисунок 8 – Осциллограмма работы виброизолятора с линейным регулятором и с введенным корректирующим звеном $T_1 = 5$ с, $T_2 = 0{,}1$ с, с набросом нагрузки

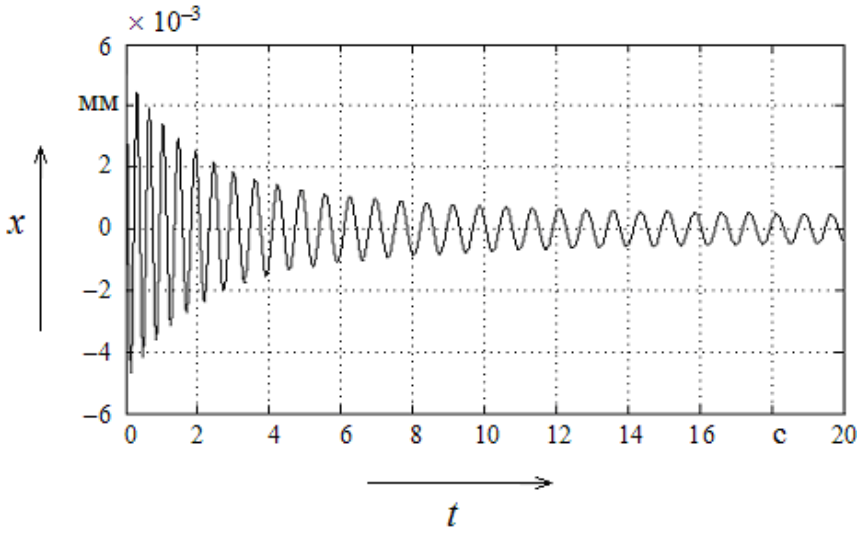


Рисунок 9 – Осциллограмма работы виброизолятора с линейным регулятором и с введенным корректирующим звеном $T_1 = 2$ с, $T_2 = 1$ с, без наброса нагрузки

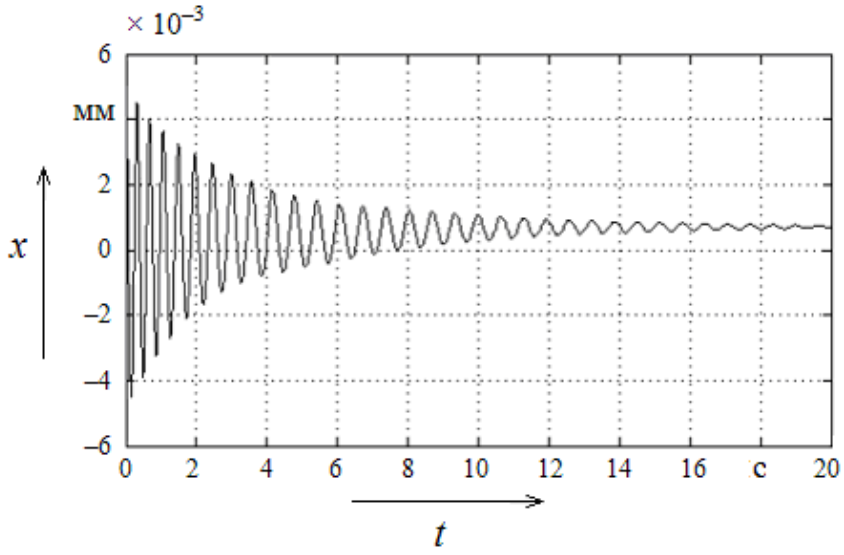


Рисунок 10 – Осциллограмма работы виброизолятора с линейным регулятором и с введенным корректирующим звеном $T_1 = 2$ с, $T_2 = 1$ с, с набросом нагрузки

Моделирование виброизолирующей подвески с использованием линейного регулятора показывает, что система устойчива при применении корректирующего звена, имеющего вторую степень производной. Анализируя полученные осциллограммы работы виброизолятора на рисунках 4 – 10, можно заметить, что в системе присутствуют автоколебания, т. е. колебания с постоянной амплитудой и частотой. Тем не менее из осциллограммы на рисунках 6 и 8 видно, что изменением параметров корректирующего звена можно свести автоколебания до пренебрежимо малых величин.

Применение разработанной математической модели позволяет оценить свойства и характеристики виброизолирующей подвески подвижного состава на стадии теоретической разработки и скорректировать желаемые свойства.

Список литературы

1. Гурова, Е. Г. Виброизолирующая подвеска судовой энергетической установки с нелинейным электромагнитным компенсатором жесткости: Автореф. дис... канд. техн. наук / Новосибирская гос. акад. водного трансп. Новосибирск, 2008. – 23 с.

2. Гурова, Е. Г. Аппроксимация закона регулирования нелинейной системы перестройки

компенсатора жесткости [Текст] / Е. Г. Гурова, В. Ю. Гросс// Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока: Сб. науч. тр. / Новосибирская гос. акад. водного трансп. – Новосибирск, 2010. – № 1. – С. 307 – 309.

3. Гурова, Е. Г. Виброизолирующие подвески транспортных энергетических установок с нелинейными электромагнитными компенсаторами жесткости [Текст] / Е. Г. Гурова / Новосибирский гос. техн. ун-т. – Новосибирск, 2012. – 156 с.

4. Зуев, А. К. Высокоэффективная виброизоляция судового энергетического оборудования [Текст] / А. К. Зуев, О. Н. Лебедев / Новосибирская гос. акад. водного трансп. – Новосибирск, 1997. – 119 с.

5. Зуев, А. К. Основные положения теории виброизоляции произвольных пространственных колебаний [Текст] / А. К. Зуев // Снижение вибрации на судах: Сб. науч. тр. / Новосибирский ин-т инженеров водного трансп. – Новосибирск, 1991. – С. 4 – 17.

6. Пат. 97783 Российская Федерация, МПК F 16 F 6/00, F 16 F 15/03. Виброизолятор с электромагнитным компенсатором жесткости [Текст] / Гурова Е. Г., Гросс В. Ю.; заявитель и правообладатель Новосибирский ин-т инженеров водного трансп. № 2010121808/11; заявл. 28.05.10; опубл. 23.06.10, Бюл. № 26. – 7 с.

УДК 629.4.015: 629.42: 625.1.03

А. Г. Ламкин, С. Б. Олешко, М. Ю. Пустоветов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМА ЗАГРУЖЕННОСТИ ПО СЦЕПЛЕНИЮ ЛОКОМОТИВОВ С АСИНХРОННЫМИ ТЯГОВЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Разработан метод определения режима загруженности локомотивов по сцеплению на основе статистического критерия Фишера. Представлены результаты применения метода к данным опытных поездок с электровозом 2ЭС10 на Свердловской железной дороге.

В России осуществляется серийное производство и ввод в эксплуатацию грузовых локомотивов с асинхронными тяговыми двигателями (АТД). В связи с этим актуальна задача установления критических норм масс (КНМ) поездов для вождения локомотивами, оснащенными АТД. Одним из критериев, по которым в настоящее время устанавливается КНМ для электровозов с коллекторными тяговыми двигателями, является режим загруженности локомотива по сцеплению [1]. Согласно выводам в работах [1, 2] различают четыре режима загруженности локомотива по сцеплению: экономный, рациональный, интенсивный и недопустимый. Временная методика [1] устанавливает численные значения критериев проскальзывания колесных пар локомотива для разграничения режимов загруженности по сцеплению лишь для ограниченного количества эксплуатировавшихся ко времени ввода в действие документа серий электровозов переменного и постоянного тока. В связи с этим рекомендации работы [1] не применяются к автономным локомотивам и локомотивам с АТД.

Предлагается оценивать режим загруженности локомотивов по сцеплению на основании сравнения кривой расчетного коэффициента сцепления $\psi_к$ для выбранной серии локомотива и полученных в результате опытных поездок кривых расчетного коэффициента тяги $\psi_{тк}$. Примем допущение о примерном соответствии кривой $\psi_к$ рациональному режиму загруженности локомотива по сцеплению. Коэффициент тяги $\psi_т$ определяется как отношение мгновенной реализуемой локомотивом силы тяги к сцепной массе локомотива. $\psi_к$ является предельным значением $\psi_т$ [3]. Можно получить $\psi_{тк}$ как тренд измеренных значений $\psi_т$ в виде дробно-линейной функции (используется в источниках [4, 5] для описания $\psi_к$ локомотивов), вычислив коэффициенты *A, B, C, D, E*:

$$\psi_{\text{тк}} = A + \frac{B}{C + D \cdot v} - E \cdot v, \quad (1)$$

где v – скорость движения поезда.

В выражении (1) можно использовать скорость движения локомотива, что тем более справедливо для асинхронного тягового электропривода, так как он значительно меньше склонен к боксованию по сравнению с коллекторным приводом из-за большей жесткости механических характеристик, плавного и поосного регулирования силы тяги.

В основе методики оценки режима загруженности локомотивов по сцеплению лежит статистический односторонний критерий Фишера [6], позволяющий оценить, можно ли считать сравниваемые выборочные дисперсии s_1^2 и s_2^2 оценками одной и той же генеральной дисперсии. Иными словами, критерий позволяет выяснить для заданного уровня значимости p, можно ли считать, что набор числовых значений, полученных одним способом, и набор числовых значений, полученных другим способом ($\psi_{\text{тк}}$ и $\psi_{\text{к}}$), являются описанием одного и того же процесса (сцепления колес локомотива с рельсами). Более конкретно количественно при помощи критерия Фишера и качественно путем анализа расположения кривой $\psi_{\text{к}}$ относительно кривой $\psi_{\text{тк}}$ в функции v решается задача о степени совпадения этих двух кривых. На основании этого делается вывод о режиме работы локомотива в смысле загруженности по сцеплению. Таким образом, необходимо вычислить и подвергнуть сравнению $s_{\text{к}}^2$ и $s_{\text{тк}}^2$. Для правомерности использования одностороннего критерия Фишера необходимо, чтобы выполнялось неравенство $s_1^2 > s_2^2$. Односторонний критерий Фишера представляет собой выражение:

$$\frac{s_1^2}{s_2^2} \le F_{1-p}(n_1 - 1, n_2 - 1), \quad (2)$$

где $F_{1\text{-}p}(n_1 - 1, n_2 - 1)$ – табличное [6] или вычисленное значение квантиля Фишера.

Уровнем значимости называют оценку, характеризующую возможное количество ошибок в серии испытаний, т. е. при сопоставлении кривых $\psi_{\text{тк}}(v)$ и $\psi_{\text{к}}(v)$. Например, $p = 0{,}05$ означает, что рискуем ошибиться в пяти из ста испытаний.

Электронные таблицы *Excel* позволяют вычислить значение квантиля Фишера при помощи функции «FРАСПОБР».

Для $\psi_{\text{тк}}(v)$ выборочная дисперсия $s_{\text{тк}}^2$ рассчитывается по выражению:

$$s_{\text{тк}}^2 = \frac{1}{n_{\text{тк}} - 1}\left(\psi_{\text{тк1}}^2 + \psi_{\text{тк2}}^2 + \ldots + \psi_{\text{тк}n_{\text{тк}}}^2 - \frac{\left(\psi_{\text{тк1}} + \psi_{\text{тк2}} + \ldots + \psi_{\text{тк}n_{\text{тк}}}\right)^2}{n_{\text{тк}}} \right), \quad (3)$$

для $\psi_{\text{к}}(v)$ выборочная дисперсия $s_{\text{к}}^2$ вычисляется по уравнению:

$$s_{\text{к}}^2 = \frac{1}{n_{\text{к}} - 1}\left(\psi_{\text{к1}}^2 + \psi_{\text{к2}}^2 + \ldots + \psi_{\text{к}n_{\text{к}}}^2 - \frac{\left(\psi_{\text{к1}} + \psi_{\text{к2}} + \ldots + \psi_{\text{к}n_{\text{к}}}\right)^2}{n_{\text{к}}} \right), \quad (4)$$

где индексы тк и к означают принадлежность к расчетному коэффициенту тяги и расчетному коэффициенту сцепления;

n – число испытаний.

Делать выводы о загруженности локомотива по сцеплению для анализируемого интервала скоростей движения предлагается следующим образом.

Если неравенство (2) не верно и при этом график $\psi_{\text{тк}}(v)$ проходит не выше графика $\psi_{\text{к}}(v)$, то локомотив работает в экономном режиме загруженности по сцеплению.

Если неравенство (2) верно и при этом график $\psi_{\text{тк}}(v)$ проходит не выше графика $\psi_{\text{к}}(v)$, то локомотив работает в рациональном режиме загруженности по сцеплению.

Если неравенство (2) верно и при этом график $\psi_{\text{тк}}(v)$ полностью или частично проходит выше графика $\psi_{\text{к}}(v)$, то локомотив работает в интенсивном режиме загруженности по сцеплению.

Если неравенство (2) не верно и при этом график $\psi_{тк}(v)$ полностью или частично проходит выше графика $\psi_к(v)$, то локомотив перегружен по сцеплению, т. е. КНМ для данных условий эксплуатации завышена, что соответствует недопустимому режиму эксплуатации локомотива.

Аналитическое выражение и графический вид $\psi_к(v)$ для электровоза 2ЭС10 опубликованы в работе [5]. При $v > 5$ км/ч зависимость близка к линейной. Это тем более справедливо при рассмотрении не полного диапазона скоростей движения поезда, а отдельных его интервалов (чаще всего при определении КНМ практически важным является рассмотрение режима преодоления расчетного подъема).

В ходе опытной поездки в функции времени t или пройденного пути S фиксируются сила тяги и v. На основании этих данных строятся зависимости $\psi_к(t)$ и $\psi_т(t)$ или $\psi_к(S)$ и $\psi_т(S)$. Для более подробного анализа выбираются те участки, где наблюдается близость значений $\psi_т$ и $\psi_к$. Причем если значения $\psi_т$ и $\psi_к$ близки, но все мгновенные значения $\psi_т$ расположены не выше значений $\psi_к$, то режим загрузки по сцеплению рациональный или экономный. Наиболее интересны для анализа участки, где все или часть значений $\psi_т$ расположены выше значений $\psi_к$. Такие случаи целесообразно рассматривать подробно.

В ноябре 2012 г. ОАО «ВНИИЖТ» при участии представителей ПКБ ЦТ и РГУПСа проводились опытные поездки с электровозом 2ЭС10 на Свердловской железной дороге. Данные, полученные в ходе поездок, послужили материалом для статистического анализа на предмет определения режимов загруженности 2ЭС10 по сцеплению.

При рассмотрении совокупно большого количества измеренных в опытных поездках значений $\psi_т$ для случаев близкого расположения зависимостей $\psi_к(t)$ и $\psi_т(t)$ выявлено, что распределение значений $\psi_т$ подчиняется нормальному закону. Так как, с одной стороны, средствами распространенных электронных таблиц *Excel* затруднительно получить для множества значений $\psi_т$ тренд $\psi_{тк}(v)$ в виде (1), а с другой стороны, для всех рассмотренных по итогам опытных поездок случаев диапазон изменения скорости движения позволяет считать график $\psi_к(v)$ близким к прямой, то допустимо получать графики $\psi_{тк}(v)$ в виде линейных трендов.

Для иллюстрации практического использования разработанного метода оценки режима загруженности электровоза с АТД по сцеплению рассмотрим результаты поездок (фрагменты): Пермь – Екатеринбург от 11 ноября 2012 г. с поездом массой 6304 т (рисунки 1, 2); Екатеринбург – Пермь от 13 ноября 2012 г. с поездом массой 6249 т (рисунки 3, 4); Екатеринбург – Дружинино от 6 ноября 2012 г. с поездом массой 5151 т (рисунки 5, 6). Выводы сведены в таблицу.

Рисунок 1 – Зависимости $\psi_к$ (жирная кривая 1), $\psi_т$ (точки 2), тонкая кривая 3 – скорость электровоза в функции астрономического времени для части поездки Пермь – Екатеринбург от 11 ноября 2012 г. с поездом массой 6304 т

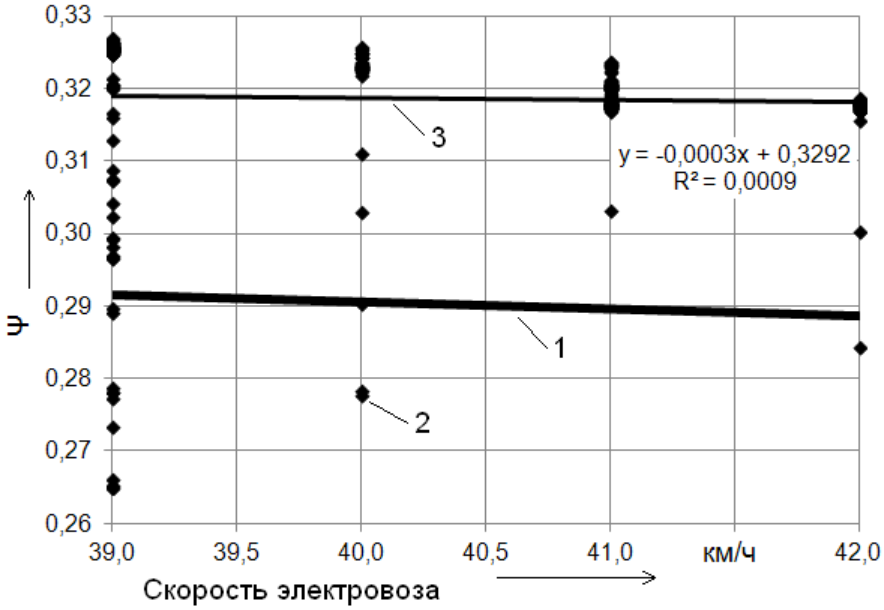


Рисунок 2 – Зависимости от скорости электровоза $\psi_к$ (кривая 1), $\psi_т$ (точки 2) и $\psi_{тк}$ (прямая 3) для рисунка 1

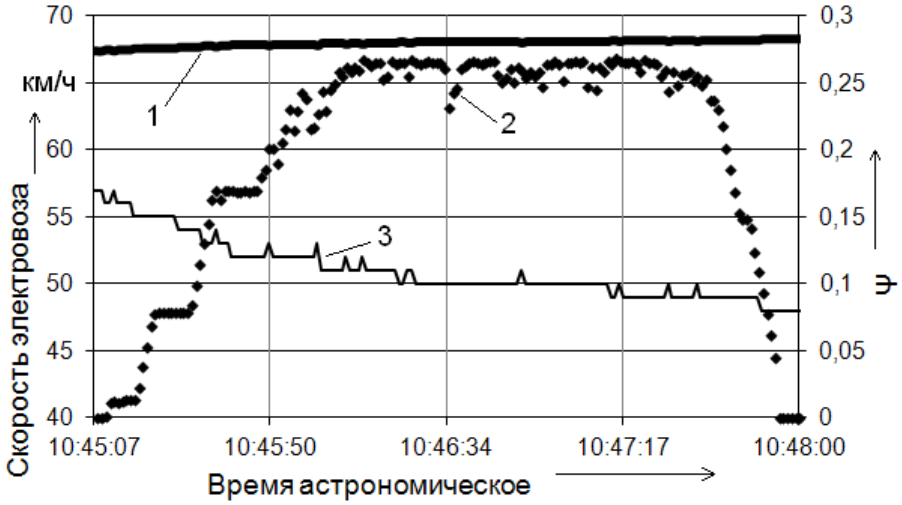


Рисунок 3 – Зависимости $\psi_к$ (жирная кривая 1), $\psi_т$ (точки 2), тонкая кривая 3 – скорость электровоза в функции астрономического времени для части поездки Екатеринбург – Пермь от 13 ноября 2012 г. с поездом массой 6249 т

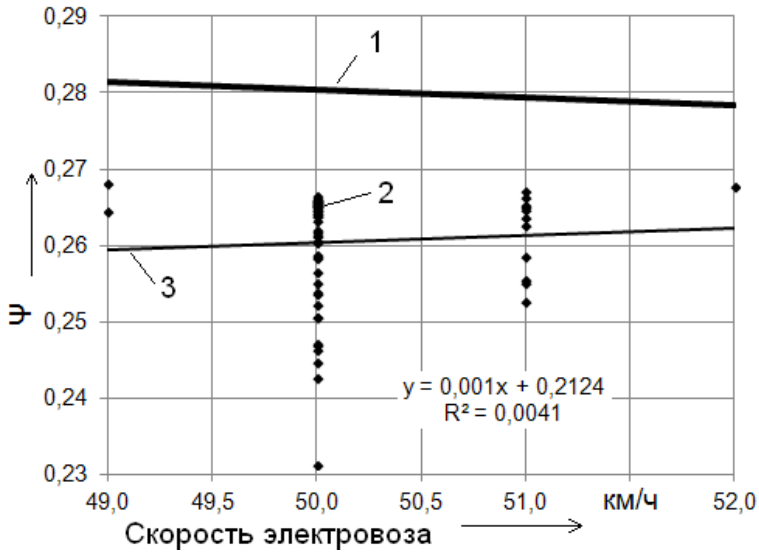


Рисунок 4 – Зависимости от скорости электровоза $\psi_к$ (кривая 1), $\psi_т$ (точки 2) и $\psi_{тк}$ (прямая 3) для рисунка 3

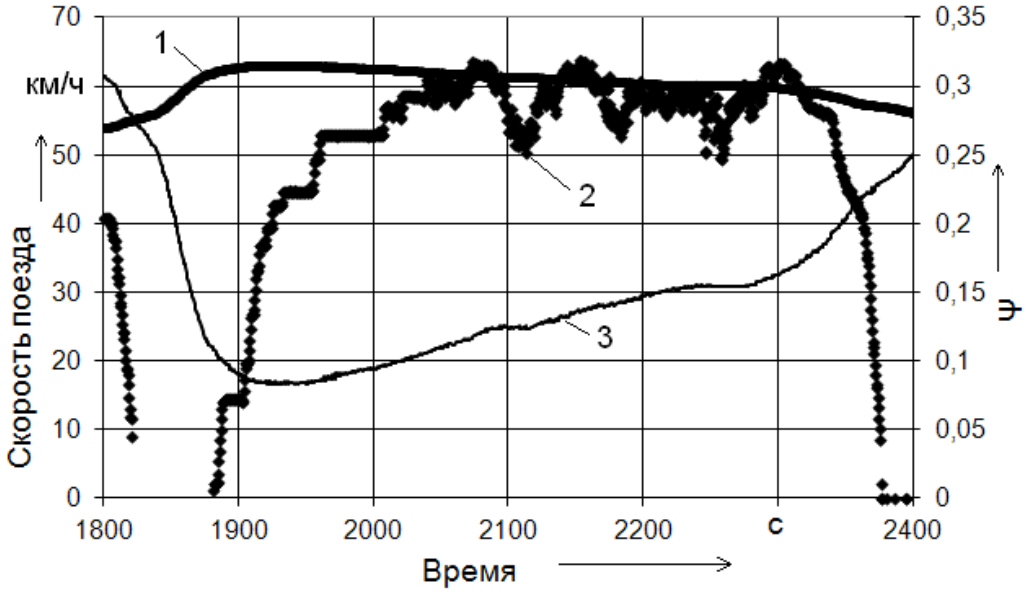


Рисунок 5 – Зависимости $\psi_к$ (жирная кривая 1), $\psi_т$ (точки 2), тонкая кривая 3 – скорость поезда в функции времени для части поездки Екатеринбург – Дружинино от 6 ноября 2012 г. с поездом массой 5151 т

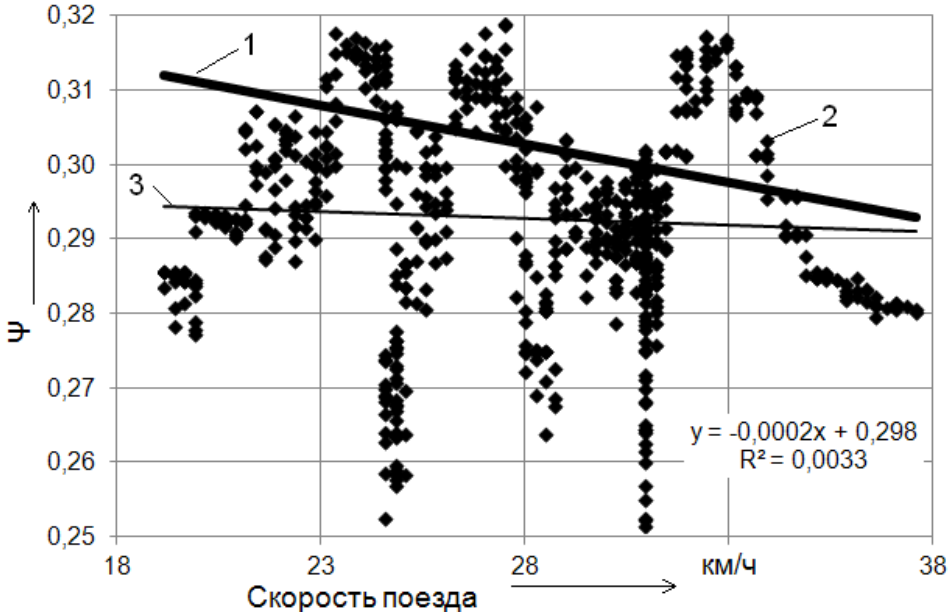


Рисунок 6 – Зависимости от скорости поезда $\psi_к$ (кривая 1), $\psi_т$ (точки 2) и $\psi_{тк}$ (прямая 3) для рисунка 5

При построении в *Excel* тренда $\psi_{тк}(v)$ можно вывести на экран его уравнение и R^2 – коэффициент детерминации, говорящий о том, в какой мере данный тренд объясняет расположение исходных точек $\psi_т$ (см. рисунки 2, 4, 6). В приведенных в статье примерах величина R^2 весьма мала. Как показал опыт обработки результатов опытных поездок, для линейных трендов R^2 редко превышает 0,7. Тем не менее, по мнению авторов, нет смысла стремиться к высокому значению R^2, усложняя геометрию кривой $\psi_{тк}(v)$. Аппроксимация множества точек $\psi_т$ прямой линией $\psi_{тк}(v)$, получаемая в виде тренда средствами *Excel*, является наилучшим вариантом аппроксимации в заданном классе функций (линейных). При этом имеем наглядное представление о взаимном расположении $\psi_{тк}(v)$ и $\psi_к(v)$.

Режимы загруженности электровозов по сцеплению, описанные в источниках [1, 2], интересны для установления КНМ потому, что тесно связаны с повреждаемостью оборудования локомотива, количеством растяжек поездов, затратами на ремонт и содержанием локомотивного и путевого хозяйства. Для надежной и достоверной увязки этих характеристик с

показателями проскальзывания колесных пар, значениями коэффициента тяги или другим критерием в случае новых локомотивов, в том числе с АТД, требуется анализ огромного количества статистической информации о процессе эксплуатации. В этой связи важно, чтобы статистика могла быть собрана в возможно краткий срок, чему, по мнению авторов, отвечает описанный в настоящей статье метод: применение статистического критерия для определения режима загруженности локомотива по сцеплению дает возможность автоматизировать этот процесс; метод допускает использование скорости локомотива, т. е. использование записей бортовых регистраторов (допустима обработка данных по одной секции локомотива).

Выводы по фрагментам поездок

Иллюстрации	Количество проанализированных точек	Характеристика участка	$\frac{s_1^2}{s_2^2}$	Значение квантиля Фишера при уровне значимости $p = 0{,}05$	Положение линейного тренда $\psi_{тк}$ относительно $\psi_к$ / значимость отличия	Режим загруженности по сцеплению
Рисунки 1, 2	375	1435,8 – 1440,7 км перегона Пермь – Бахаревка (начало расчетного подъема)	11,406	1,186	выше / значимое	недопустимый
Рисунки 3, 4	63	1739,8 – 1739 км перегона Бойцы – Коуровка (подъем до 8,8 ‰, кривые с минимальным радиусом 620 м)	1,017	1,524	ниже / незначимое	рациональный
Рисунки 5, 6	660	1592,1 – 1590,1 км перевала через вершину расчетного подъема на перегоне Ревда - Ильмовка. Начинается на участке с уклоном 7,7 ‰ с множественными кривыми (радиусы первых двух – 541 и 595 м)	26,493	1,137	ниже / значимое	экономный

В случае проведения опытной поездки с тягово-энергетическим вагоном-лабораторией метод позволяет минимизировать количество измерительных каналов для определения режима загруженности локомотива по сцеплению. Требуется измерять скорость движения поезда по показаниям расторможенной колесной пары вагона-лаборатории, а также силу тяги на автосцепке вагона. При этом силу тяги на автосцепке следует пересчитывать в касательную силу тяги локомотива.

В ближайшее время планируется провести анализ результатов опытных поездок с локомотивом, оснащенным коллекторным тяговым приводом постоянного тока.

Список литературы

1. Временная методика и инструкция по проведению опытных поездок для определения критических норм масс грузовых поездов при электровозной тяге [Текст]: утв. зам. министра путей сообщения Рос. Федерации А. Н. Кондратенко 29.03.95.

2. Мугинштейн, Л. А. Нестационарные режимы тяги (Сцепление. Критическая норма массы поезда) [Текст] / Л. А. Мугинштейн, А. Л. Лисицын. – М.: Интекст, 1996. – 176 с.

3. Осипов, С. И. Основы тяги поездов [Текст] / С. И. Осипов, С. С. Осипов/ УМК МПС России. – М., 2000. – 592 с.

4. Правила тяговых расчетов для поездной работы [Текст]. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.

5. Экспериментальное определение коэффициента сцепления колес электровоза 2ЭС10 с рельсами [Текст] / В. А. Кучумов, Р. В. Мурзин и др. // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург, 2012. – № 1 (32). – С. 114 – 118.

6. Пустыльник, Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений [Текст] / Е. И. Пустыльник. – М.: Наука, 1968. – 288 с.

УДК 629.4.027.2

П. М. Терехов, О. Ю. Бургонова, А. А. Воробьев

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ БАНДАЖЕЙ КОЛЕСНЫХ ПАР

В статье отмечена необходимость совершенствования технологии ремонта колесных пар локомотивов. Предложена модель описания процесса обработки бандажей на фрезерных станках на основе термомеханического подхода к восстановлению поверхности катания бандажей. На основе модели приведен метод аналитического определения сил фрезерования, температуры передней и задней поверхностей твердосплавных пластин. Представлены результаты сопоставления экспериментальных данных и данных, полученных аналитически.

Одним из способов восстановления профиля поверхности катания железнодорожных колес, широко используемых на ремонтных предприятиях отечественных железных дорог, является способ фасонного фрезерования. Фрезерование осуществляется на станках КЖ-20 различной модификации, инструментом является сборная фасонная фреза. Конструкция фрезы предусматривает 10 «ножей», наклоненных к основной плоскости под углом $\omega = 15°$, в каждом из которых закреплено 10 − 12 круглых режущих пластин диаметром 12 мм.

Введение новой редакции ГОСТ 398-2010 предполагает замену стали марки 3 маркой 4, имеющей твердость 320 – 360 НВ. Использование такой стали, по мнению ряда ученых, позволит улучшить служебные свойства бандажей, увеличив их пробег между обточками и тем самым сократив эксплуатационные издержки. Однако следует отметить, что увеличение твердости бандажей приведет не только к увеличению их долговечности, но и из-за снижения обрабатываемости ухудшит их ремонтопригодность. Так, в работе [1] указывалось, что существовавшая в предыдущей редакции ГОСТа марка стали 3 с повышенными механическими свойствами практически не использовалась именно по причине затруднений, возникающих при механической обработке бандажей в депо. Таким образом, улучшение эксплуатационных качеств создает необходимость совершенствования технологии ремонта колесных пар локомотивов в преддверии начала широкого использования твердых бандажей.

Ниже приведен ряд существенных вопросов восстановления поверхности катания методом фасонного фрезерования, который рассматривался в работе [2]:

– критический анализ ранее изданных работ, посвященных этому вопросу;

– кинематическое описание процесса;

– определение зависимостей для сил, действующих на твердосплавные пластины фрезы.

Настоящая статья является логическим продолжением работы [2], поэтому некоторые положения, введенные, использованные или доказанные в ней, описываются в данной статье менее подробно и требуют рассмотрения в совокупности с материалами [2].

Аналитическое определение основных характеристик процесса восстановления поверхности катания бандажей.

Обработка поверхности колесных пар фасонным твердосплавным сборным инструментом представляет собой нестационарное несвободное резание с криволинейной режущей кромкой и круговым движением подачи, при котором оси вращения инструмента и колеса параллельны. Еще одной особенностью является то, что обрабатываемая и обработанная поверхности (профиль колеса) представляют собой сложную кривую, состоящую из прямолинейных участков, вогнутых и выпуклых кривых. Кроме того, сложность схематизации данного процесса связана с наличием не только круговой подачи колеса, но и конструктивной подачи твердосплавных пластин, смещенных на оси фрезы относительно друг друга.

Для описания процесса восстановления поверхности катания используется две системы координат. Неподвижная система координат, технологические оси которой выбраны относительно станка: ось W совпадает с осью вращения фрезы, оси H и V расположены в рабочей плоскости, ось H направлена к оси вращения колеса, а V – перпендикулярна ей. Подвижная

система координат x_i, y_i, z_i, связанная с режущим лезвием и вращающаяся относительно оси W. Ось z_i находится в плоскости резания и совпадает с направлением вектора скорости главного движения; ось x_i находится в основной плоскости и сонаправлена со следом образуемой поверхности в основной плоскости. Ось y_i находится в основной плоскости и перпендикулярна осям z_i и x_i. Особенностью кинематического описания, предложенного в статье [2], является учет сложности профиля колеса, представляющего собой набор из прямых, наклоненных к оси вращения колеса, вогнутых и выпуклых кривых. При этом весь профиль колеса в соответствии с конструкцией инструмента разбивается на участки, для каждого из которых задается фиксированный угол наклона образующей поверхности Ψ_i, значения радиуса фрезеруемого участка колеса $R^i_{\text{и}}$ и фрезы – $R^i_{\text{ф}}$, где i – номер участка. Величины $R^i_{\text{и}}$ и $R^i_{\text{ф}}$ принимаются как значения для середины участка, а Ψ_i – как наклон линии, соединяющей крайние участки профиля к оси W.

Фреза работает по генераторной схеме резания. После врезания на всю глубину припуска срезаемый по ширине колеса слой металла разделяется на части соответственно числу режущих элементов, каждая точка колеса обрабатывается только одной пластиной. Величина смещения центров вращения соседних твердосплавных пластин относительно оси W определяет конструктивную подачу $S_{\text{кон}}$. Для каждого участка профиля величина ширины срезаемой стружки b_i будет определяться как [3]

$$b_i = 2\pi \cdot c \frac{n^u}{n^{\text{ф}}} \cos\Psi_i \sin\Theta, \tag{1}$$

где c – расстояние между осью фрезы и осью обрабатываемого изделия $O_{\text{и}}$ $O_{\text{ф}}$; $n^{\text{и}}$ – частота вращения колеса; $n^{\text{ф}}$ – частота вращения фрезы; Θ – угол контакта фрезы с обрабатываемым колесом.

Толщина срезаемой стружки, обусловленная конструктивной подачей,

$$a_i = \frac{S_{\text{кон}}}{\cos\Psi_i}. \tag{2}$$

При определении сил, действующих на твердосплавные пластинки, рассматриваются отдельно силы, действующие на передней (R_ξ, R_v) и задней (F_1 и N_1) поверхностях инструмента. На каждом i-м участке, участвующем в рассматриваемый момент времени в процессе резания, на режущую твердосплавную пластину действуют силы резания, проекции которых на оси подвижной системы координат x_i, y_i, z_i, определяются по уравнениям:

$$P_{yi} = K_v S_b a_i b_i \left(1 - \frac{b_i}{2r}\right) + \left(\sigma_b h_з + \overline{q}_F h_1\right) b_i \sqrt{2\frac{r}{b_i} - 1}; \tag{3}$$

$$P_{xi} = K_v S_b a_i b_i \left[\frac{r}{2b_i} \arcsin\sqrt{\frac{b_i}{r}\left(2 - \frac{b_i}{r}\right)} - \left(1 - \frac{b_i}{r}\right)\frac{1}{2}\sqrt{2\frac{r}{b_i} - 1}\right] + \left(\sigma_b h_з + \overline{q}_F h_1\right) b_i; \tag{4}$$

$$P_{zi} = K_\xi S_b a_i b_i + \left(\mu_1 \sigma_b h_з + \overline{q}_F h_1\right) r \arcsin\frac{\sqrt{b_i\left(2r - b_i\right)}}{r}, \tag{5}$$

где K_v – удельная сила на передней поверхности в основной плоскости в направлении плоскости стружкообразования; K_ξ – удельная сила на передней поверхности, перпендикулярная режущей кромке; r – действительный радиус твердосплавной пластинки; S_b – действительный предел прочности обрабатываемого материала при растяжении; σ_b – условный предел прочности при растяжении; μ_1 – коэффициент трения; $h_з$ – высота фаски износа, h_1 – высота застойной зоны; $\overline{q}_F$ – касательное напряжение на задней поверхности застойной зоны.

Удельные силы на передней поверхности режущего лезвия вычисляются по формулам [4]:

$$K_v = \frac{\overline{q}_F}{S_b}\frac{c}{a}\frac{1}{\zeta}\frac{\zeta - \sin\gamma}{\cos\gamma} - \frac{\overline{\tau}}{S_b}\frac{\zeta + 1/\zeta - 2\sin\gamma}{\cos\gamma} tg\gamma; \quad (6)$$

$$K_\xi = \frac{\overline{\tau}}{S_b}\frac{\zeta + 1/\zeta - 2\sin\gamma}{\cos\gamma} + \frac{\overline{q}_F}{S_b}\frac{c}{a}\frac{1}{\zeta}, \quad (7)$$

где $\overline{q}_F$ – касательное напряжение по передней поверхности; c – полная длина контакта стружки с режущим лезвием; a – толщина срезаемой стружки; ξ – усадка стружки; τ_Y – средние касательные напряжения в условной плоскости сдвига; γ – главный передний угол.

Проекции сил резания на технологическую ось станка V, величина и изменение которой определяют отжим инструмента в процессе обработки, а также на оси H, W для i-го участка определяются так:

$$P_{Vi} = \left(P_{yi}\cdot\cos\Psi_i - P_{xi}\cdot\sin\Psi_i\right)\cos\Theta - P_{zi}\cdot\sin\Theta; \quad (8)$$

$$P_{Hi} = \left(P_{yi}\cdot\cos\Psi_i - P_{xi}\cdot\sin\Psi_i\right)\sin\Theta + P_{zi}\cdot\cos\Theta; \quad (9)$$

$$P_{Wi} = P_{xi}\cdot\cos\Psi_i - P_{yi}\cdot\sin\Psi_i. \quad (10)$$

По данным о составляющей силы резания P_{zi} на каждом i-м промежутке можно определить величину мощности фрезерования $N_i^e(\Theta)$ и крутящего момента $M_i^{\text{кр}}(\Theta)$, создаваемого на оси фрезы как функцию от угла контакта Θ:

$$M_i^{\text{кр}}(\Theta) = R_i^{\text{ф}}\cdot P_i^z(\Theta); \quad (11)$$

$$N_i^e(\Theta) = M_{\text{кр}}(\Theta)\cdot\frac{\pi n_{\text{ф}}}{30}. \quad (12)$$

Температура, возникающая на передней и задней поверхностях твердосплавных пластин, определялась в соответствии с термомеханическим подходом, описанным в работах [4, 5]. При расчете решалась задача теплопроводности, описываемая уравнением Фурье с граничными условиями всех четырех видов. При этом определяющими являлись граничные условия со стороны передней и задней поверхностей твердосплавной пластины, контактирующих с деталью и стружкой.

При расчете температуры на передней поверхности учитывается влияние температуры и скорости деформации на свойства обрабатываемого материала, для этого длина контакта на передней поверхности режущего лезвия при фрезеровании разбивается на два интервала (рисунок 1): на пластическую длину контакта (0, c_1, где участок 0, $\tilde{c}$ – участок деформационного упрочнения, $\tilde{c}, c_1$ – участок температурного разупрочнения), зависящую от температуры, и часть упругого контакта (c_1, c_2), не зависящего от температуры. Затем оба эти участка разбиваются на восемь интервалов длиной H, для каждого из которых рассчитывается температура. Первоначально на первом участке рассчитывается безразмерный тепловой поток q_0, в соответствии с которым определяется температура T_{10}. По температуре T_{10} вычисляется плотность теплового потока в конце первого интервала q_{11}. Влияние температуры учитывается в соответствии с эмпирической формулой [4], отражающей уменьшение предела текучести при приближении температуры передней T_{10} поверхности к температуре плавления обрабатываемого материала. По разнице плотностей теплового потока q_0 и q_{11} определяется сток K_{11}, при этом новому значению плотности теплового потока соответствует температура T_{11}. Итерации повторяются три – четыре раза до момента, когда изменение температуры, обусловленное изменением характеристик материала при этой температуре, становилось несу-

щественным. Далее вычисляется температура на следующем интервале, для этого температура, полученная при последней итерации, экстраполируется на длину следующего интервала, после чего повторяется цикл итераций, уточняющих значение температуры. На участке упругого контакта изменение теплового потока определяется касательными напряжениями, меньшими, чем предел текучести, расчет температуры проводится по алгоритму, аналогичному используемому на участке пластической деформации.

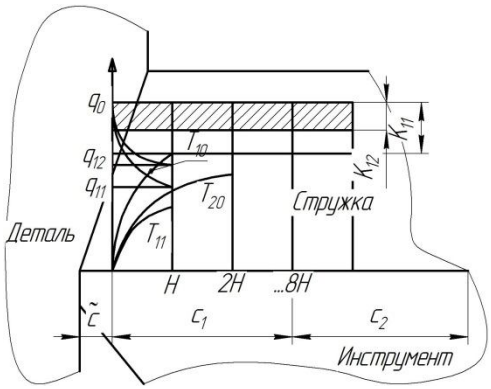


Рисунок 1 – Схема для определения температуры на передней поверхности

Расчет температуры задней поверхности производится аналогично расчету температуры передней поверхности. Учитывается влияние двух источников теплоты (рисунок 2): застойной пластической области, соприкасающейся с линией среза на участке h_1, и фаски износа. Величина застойной пластической области h_1 в связи с наличием упрочняющей фаски длиной f и углом наклона γ_f увеличивается на h_2. Итерации предусмотрены только для участка задней поверхности застойной зоны, которая разбивается на N интервалов. Фаска износа также разбивается на интервалы, длина которых зависит от длины фаски. На каждом интервале фаски износа определялась температура от источника теплоты с безразмерной плотностью теплового потока.

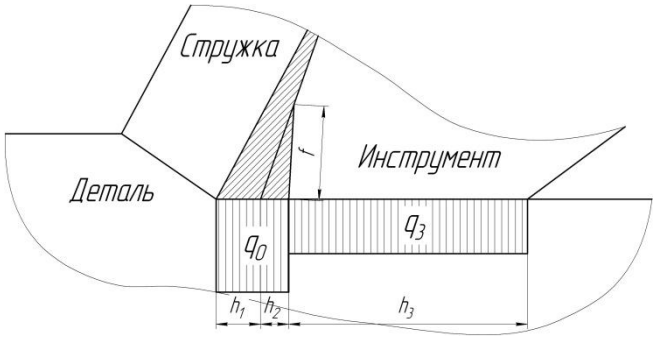


Рисунок 2 – Схема распределения плотности теплового потока на задней поверхности

Касательные напряжения $\bar{q}_F$, определяющие значение удельных сил резания (4), (5), рассчитываются для значения средней температуры на длине участка пластического контакта стружки. Касательные напряжения $\bar{q}_F$ на задней поверхности, определяющие значение сил, действующих на заднюю поверхность (1) – (3), рассчитываются для значения средней температуры на длине пластической застойной области.

Моделирование процесса восстановления поверхности катания бандажей.

Равномерность процесса фасонного фрезерования обеспечивается наличием у фрезы угла наклона ножей ω, из-за существования которого толщина срезаемого слоя на каждой из работающих пластин, а также крутящий момент и мощность фрезерования на каждом участке различны. Для определения суммарной величины крутящего момента, мощности фрезерования составляющих сил резания P_V, P_W, $P_н$ являющихся функциями угла поворота фрезы Θ, необходимо вычислить величину параметров для всех работающих участков и просуммировать их.

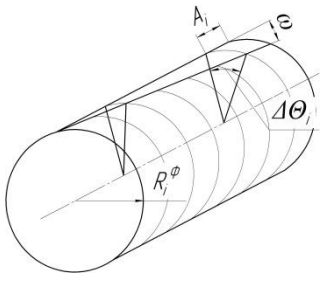


Рисунок 3 – Схема определения угла смещения твердосплавных пластин на одном ноже

На рисунке 3 изображена схема для определения угла ΔΘ – угла относительного смещения в рабочей плоскости твердосплавных пластин, расположенных на одном ноже. Примем для каждого i-го участка профиля поверхности катания колесной пары единственный угол смещения $\Delta\Theta_i$ (рад), определяемый по уравнению:

$$\Delta\Theta_i = \frac{\operatorname{tg}\omega}{R_i^{\phi}}\left(\frac{A_i}{2} + \sum_{i=1}^{i-1} A_i\right), \qquad (13)$$

где A_i – ширина i-го участка.

Для каждой участвующей в процессе резания пластины текущий угол Θ_i, определяющий величину проекций сил резания на технологические оси, крутящий момент, мощность фрезерования и температуру на передней и задней поверхности на *i*-м участке, зависит от фактического поворота фрезы Θ' и угла смещения твердосплавной пластинки $\Delta\Theta_i$ на *i*-м участке. Характеристики процесса фрезерования для всей фрезы определяются суммированием соответствующих характеристик на каждом участке, где в данный момент твердосплавная пластина участвует в процессе резания, критерием чего является выполнение неравенства:

$$0+k\Theta_Z<\Theta_i+k\Theta_Z\le\Theta_i^M+k\Theta_Z, \tag{14}$$

где $k\Theta_Z$ – период, зависящий от угла поворота фрезы и изменяющийся от 1 до Z, $\Theta_i=\Theta'-\Delta\Theta_i$ – текущий угол поворота на *i*-м участке.

Для моделирования процесса фрезерования было использовано приложение Microsoft Office Excel. Для этого в среде Excel создана программа-алгоритм, включающая в себя ряд блоков. В блоке «Исходные данные» (рисунок 4) задается информация о геометрии твердосплавных пластин и обрабатываемого профиля, свойствах бандажа, моделируемых режимах резания и текущем угле поворота фрезы Θ, величину которого можно задавать в пределах от 0 до 360°.

Геометрия обрабатываемого банадажа											Режимы резания	
Номер участка i	Радиус фрезы на участке, R^{Φ}_i мм	Радиус колеса на участке, мм	Ширина интервала A_i, мм	Угол наклона профиля Ψ_i,°	Знак угла наклона профиля Ψ_i,°	Угол начала работы зуба $\Delta\Theta_i$,°	Угол Θ^M_i,°	Угол окончания работы зуба $\Delta\Theta_i+\Theta^M_i$,°	Угол контакта j-го ножа, Θi	Угол контакта j-1 ножа, Θi	Глубина врезания e, мм	8
1	113,74	466,26	14,54	26,37	1	0,78	19,41	20,19	0,00	0,00	Радиус колеса	475
2	108,93	471,07	17,82	8,13	1	2,51	19,94	22,46	0,00	0,00	Радиус фрезы	105
3	106,81	473,19	16,99	5,24	1	4,38	20,19	24,57	0,00	0,00	Расстояние между осями	572
4	105,58	474,42	17,98	2,86	1	6,25	20,33	26,58	0,00	0,00	Угол 360°/Z	36
5	104,66	475,34	18,77	2,90	1	8,22	20,44	28,66	0,00	0,00	Угол наклона ножей, ω'	15
6	101,91	478,09	17,96	14,19	1	10,19	20,78	30,97	0,00	0,00	Текущий поворот Θ,°	360
7	90,22	489,78	10,26	61,45	1	11,70	22,38	34,08	0,00	0,00	Угол поворота j-го ножа Θ',	36
8	77,88	502,12	9,30	30,34	1	12,75	24,42	37,17	23,25	0,00	Вращение фрезы n, об/мин	91
9	77,07	502,93	9,96	21,00	-1	13,78	24,57	38,35	22,22	0,00	Минутная подача колеса S	182
10	86,99	493,01	6,42	68,15	-1	14,66	22,87	37,53	21,34	0,00	Число ножей Z	10
											Количество одновременно	3
Свойства обрабатываемого материала											Частота вращения колеса	0,06098
НВ, МПа	$\delta/100$	m	B_τ	B_q	B_q	K_ε	$\bar{K}_\tau$	ω M^2/c	C_T Дж/м²К	$T_{пл}$,К	Время обработки одного ко	16
2600	0,2	0,15	1,25	0,3	1	1,3	1,6	0,000008	5	1800	Подача на зуб Sz, мм/зуб	2
											Скорость главного движени	60

Геометрия режущего инструмента					
γ	h_3	γ_1	α	ζ	μ_1
-8	0,45	-10	8	1,7	0,6

Рисунок 4 – Исходные данные, задаваемые при моделировании процесса фрезерования

Для каждого участка профиля в блоке «Характеристики процесса на участках» рассчитывается текущий угол поворота фрезы и определяется, находится ли зуб в данный момент в процессе резания. Расчет физических характеристик процесса фрезерования выполняется отдельно для каждой из твердосплавных пластин фрезы. Для этого определяются безразмерные комплексы и характеристики процесса стружкообразования (рисунок 5), составляющие силы фрезерования, крутящий момент и мощность фрезерования, а также рассчитывается распределение температуры и плотности тепловых потоков на передней и задней поверхностях режущего лезвия фрезы с учетом изменения действительных механических свойств обрабатываемого материала под влиянием температуры.

Рисунок 5 – Таблица расчета безразмерных комплексов и характеристик процесса стружкообразования

По результатам расчета параметров фрезерования на участках профиля в блоке «Результаты» определяются суммарные значения составляющих силы фрезерования, крутящего момента и мощности фрезерования. Результаты расчетов представлены в численной и графической форме, позволяющей оценить их изменение в зависимости от поворота фрезы; так, на рисунке 6 показаны основные характеристики процесса восстановления поверхности катания бандажа твердостью 280 НВ с минутной подачей $S_м = 140$ мм/мин, частотой вращения фрезы $n_ф = 70$ об/мин и глубиной врезания $e = 3$ мм.

Θ, °	τ, с	P_H, кН	P_V, кН	P_W, Н	$M^{кр}$, Нм	Ne, кВт
0	0,00000	0,00	0,000	0	0,000	0,000
1	0,00238	0,09	0,13	-0,06	9,83	0,072
2	0,00476	0,24	0,32	-0,14	26,02	0,191
3	0,00714	0,51	0,67	-0,21	53,94	0,395
4	0,00952	0,79	0,99	-0,25	80,90	0,593
5	0,01190	1,23	1,52	-0,28	123,14	0,903
6	0,01429	1,65	1,96	-0,30	161,91	1,187
7	0,01667	2,27	2,66	-0,30	218,58	1,602

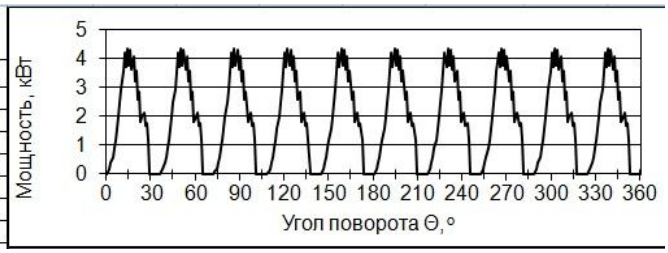
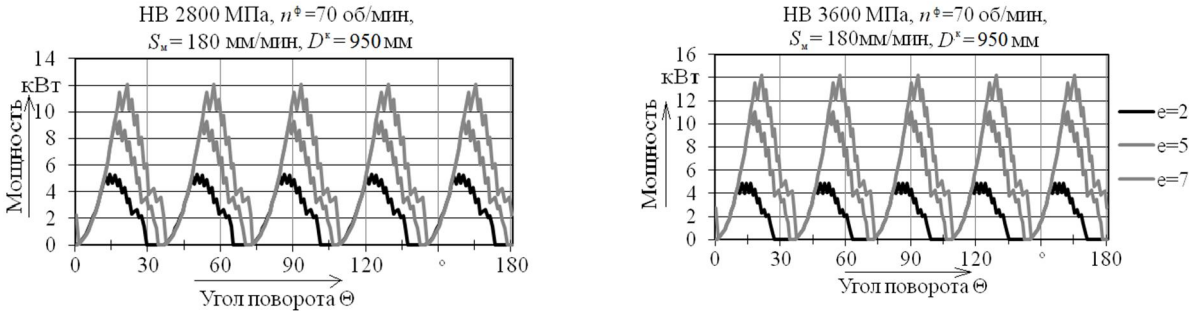


Рисунок 6 – Моделирование технологических составляющих силы фрезерования, мощности и крутящего момента при фрезеровании

Результаты моделирования процесса восстановления поверхности катания бандажей.

Предложенная модель позволяет определять все основные характеристики процесса восстановления поверхности катания бандажей: мощность фрезерования, крутящий момент, проекции сил фрезерования на технологические оси, температуру на передней и задней поверхностях катания. Для каждой характеристики можно проследить влияние на нее параметров режима резания, свойств обрабатываемого материала и геометрии инструмента. На рисунке 7 приведена зависимость изменения мощности фрезерования от угла поворота фрезы при различных значениях глубины врезания e и твердости обрабатываемого бандажа.



а б

Рисунок 7 – Влияние глубины врезания e и твердости обрабатываемого НВ бандажа на мощность фрезерования

Рассчитываемые значения температуры позволяют судить о рациональности назначаемых режимов и оценивать износостойкость инструмента. Конструкция инструмента определяет различную толщину срезаемого слоя на твердосплавных пластинах одного ножа, а значит, и различные значения температуры передней и задней поверхностей. Для оценки влияния на температуру параметров процесса фрезерования, характеристик обрабатываемого материала и геометрии инструмента целесообразно рассматривать максимальную температуру, достигаемую при наибольшей толщине срезаемого слоя, т. е. при угле контакта $\Theta_i = \Theta^м_i$. На рисунке 8 представлены графики распределения температуры по передней и задней поверхностям режущих твердосплавных пластин, значения температуры показаны для угла поворота фрезы 12°, что практически соответствует при данной глубине врезания $e = 2$ максимальному углу контакта на первой пластине. Так как для последующих пластин величина фактического угла контакта уменьшается, то уменьшаются средняя и максимальная температура, длина контакта стружки с пластинами. Последние три пластины при указанной глубине врезания и повороте фрезы на 12° вообще не участвуют в процессе резания.

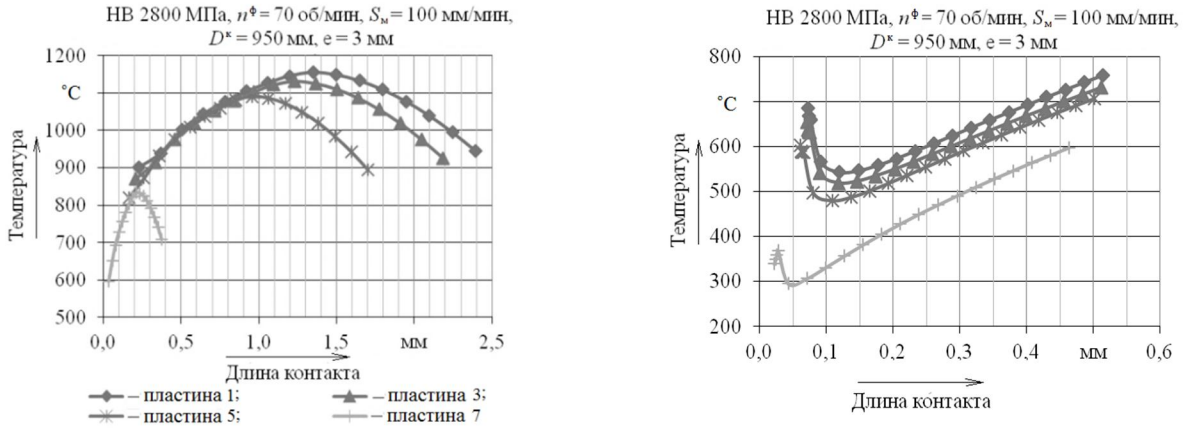


Рисунок 8 – Распределение температуры по передней (а) и задней (б) поверхностям режущих твердосплавных пластин (показаны значения для нечетных пластин)

Сопоставление экспериментальных данных с результатами, полученными на основе разработанной модели.

Работы по исследованию влияния параметров режима резания на крутящий момент и мощность фрезерования проводились в РГУПСе, результаты представлены в работах [6, 7]. Крутящий момент определялся с помощью приспособления с индуктивными датчиками, оттарированными по динамометру. Для определения общей мощности, расходуемой на резание и вращение шпинделя при фрезеровании, в цепь электродвигателя фрезерного станка включался самопишущий ваттметр. Эффективная мощность вычислялась двумя методами: путем исключения из общей мощности холостого хода, зафиксированной осциллографом и самопишущим ваттметром, и по крутящему моменту. Полученные значения мощности сравнивались, по результатам опытов было определено, что среднее отклонение эффективной мощности составляло 3 %.

По результатам опытов в логарифмических координатах строились зависимости эффективной мощности от глубины резания (рисунок 9), подачи на зуб фрезы (рисунок 10) и скорости резания (рисунок 11). На рисунках 9 – 11 также приводятся данные, полученные аналитическим путем на основе разработанной модели, однако сопоставление этих данных затруднено тем, что в работах [6, 7] отсутствуют численные данные и судить о результатах опытов можно только по графикам. Кроме того, следует отметить, что существуют некоторые расхождения в обозначениях, а именно глубина резания t и подача на зуб S_z, рассчитываемая как подача на оборот, деленная на количество ножей, в работах [6, 7] в рисунках и далее в степенных зависимостях не были заменены на принятые в настоящей статье обозначения, соответственно: глубина врезания e и подача на зуб S_z, рассчитываемая как подача на оборот, деленная на единственный условный зуб фрезы.

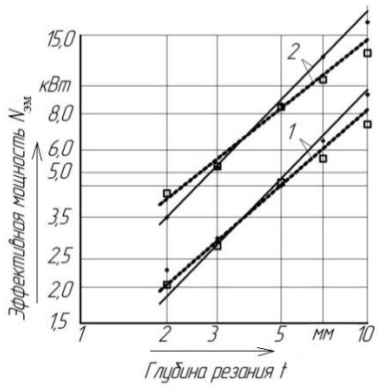


Рисунок 9 – Зависимости эффективной мощности от глубины резания; ——— – данные в работах [6, 7]; – – – – данные, полученные теоретически: 1) при S_Z = = 0,1 мм/зуб, V = 56 м/мин; 2) при S_Z = 0,1 мм/зуб, V = 110 м/мин

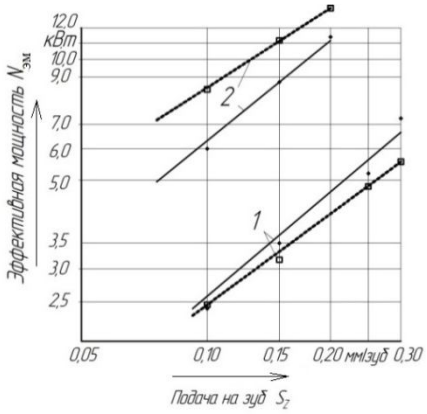


Рисунок 10 – Зависимости эффективной мощности от подачи на зуб; ——— – данные в работах [6, 7]; – – – – данные, полученные теоретически: 1) при t = 2 мм, V = 56 м/мин; 2) при t = 5 мм, V = 110 м/мин

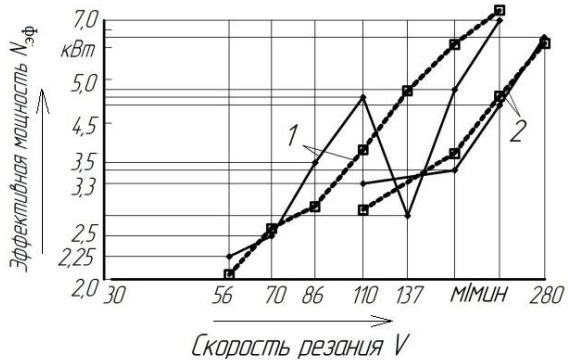


Рисунок 11 – Зависимости эффективной мощности от скорости резания; –◆——◆– – данные из работ [6, 7]; –■–■–■– – данные, полученные теоретически: 1 – при t = 2 мм, S_Z = 0,1 мм/зуб; 2 – при t = 2 мм, S_Z = 0,05 мм/зуб

Относительно значительного перелома на ломаной 1 (см. рисунок 11), находящегося в пределах от 140 до 176 м/мин, авторами делалось предположение, что его причиной является так называемый скоростной эффект-явление, когда температура стружки становится оптимальной и уменьшаются прочность, усадка и коэффициент трения. При росте скорости резания значительно быстрее, чем при увеличении глубины резания и подачи, возрастает количество тепла, уносимое стружкой, а следовательно, и ее температура. С увеличением глубины резания и подачи оптимальная температура стружки достигается при меньшей скорости резания. Кроме снижения эффективной мощности фрезерования в работах [6, 7] делалось предположение о том, что в диапазоне скоростного эффекта повышается и износостойкость пластин, из чего следовала, по мнению авторов, необходимость работы с оптимальными скоростями. Однако оптимальная скорость определялась только для единственного сочетания параметров: подача – 0,1 мм/зуб, глубина – 2 мм, твердость бандажа НВ – 2600 МПа, для всех других сочетаний математической обработкой экспериментальных данных устанавливалась степень влияния параметров режима резания на эффективную мощность. Было определено, что скорость резания влияет на эффективную мощность прямо пропорционально, для глубины врезания и подачи на зуб получены частные зависимости эффективной мощности:

$$N_{эф} = C_t \cdot t^{1,0}; \tag{15}$$

$$N_{эф} = C_S \cdot S_Z^{0,85}. \tag{16}$$

На основе частных зависимостей была получена степенная функция для определения эффективной мощности при фрезеровании бандажей от трех основных параметров режима резания:

$$N_{эф} = 0,113t \cdot S_Z^{0,85} v. \tag{17}$$

где C_t и C_S – коэффициенты для конкретных условий обработки.

В работах [6, 7] представлена только часть данных о проведенных опытах и отсутствует информация о методе, выбранном для постановки эксперимента, количестве наблюдений, дисперсии воспроизводимости в опытах, поэтому наилучшим способом оценки соответствия опытных данных и данных, полученных аналитическим путем, является сопоставление результатов и определение их расхождения в процентах. В таблице приведено сопоставление экспериментально полученной эффективной мощности с данными, рассчитанными по степенной зависимости (17) и с помощью математической модели, описанной в настоящей статье (принимается максимальное значение мощности).

Для оценки соответствия экспериментальных данных и прогнозируемых с помощью степенной функции и модели на основе термомеханического подхода использовался критерий согласия Пирсона, обычно применяемый для проверки справедливости гипотезы о законе распределения случайной величины.

Сопоставление экспериментальных и теоретических данных

Номер наблюдения	Глубина t, мм	Подача S_z,	Скорость V, м/мин	Ne, кВт, экспер.	Аппроксимировано степенной функцией		Получено аналитически	
					Ne, кВт	относит.,%	Ne, кВт	относит.,%
1	2	0,1	56	2,3	1,79	22	2,04	11
2	3	0,1	56	3	2,68	11	2,76	8
3	5	0,1	56	4,1	4,47	9	4,26	4
4	7	0,1	56	6,4	6,26	2	5,75	10
5	10	0,1	56	9	8,94	1	7,62	15
6	2	0,1	110	3,5	3,51	0	3,91	12
7	3	0,1	110	5,2	5,27	1	5,41	4
8	5	0,1	110	8,5	8,78	3	8,51	0
9	7	0,1	110	12	12,29	2	10,29	14
10	10	0,1	110	17	17,56	3	14,1	17
11	2	0,1	56	2,3	1,79	22	2,54	10
12	2	0,15	56	3,5	2,52	28	3,32	5
13	2	0,25	56	5,2	3,90	25	4,63	11
14	2	0,3	56	7,2	4,55	37	5,34	26
15	5	0,1	110	6	8,78	46	8,51	42
16	5	0,15	110	8,8	12,39	41	11,12	26
17	5	0,2	110	11,2	15,82	41	13,86	24
18	2	0,1	56	2,3	1,79	22	2,04	11
19	2	0,1	70	2,5	2,23	11	2,51	0
20	2	0,1	86	3,5	2,75	22	3,09	12
21	2	0,1	110	4,7	3,51	25	3,91	17
22	2	0,1	137	2,9	4,37	51	4,88	68
23	2	0,1	176	4,8	5,62	17	6,26	30
24	2	0,1	223	7	7,12	2	7,85	12
25	2	0,05	110	3,3	1,95	41	2,8	15
26	2	0,05	176	3,4	3,12	8	3,82	12
27	2	0,05	223	4,3	3,95	8	4,85	13
28	2	0,05	280	6,5	4,96	24	6,01	8
χ^2, рассчитанное для всех наблюдений:					8,91		5,52	
χ^2 без наблюдений 6, 8, 15,21 22:					7,12		3,78	

Критерий согласия рассчитывался по всем имеющимся экспериментальным данным и по данным, из которых исключались результаты, вызывающие сомнения, такие как опыты, когда при одинаковых условиях были получены различные эффективные мощности и результаты, полученные при скоростном эффекте. Как видно из данных таблицы 1, в обоих случаях значения критерия согласия, рассчитанного для модели на основе термомеханического подхода, меньше критерия, рассчитанного для степенной зависимости, а значит, можно признать, что данные аналитического расчета удовлетворительно согласуются с результатами эксперимента.

На основании изложенного можно сделать выводы.

1. Введение бандажей повышенной твердости (сталь 4, ГОСТ398-2010) требует совершенствования технологического процесса восстановления поверхности катания колесных пар.

2. Получены зависимости для аналитического определения сил и температуры, возникающих при восстановлении поверхности катания бандажей, методом фасонного фрезерования.

3. Для фасонного фрезерования на основе термомеханического подхода предложена методика расчета основных характеристик процесса восстановления поверхности катания бандажей. Расчетная модель учитывает геометрию твердосплавных пластин и обрабатываемого профиля, свойства обрабатываемого материала, параметры режима резания и позволяет рассчитывать температуру передней и задней поверхностей твердосплавных пластин, составляющие сил резания, крутящий момент, мощность фрезерования.

4. Данные об эффективной мощности, полученные аналитическим путем, сопоставлены с экспериментальными данными. Оценено соответствие эффективной мощности, определенной с помощью аналитической модели на основе термомеханического подхода, и степен-

ной зависимости, аппроксимирующей экспериментальные данные, на основе рассчитанных критериев согласия сделан вывод достаточной точности предложенной расчетной модели.

Список литературы

1. Брюнчуков, Г. И. Бандажи тягового подвижного состава повышенной эксплуатационной стойкости [Текст]: Дис… канд. техн. наук / Брюнчуков Г. И. – М., 2007. – 161 с.

2. Терехов, П. М. Определение сил резания, возникающих при восстановлении поверхности катания бандажей повышенной твердости [Текст] / П. М. Терехов, А. А. Воробьев, Р. А. Сахаров // Известия Петербургского гос. ун-та путей сообщения / Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – Санкт-Петербург. – 2013. – № 1 (34). – С. 158 – 165.

3. Костюков, Я. Х. Динамика фасонного фрезерования [Текст] / Я. Х. Костюков. – М.: Машгиз, 1950. – 143 с.

4. Васин, С. А. Резание материалов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании [Текст] / С. А. Васин, А. С. Верещака, В. С. Кушнер // Московский гос. техн. ун-т им. Н. Э. Баумана. – М., 2001. – 448 с.

5. Кушнер, В. С. Расчет сил и моделирование процессов фрезерования сталей торцовыми и цилиндрическими фрезами на основе термомеханического подхода [Текст] / В. С. Кушнер, О. Ю. Бургонова // Омский научный вестник. – Омск, 2008. – Вып. 4 (73). – С. 48 – 53.

6. Шпика, Н. К. Исследование режимов резания при фрезеровании профиля колес локомотивов [Текст] / Н. К. Шпика // Механическая обработка деталей подвижного состава: Труды РИИЖТа / Ростовский ин-т инж. ж.-д.трансп. – Ростов-на-Дону, 1972. – Вып. 81. – С. 30 – 35.

7. Шишкин, А. А. Исследование фрезерования бандажей по профилю [Текст] / А. А. Шишкин // Пути повышения производительности колесотокарных станков: Труды РИИЖТа / Ростовский ин-т инж. ж.-д.трансп. – Ростов-на-Дону, 1967. – Вып. 58. – С. 4 – 17.

УДК 62 – 836

Ф. В. Чегодаев, С. Н. Чижма, А. В. Спиридонов

МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ЧАСТОТНОГО ПРИВОДА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ВЗАИМНОЙ НАГРУЗКИ

Рассматривается кинематическая схема стенда для экспериментальных исследований частотного асинхронного привода. Приводятся описание кинематической схемы и математической модели при взаимной нагрузке, пример построения семейства механических характеристик на основе экспериментальных данных с учетом внутренних потерь в машине. Приведены динамическая модель асинхронного двигателя и результаты моделирования в приложении Simulink.

Асинхронный двигатель – наиболее простой, надежный и дешевый среди всех типов электрических машин, однако он является наиболее сложным объектом управления. Математическое описание физических процессов наиболее абстрактно, а основные величины, отражающие взаимодействие полей статора и ротора и определяющие его энергетические параметры, не поддаются непосредственному измерению и воздействию. Для полного понимания всех деталей, касающихся физического содержания процессов управления этим исключительно сложным объектом, необходимы глубокие знания теории электрических машин. Математические модели в виде как систем уравнений, так и структурных схем с перекрестными связями в силу своей сложности трудны для восприятия. На первых этапах изучения, особенно для задач управления, обычно достаточно знать объект на уровне черного ящика, т. е. его реакцию на известные внешние управляющие и возмущающие воздействия. Для асин-

хронного двигателя таковыми являются мгновенные значения угловых координат и вращающего момента выходного вала, напряжение, ток или частота на статорных обмотках в зависимости от способа управления. Знания этих величин вполне достаточно для характеристики любого исполнительного устройства как элемента системы управления. Эти величины легко доступны для непосредственного измерения при наличии соответствующей аппаратной базы. Поэтому целью проведенных авторами исследований была разработка основных принципов реализации учебного стенда для непосредственного измерения перечисленных параметров.

В качестве управляющего устройства был выбран частотный преобразователь – сейчас это для асинхронного привода технический стандарт и в обосновании не нуждается.

Внешний вид стенда приведен на рисунке 1, а его функциональная схема – на рисунке 2. Стенд содержит два асинхронных двигателя с короткозамкнутым ротором M_1 и M_2 мощностью около 0,5 кВт каждый. Валы двигателей соединены через цифровой датчик момента и скорости ДМ, выполняющий одновременно функцию гибкой муфты, он может быть выполнен на основе двух дисков с оптическими метками и двух фотоприемников. При вращении происходит механическое умножение частоты. Если число меток на оборот n выбрать достаточно большим, то можно измерять мгновенные значения как скорости, так и вращающего момента. Между дисками располагается упругая среда, при деформации которой под действием скручивающей силы изменится разность фаз между импульсами, по значению которой и вычисляется момент. Мгновенная скорость может быть вычислена по значению периода T импульсов как $1/nT$. Оба этих способа широко используются в современной измерительной технике.

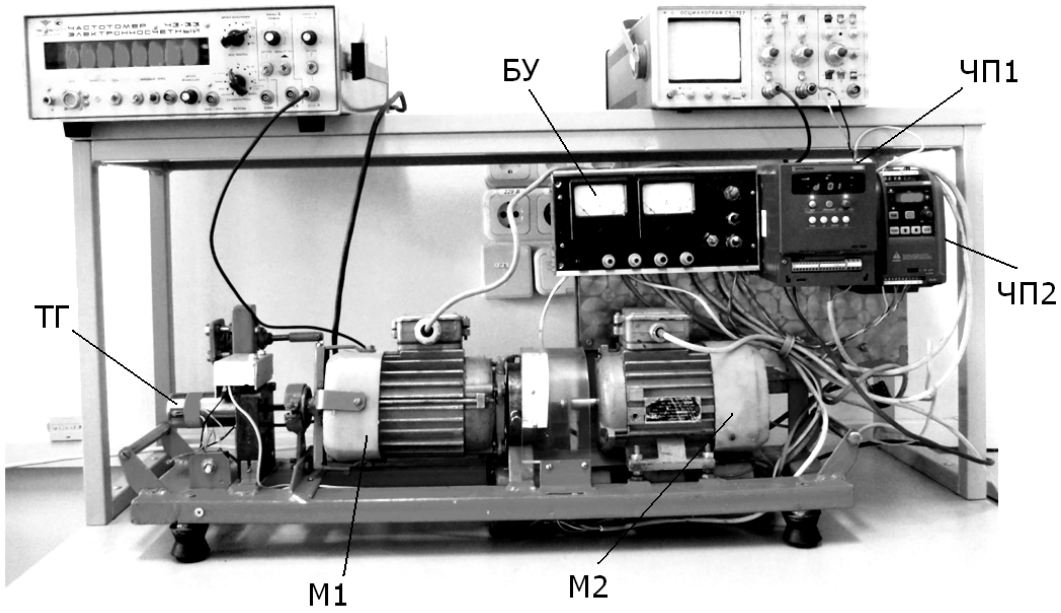


Рисунок 1 – Внешний вид стенда

Вычислительные операции осуществляет микропроцессорный блок управления БУ. Для наглядного отображения вращающего момента корпус двигателя M_1 может свободно вращаться на подшипниках. В нейтральном положении статор двигателя M_1 удерживается пружинным механизмом, расположенным на общем основании, и поворачивается под действием силы реакции. Это дает возможность непосредственно наблюдать явление неустойчивости механической характеристики при опрокидывании момента. Управление двигателями осуществляется частотными преобразователями $ЧП_1$ и $ЧП_2$ мощностью по 0,75 кВт. Для двигателя M_1 предусмотрен режим динамического торможения постоянным током $I_{упр.}$ Преобразователи обычно снабжены функцией управления внешним постоянным напряжением. Для

возможности построения замкнутой системы по скорости имеется тахогенератор постоянного тока ТГ, вал которого непосредственно соединен с валами двигателей. В стенде использованы преобразователи типа N100 фирмы HYUNDAI, снабженные портами под интерфейс RS-485. Вопросы, связанные с разработкой программного обеспечения и мониторингом физических процессов в машинах, выходят за рамки данной статьи и здесь не рассматриваются.

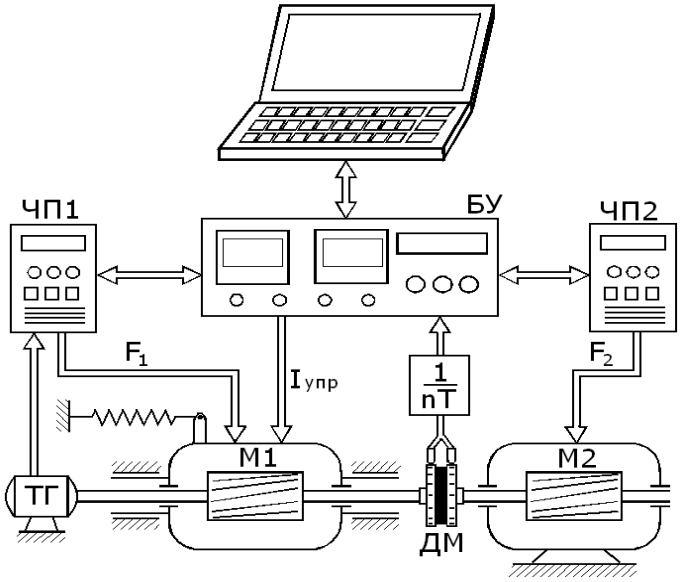


Рисунок 2 – Функциональная схема стенда

Асинхронная машина по своей природе является нелинейным объектом со сложными внутренними взаимосвязями, поэтому на практике обычно рассматриваются модели, отображающие конкретные условия работы машины при тех или иных способах управления. Особой сложностью отличаются уравнения, описывающие динамические режимы при пуске и больших диапазонах изменения нагрузки. Построение математической модели в виде передаточной функции возможно только после линеаризации уравнений для ограниченного круга задач, когда машина работает на устойчивом участке механической характеристики. К таковым относятся, например, системы стабилизации скорости, а также большинство систем позиционирования, например, в робототехнике и обрабатывающих станках. Линеаризованная модель для двух двигателей с жесткой механической связью между роторами приведена на рисунке 3.

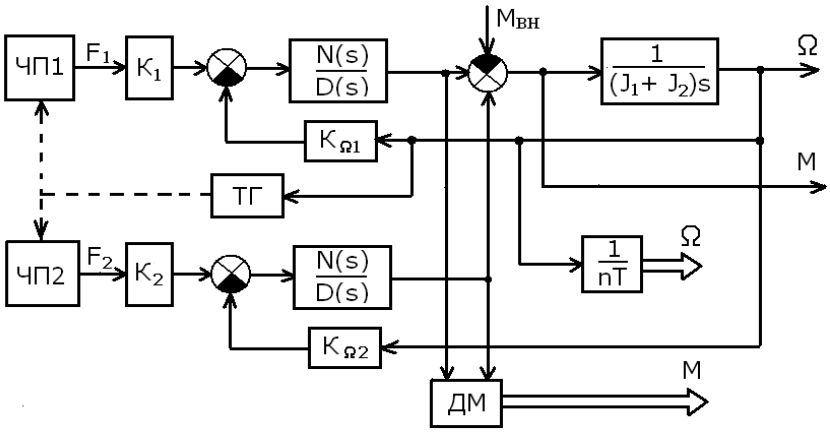


Рисунок 3 – Общая структурная схема стенда при взаимной нагрузке

Моменты инерции роторов суммируются, а скорости одинаковы, поэтому механическая часть представлена одним идеальным интегрирующим звеном с соответствующим коэффициентом $1/(J_1+J_2)$. Остальные блоки структурной схемы отображают электромагнитные про-

цессы в машине. Коэффициенты $K_{\Omega 1}$ и $K_{\Omega 2}$ являются константами машины и отображают явления, связанные с формированием ЭДС вращения. Значения и размерности коэффициентов K_1 и K_2 зависят от того, что понимается под сигналом управления. Это может быть напряжение, ток или частота статорных обмоток, аналоговый сигнал на входе частотного преобразователя или иная величина. В общем случае это может быть некоторая сложная функция F_{12} этих параметров, например, при векторном управлении. Полиномы *N(s)/D(s)* отображают статическую и динамическую жесткость характеристик машины. Статическая жесткость определяет наклон механической характеристики, а динамическая зависит от электромагнитных постоянных времени статора и ротора, которые приводят к осцилляции скорости и момента в переходных режимах. Момент $M_{вн}$ определяется внешней полезной нагрузкой. Внутренние механические потери в машине определяются моментами сухого $M_{ст}$ и вязкого $M_{вт}$ трения, учет которых обязательно необходим в приводах автоматических систем, так как на холостом ходу будет иметь место ошибка по скорости. На рисунке 4 приведена структурная схема одной машины с учетом моментов сухого $M_{ст}$ и вязкого $M_{вт}$ трения. На холостом ходу при отключенном $ЧП_1$ и нулевом токе управления вязкое трение обусловлено внутренними потерями в подшипниках и аэродинамическим сопротивлением в воздушном зазоре машины, а также в вентиляторе. Дополнительно коэффициент вязкого трения можно задавать в режиме динамического торможения током управления $I_{упр}$. Внутренний момент сухого трения $M_{ст}$ обусловлен трением в подшипниках. В первом приближении передаточная функция динамической жесткости представлена в виде инерционного звена первого порядка с переходной постоянной времени $T_э$, зависящей как от параметров машины, так и от способа управления [1]. Если под входным сигналом управления понимается только частота, то при одной паре полюсов коэффициенты $K_{1,2}$ и $K_{\Omega 1,2}$ равны единице.

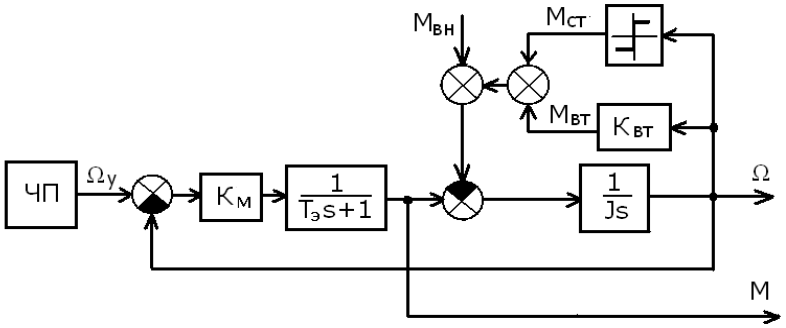
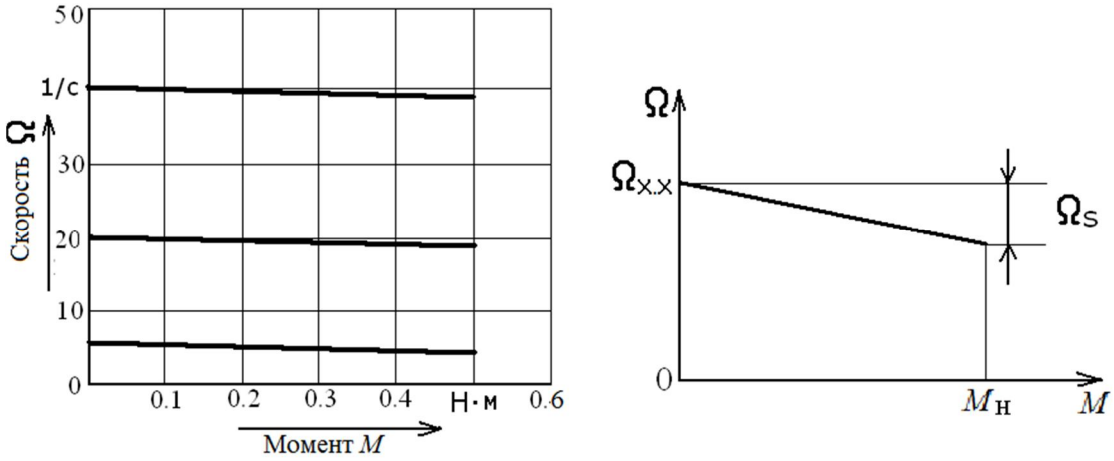


Рисунок 4 – Структурная схема машины при наличии внутренних потерь

Численные значения коэффициента вязкого трения $K_{вт}$ и коэффициента момента $K_м$, определяющего статическую жесткость механической характеристики, могут быть рассчитаны на основе экспериментальных данных. На рисунке 5, а приведено семейство статических механических характеристик для двигателя 4ААМ63В2У3 мощностью 0,55 кВт. Измерения проводились при условии *U/f* = const, которое используется в большинстве преобразователей широкого применения. В этом случае семейство статических механических характеристик соответствует управлению от источника тока, а динамических – от источника напряжения. Скорость скольжения Ω_s (рисунок 6, б) определялась как разность показаний частотомера, подключенного к выходу оптического преобразователя скорости и показаний частотного преобразователя, задающего синхронную скорость, т. е. скорость холостого хода $\Omega_{х.х}$.

Результаты показали, что абсолютное значение скорости скольжения Ω_s (см. рисунок 6, б) меняется от 0,82 Гц при частоте управления $\Omega_у$= 3 Гц до 0,74 Гц при $\Omega_у$= 50 Гц (при моменте нагрузки 0,5 Н·м), т. е. жесткость меняется незначительно и в среднем имеет значение 0,8 Гц. Это дает основание считать коэффициент момента $K_м$ константой при данных условиях, хотя в общем случае это сложная функция, отображаемая структурными схемами с нелинейными звеньями и перекрестными связями [1, 2].



а б

Рисунок 5 – Семейство механических характеристик

Передаточная функция по скорости без учета сухого трения $M_{ст}$ в соответствии со структурной схемой, приведенной на рисунке 4, имеет вид:

$$W(s)=\frac{\frac{K_м}{K_{вт}}}{T_э\frac{J}{K_{вт}}s^2+(T_э+\frac{J}{K_{вт}})s+1+\frac{K_м}{K_{вт}}}, \quad (1)$$

где s – комплексная переменная в преобразовании Лапласа.

В статическом режиме при s = 0 и отсутствии вязкого трения при $K_{вт}$ = 0 значение передаточной функции равно единице. При вязком трении это значение меньше единицы из-за скольжения. Коэффициент вязкого трения рассчитывается по выражению: $K_{вт} = M_{вт}/\Omega$. При частоте 50 Гц момент составляет 0,1 Н·м, откуда получено $M_{вт}$ = 0,002 Н·м·с. Для наглядности отображения момента непосредственно на корпусе статора укреплен стрелочный индикатор.

Коэффициент момента можно найти по передаточной функции по моменту, которая имеет вид:

$$W(s)=\frac{T_э s+1}{T_э J s^2+(T_э K_{вт}+J)s+1+K_{вт}+K_м}. \quad (2)$$

Если пренебречь моментом вязкого трения на холостом ходу, то в установившемся режиме при s = 0 коэффициент момента найдется как отношение момента нагрузки к скорости скольжения (см. рисунок 5, б): $K_м$ = 0,5/0,8 = 0,625 1/Н·м·с.

На рисунке 6 приведена модель в приложении Simulink, соответствующая схеме, представленной на рисунке 4, а на рисунке 7 – результаты моделирования при прямом включении машины на частоте 5 Гц при внешнем моменте нагрузки 0,6 Н·м.

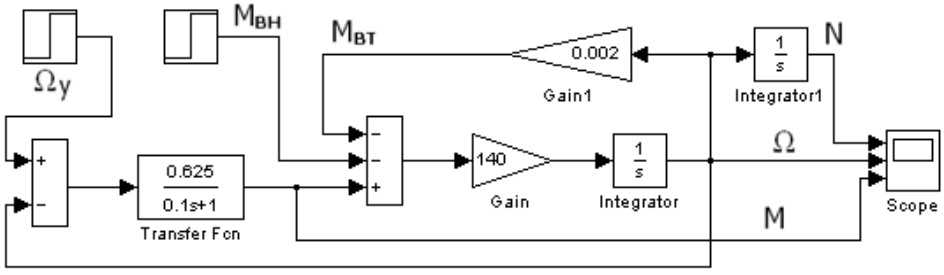


Рисунок 6 – Математическая модель двигателя в приложении Simulink

На диаграммах приведены текущие значения электромагнитного момента, скорости и угла поворота ротора машины. Электромагнитная постоянная $T_э$ обусловлена в основном активным сопротивлением короткозамкнутой цепи ротора и у мощных машин данного типа может достигать секунды и более. Для машин малой мощности, а также при управлении от источника напряжения ее значение меньше. Значение 0,1с выбрано ориентировочно, так как непосредственному измерению не поддается. Уточнение параметров математической модели является предметом дальнейших исследований.

В настоящее время макет стенда используется в качестве наглядного пособия при чтении лекций и лабораторного стенда для проведения экспериментальных исследований частотного привода. Кроме того, он используется как объект управления в теоретических исследованиях замкнутых систем автоматического управления при выполнении НИРС и дипломного проектирования. Предварительные результаты использования макета в учебном процессе показали, что он может быть полезным и эффективным средством в развитии интерактивных форм обучения.

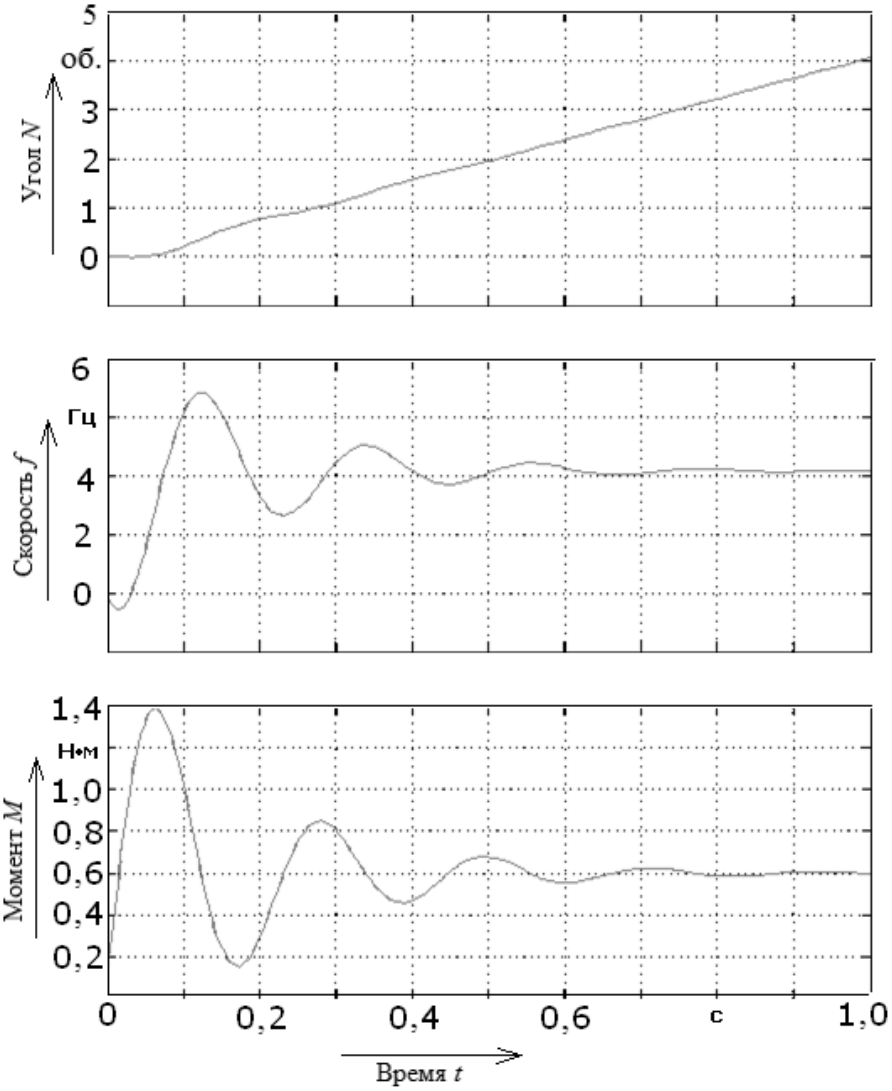


Рисунок 7 – Диаграммы момента (а), скорости (б) и угла (в) при прямом включении

Список литературы

1. Усольцев, А. А. Частотное управление асинхронными двигателями: Учебное пособие [Текст] / А. А. Усольцев // Санкт-Петербургский гос. ун-т информационных технологий, механики и оптики. – СПб, 2006. – 94 с.

2. Герман-Галкин, С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab 6.0: Учебное пособие [Текст] / С. Г. Герман-Галкин. – СПб: Корона-Принт, 2001. – 320 с.

УДК 629.488

В. А. Четвергов, А. И. Мишин, П. А. Сиряк

НАРАБОТКА ЛОКОМОТИВОВ В ЕДИНОМ ВРЕМЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

На основе исследования статистической информации банка данных, сформированного с использованием аппаратно-программного комплекса «Борт», предложена методика для отображения времени измерения параметров дизель-генераторной установки маневровых тепловозов ТЭМ2 в едином временном пространстве.

Современное состояние средств измерений, обработки, хранения и передачи информации формируют объективные условия для широкого внедрения диагностических систем на железнодорожном транспорте. Качество получаемой информации обеспечивает возможность получения достоверного диагноза технического состояния подвижных единиц железнодорожной техники, что позволит, с одной стороны, осуществлять внедрение элементов системы технического обслуживания и ремонта по результатам мониторинга технического состояния, а с другой стороны, сформировать систему сервисного обслуживания, которая реализует управленческие и информационные технологии, ориентированные на обеспечение высокого уровня готовности подвижного состава. Для решения этих задач необходима разработка алгоритмов, методик и программных продуктов, с помощью которых будет оперативно обрабатываться статистическая диагностическая информация.

Целями данной работы являются исследование статистической информации банка данных, сформированного с использованием аппаратно-программного комплекса «Борт» (АПК «Борт») [1], разработка методики и программного обеспечения для отображения времени измерения параметров дизель-генераторной установки маневровых тепловозов ТЭМ2 в едином временном пространстве.

В соответствии с ГОСТ 20911-89 [2] техническое состояние – состояние, которое характеризуется в определенный момент времени, при определенных условиях внешней среды, значениями параметров, установленных технической документацией на объект. Но если рассматривать стадию научных исследований, то одной из основных целей таких исследований является разработка методик, определение номенклатуры и значений параметров, характеризующих техническое состояние объектов контроля, когда самой технической документации может еще не существовать. Поэтому под техническим состоянием (далее – ТС) в рамках данной статьи будем понимать состояние, которое характеризуется значениями параметров технического объекта в определенный момент времени, при определенных условиях внешней среды.

В общем случае ТС объекта описывается совокупностью значений параметров, образующих множество $Д$. Номенклатура параметров может быть различной и определяться решаемыми задачами или возможностью оборудования, с помощью которого вычисляются текущие значения [3]. Авторы были допущены к банку данных, сформированному в процессе архивирования результатов измерений, зарегистрированных с помощью АПК «Борт». Этим комплексом оснащаются магистральные и маневровые тепловозы. В данной работе рассматриваются только маневровые тепловозы серии ТЭМ2, у которых сбор данных ведется по 15 параметрам дизель-генераторной установки.

С целью обработки статистических данных, полученных с использованием АПК «Борт», в первую очередь необходимо сформировать методику отбора и нормализации множества

значений времени записи измеряемых параметров. Данная методика строилась на архивах данных, регистрируемых АПК «Борт» и ориентирована на применение в области диагностирования тягового подвижного состава по результатам анализа информации, получаемой от бортовых систем. Важность подобных методик отражена в работе [4].

В процессе эксплуатации значения параметров ТС локомотива и дизель-генераторной установки в частности постоянно изменяются. С целью поддержания исправного ТС осуществляются плановые мероприятия по техническому обслуживанию и ремонту локомотивов (далее – ТОиР). В ходе технического обслуживания наряду с другими задачами обеспечивается поддержание работоспособного ТС, а при плановых ремонтах оно восстанавливается до заданного уровня. При капитальном ремонте восстанавливается исправность и полный, или близкий к полному, ресурс изделия [5]. Все перечисленные воздействия характеризует то, что они проводятся циклически с одинаковой периодичностью, установленной для каждого номерного вида ТОиР.

В ОАО «РЖД» в соответствии с распоряжением о системе технического обслуживания и ремонта локомотивов ОАО «РЖД» № 3Р установлена единая планово-предупредительная система технического обслуживания и ремонта тягового подвижного состава. Данным распоряжением регламентируется, что межремонтные сроки лишь в незначительной степени могут корректироваться решением начальника дороги. Для маневровых локомотивов ТЭМ2 они составляют три года между капитальным (далее – КР), первым текущим ремонтом № 3 (далее – 1ТР3), средним ремонтом (далее – СР), вторым текущим ремонтом № 3 (далее – 2ТР3) и очередным КР. Графически это можно отразить в виде временного отрезка [0,12], содержащего множество значений времени в диапазоне от 0 до 12 лет (рисунок 1) [6] и описываемого формулой:

$$T = \left\{ t \middle| 0 \le t \le 12 \right\}, \tag{1}$$

где T – множество значений времени;

t – значения времени, представленные в размерности, необходимой для решения конкретной задачи.

Это соответствует интервалу времени от одного капитального ремонта до очередного. Множество T состоит из подмножеств $T_1, ..., T_4$, отображающих совокупность значений времени между названными плановыми ремонтами, т. е. $T_i \subset T$. T_i в свою очередь является множеством значений t_i и описывается формулой:

$$T_i = \left\{ t_i \middle| \begin{array}{l} 3 \cdot (i-1) \le t_i \le 3 \cdot i; \\ i = 1,\ 2,\ 3,\ 4, \end{array} \right. \tag{2}$$

где t_i – значения времени на i-м интервале;

i – номер межремонтного интервала (1 – от КР до 1ТР3; 2 – от 1ТР3 до СР; 3 – от СР до 2ТР3; 4 – от 2ТР3 до КР).

Для множеств T, T_i выполняется условие:

$$T = T_1 \cup T_2 \cup T_3 \cup T_4 . \tag{3}$$

АПК «Борт» устанавливались на локомотивы ТЭМ2 с различным пробегом после очередного ремонта. Виды последних ремонтов при этом также были различными. В результате отсутствуют данные, соответствующие непрерывной работе каждого локомотива от капитального до следующего капитального ремонта. Следовательно, почти невозможно исследовать изменение параметров, используемых в качестве диагностических признаков, в течение времени от восстановления полного, или близкого к полному, ресурса до следующей такой процедуры.

Изменение технического состояния происходит циклически, что можно проследить по

графику изменения интенсивности отказов λ за время службы t локомотива (рисунок 2, а). В работах [7 – 9] показано, что наиболее характерно появление отказов после разборки агрегата с целью его ревизии или ремонта, а также при замене отказавших деталей или узлов другими, имеющими разный срок службы. Так как даты проведения восстановительных воздействий для множества локомотивов являются различными, то их графики зависимости λ от t 0, 1, 2 и 3 накладываются друг на друга (рисунок 2, б). В то же время характер изменения этой зависимости у разных локомотивов при соблюдении технологии ремонта является схожим, а имеющийся объем выборки из базы данных значителен, поэтому техническое состояние множества локомотивов после одноименных плановых ремонтов можно считать одинаковым. Следовательно, для определения точки отсчета начала изменения ТС можно использовать не только время проведения последнего капитального ремонта, но и время проведения последних плановых ремонтов через интервалы в три года. Следовательно, такими точками отсчета будут являться КР, 1ТР3, СР, 2ТР3 или очередной КР в зависимости от пробега тепловозов ТЭМ2.

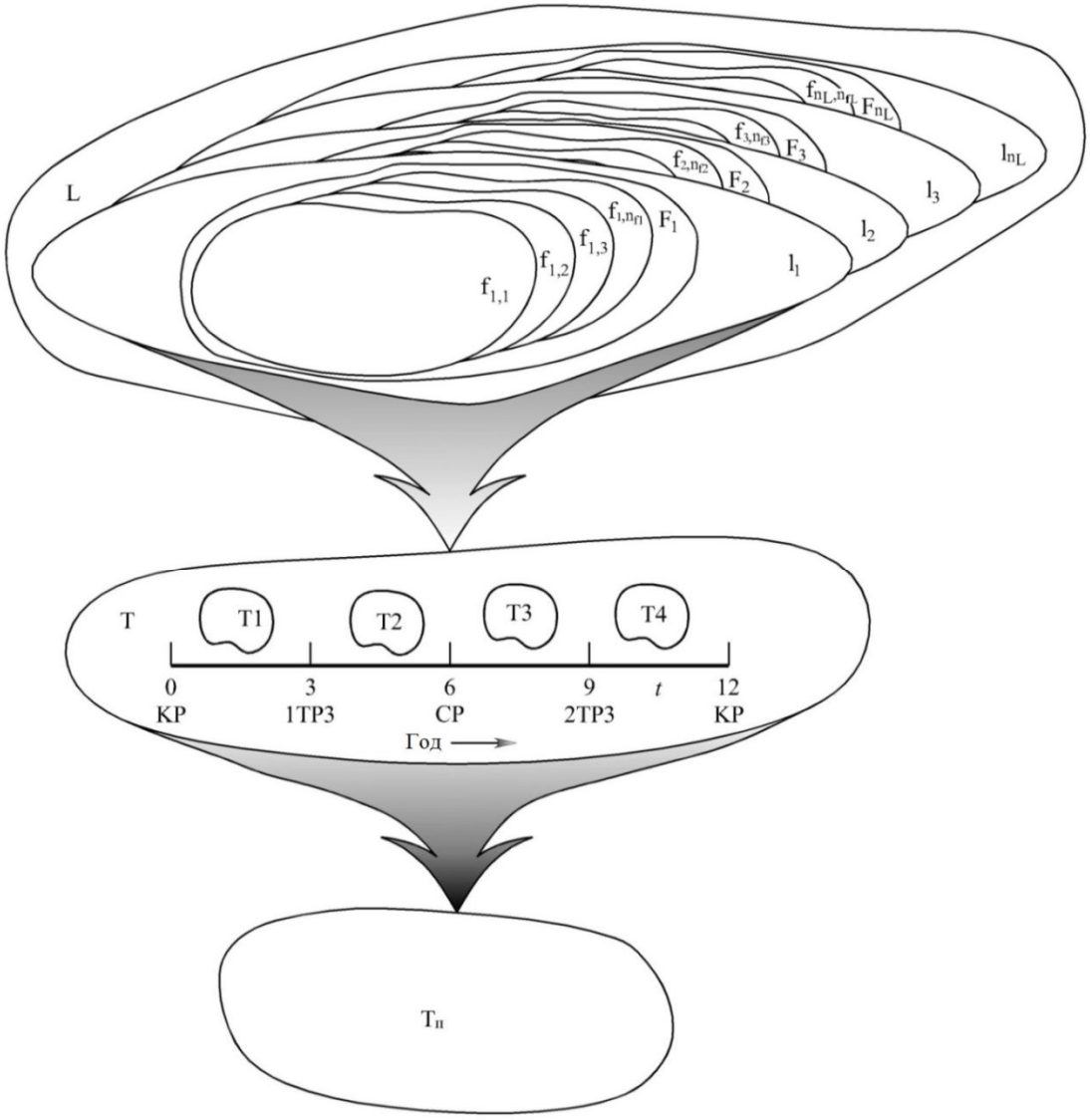
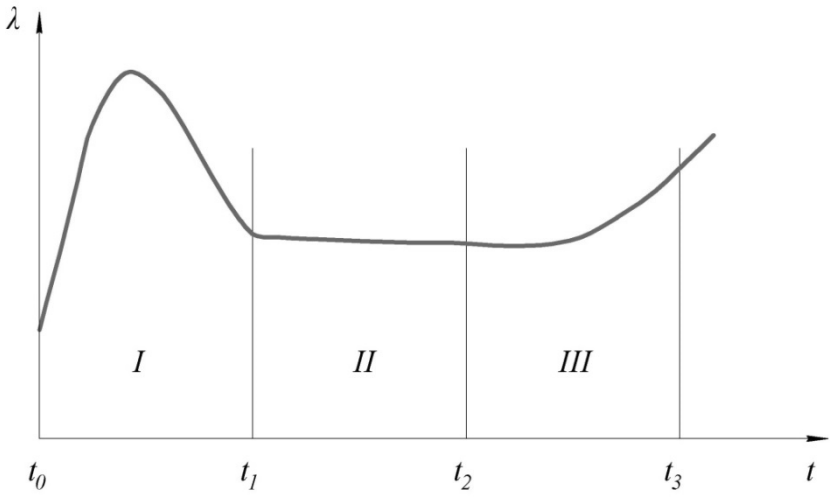


Рисунок 1 – Отображение исходной информации на единый временной отрезок

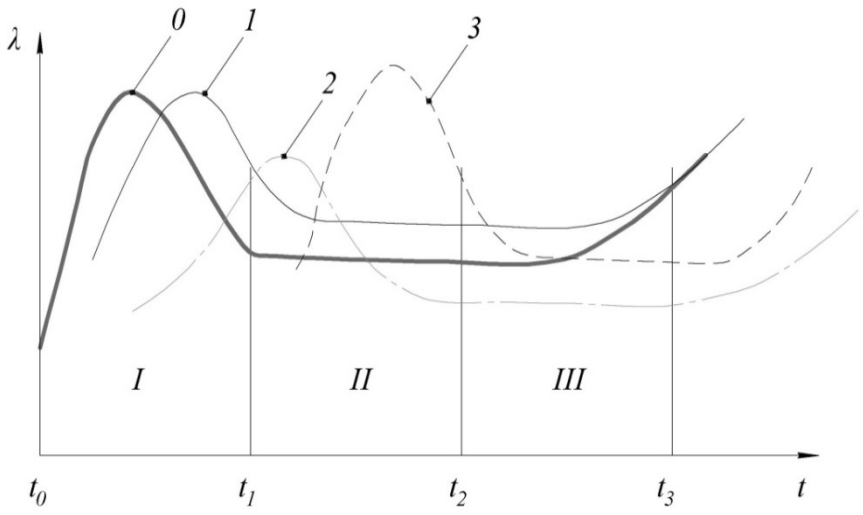
Для решения поставленных задач определим все исследуемые тепловозы как множество L. Файлы, сформированные АПК «Борт» для каждого локомотива за период с 2001 по 2012 г., размещаются в банке данных. В АПК «Борт» запись относительно медленно изменяющихся

параметров производится один раз в минуту, а относительно быстро изменяющихся – один раз в три секунды. Комплекс программного обеспечения позволяет упорядочить эту информацию и записать в виде отдельных файлов по каждому локомотиву для одних суток работы (далее – суточный файл). Суточные файлы в таком виде имеют постоянную длину, отображающую процесс непрерывной записи информации, задержки и пропуски записи в течение этих суток. Они являются исходной информацией и представлены в виде множества F. Однако остается нерешенной задача определения межремонтного периода, к которому относится та или иная запись. Для этого необходимо отобразить время соответствующих меток в банке данных в двенадцатилетнем масштабе в соответствии с рисунком 1.

В структуре файла наряду с диагностическими параметрами в каждой минутной и трехсекундной записи в составе служебной информации отображается время измерения и записи блока данных. В течение суток запись в файле не является непрерывной. Прерывание происходит стохастически и связано с выключением АПК «Борт», извлечением карты памяти, неисправностью комплекса, проведением ремонтных мероприятий и пр. Для возможности отображения информации в двенадцатилетнем масштабе записи в суточных файлах должны отображаться непрерывными и описываться временем начала $t_н$ и конца $t_к$ соответствующих участков.



а



б

Рисунок 2 – Изменение технического состояния технического объекта: а – зависимость интенсивности отказов λ от срока службы t локомотива; б – наложение зависимостей λ от t замененных или восстановленных деталей и узлов на срок службы локомотива

Таким образом, имеется множество тепловозов

$$L = l_j \left| \begin{array}{l} l \in L; \\ j = 1,\ 2,\ 3,\ ...,\ n_L, \end{array} \right. \quad (4)$$

где n_L – количество локомотивов, по которым сформированы файлы в банке данных;

l_j – номера локомотивов в банке данных.

Для множества тепловозов создано множество файлов F_j, сформированных по каждому номеру локомотива и по отдельным суткам работы,

$$F_j = f_{j,k} \left| \begin{array}{l} f_{j,k} \in F_j; \\ k = 1,\ 2,\ 3,\ ...,\ n_{fL}, \end{array} \right. \quad (5)$$

где $f_{j,k}$ – суточный файл локомотива l_j;

k – номер суточного файла локомотива l_j;

n_{fL} – количество суточных файлов по l_j локомотиву.

В файле $f_{j,k}$ минутные записи содержат метки времени измерения в формате UNIX. Первая такая метка с начала файла или после окончания прерывания записи является временем начала непрерывной записи $t_н$. Отметка времени в последней минутной записи перед прерыванием или концом суточного файла – время конца непрерывной записи $t_к$. Результаты промежуточных измерений записываются через три секунды. Эти записи не содержат меток времени. Таким образом, файл $f_{j,k}$ является множеством $S_и$, включающим в себя несколько подмножеств,

$$S_и = S_з,\ S_{мр},\ S_{ср,г} \left| \begin{array}{l} S_з \subset S_и; \\ S_{Mp} \subset S_и; \\ S_{ср,r} \subset S_и; \\ p = 1,\ 2,\ 3,\ ...,\ m_м; \\ r = 1,\ 2,\ 3,\ ...,\ 20, \end{array} \right. \quad (6)$$

где $S_з = \{s_{з1},\ s_{з2},\ s_{з3},\ ...,\ 16\}$ – множество байтов заголовков файла;

$S_{мр} = \{s_{M1},\ s_{M2},\ s_{M3},\ ...,\ s_{Mm_M}\}$ – множество минутных записей в файле;

$S_{ср,r} = \{s_{M1},\ s_{M2},\ s_{M3},\ ...,\ 20\}$ – множество трехсекундных записей в p-й минутной записи;

p – номер минутной записи в файле;

$m_м$ – общее количество минутных записей в файле;

r – номер трехсекундной записи.

Так как записи в одном файле имеют перерывы, то в общем случае

$$S_и \neq S_з \bigcup S_{мр} \bigcup S_{ср,г}. \quad (7)$$

Задача сводится к нахождению отображения $S_и$ на T:

$$t_н \overset{f(t_н)}{\rightarrow} t_{нп} \left(t_н \in S,\ t_{нп} \in T_п\right). \quad (8)$$

Для этого необходимо определить функцию $f(t_н)$, заданную (определенную) на множестве T, обеспечивающую соответствие, в силу которого любой элемент $t_п$ множества $T_п$ определяет соответствующий ему объект множества $S_и$. Элемент $t_п$ представляет собой сочетание номера локомотива, времени начала $t_{нп}$ и конца $t_{кп}$ соответствующих записей.

$$T_{\text{п}} = t_{\text{пs}} \begin{vmatrix} t_{\text{пs}} \in T_{\text{п}}; \\ t_{\text{пs}} = l_j,\ t_{\text{нпs}},\ t_{\text{кпs}}; \\ s = 1,\ 2,\ 3,\ \ldots,\ \text{n}_{\text{O}}, \end{vmatrix} \tag{9}$$

где n_o – общее количество непрерывных записей по всем локомотивам и файлам $f_{j,k}$.

Величины $t_{\text{нп}}$ и $t_{\text{кп}}$ представляют собой время начала и конца непрерывной записи в масштабе временного отрезка [0, 12]. Они вычисляются по формулам:

$$t_{\text{нп}} = \begin{cases} 3(i-1) + \dfrac{t_{\text{н}} - t_{\text{рп}}}{t_{\text{н max}} - t_{\text{рп}}} 3 \ \text{ при } t_{\text{н}} \geq t_{\text{рп}},\ t_{\text{н max}} > 3; \\ 3(i-1) + \dfrac{t_{\text{н}} - t_{\text{рп}}}{t_{\text{сг}}} \ \text{ при } t_{\text{н}} \geq t_{\text{рп}},\ t_{\text{н max}} \leq 3; \\ 3\left((i-1) + \dfrac{t_{\text{н}} - t_{m(i-1)}}{\left(t_{mi} - t_{m(i-1)}\right)} \right) \ \text{ при } \ \text{t}_{\text{m(i-1)}} \leq t_{\text{н}} \leq t_{mi}; \\ \dfrac{\left(\left(t_{\text{н}} - t_{\text{и}}\right) - \left\lfloor \dfrac{t_{\text{н}} - t_{\text{и}}}{t_{mpc}} \right\rfloor t_{mpc} \right)}{t_{mpc}} 12 \ \text{при } t_{\text{н}} < t_{m0}; \end{cases} \tag{10}$$

$$t_{\text{кп}} = \begin{cases} 3(i-1) + \dfrac{t_{\text{к}} - t_{\text{рп}}}{t_{\text{к max}} - t_{\text{рп}}} 3 \ \text{ при } t_{\text{к}} \geq t_{\text{рп}},\ t_{\text{к max}} > 3; \\ 3(i-1) + \dfrac{t_{\text{к}} - t_{\text{рп}}}{t_{\text{сг}}} \ \text{ при } t_{\text{к}} \geq t_{\text{рп}},\ t_{\text{к max}} \leq 3; \\ 3\left((i-1) + \dfrac{t_{\text{к}} - t_{m(i-1)}}{\left(t_{mi} - t_{m(i-1)}\right)} \right) \ \text{ при } \ \text{t}_{\text{m(i-1)}} \leq t_{\text{к}} \leq t_{mi}; \\ \dfrac{\left(\left(t_{\text{к}} - t_{u}\right) - \left\lfloor \dfrac{t_{\text{к}} - t_{u}}{t_{mpc}} \right\rfloor t_{mpc} \right)}{t_{mpc}} 12 \ \text{при } t_{\text{к}} < t_{m0}, \end{cases} \tag{11}$$

где $t_{\text{нп}}$, $t_{\text{кп}}$, – значения времени начала и конца непрерывной записи, приведенные к единому пространству времени на отрезке $[0,\ 12]$;

$t_{\text{рп}}$ – дата последнего ремонта;

$t_{\text{н max}}$, $t_{\text{к max}}$ – максимальные значения времени начала и конца непрерывной записи;

$t_{\text{сг}}$ – период времени в один год, приведенный к временному формату UNIX;

t_{m0}, t_{m1}, t_{m2}, t_{m3} – дата последнего капитального, первого текущего ремонта № 3, среднего и второго текущего ремонта № 3;

$t_{\text{и}}$ – дата изготовления;

$t_{mpc} = \dfrac{t_{m0} - t_{\text{и}}}{\left\lfloor \dfrac{t_{m0} - t_{\text{и}}}{12} \right\rfloor}$ – средний межремонтный период.

Алгоритм отображения $S_{\text{и}}$ на T заключается в том, что на первом этапе определяется, на каком межремонтном периоде находится в текущий момент исследуемый локомотив. Ис-

ходными данными в этом случае являются сведения о регистрации ремонтов технического паспорта локомотива и отметки времени в множестве файлов F_j. Каждый из файлов просматривается и определяются отметки времени начала $t_н$ и конца $t_к$ текущей непрерывной записи. По условию

$$i = \begin{cases} 1, \text{ если } t_н \in [t_{m0},\ t_{m1}),\ t_к \in [t_{m0},\ t_{m1}); \\ 2, \text{ если } t_н \in [t_{m1},\ t_{m2}),\ t_к \in [t_{m1},\ t_{m2}); \\ 3, \text{ если } t_н \in [t_{m2},\ t_{m3}),\ t_к \in [t_{m2},\ t_{m3}); \\ 4, \text{ если } t_н \in [t_{m3},\ t_{m0}),\ t_к \in [t_{m3},\ t_{m0}) \end{cases} \quad (12)$$

определяется межремонтный период i, к которому относится текущая запись.

Следующим шагом является вычисление приведенных значений времени $t_{нп}$ и $t_{кп}$ по формулам (10), (11). Полученные результаты сохраняются в файле и являются исходными данными для дальнейшей статистической обработки множества данных F. В частности, эти данные использованы для предварительной оценки распределения исходной статистической информации на отрезке [0, 12]. Задача состояла в том, чтобы оценить возможность использования имеющегося банка данных по результатам измерения АПК «Борт», т. е. организовать и определенным образом упорядочить совокупность записей по исследуемым локомотивам. На этом этапе работ предполагалось визуально оценить распределение исходной информации, для чего были разработаны программное обеспечение и методика, которые позволили получить изображения треков и графически отобразить непрерывные записи для каждого исследуемого локомотива (рисунок 3). Исследованы записи по 176 локомотивам. Общее количество суточных файлов превышает 110 000. На рисунке 3 ось абсцисс – время на отрезке [0, 12], по оси ординат расположены номера локомотивов l_j.

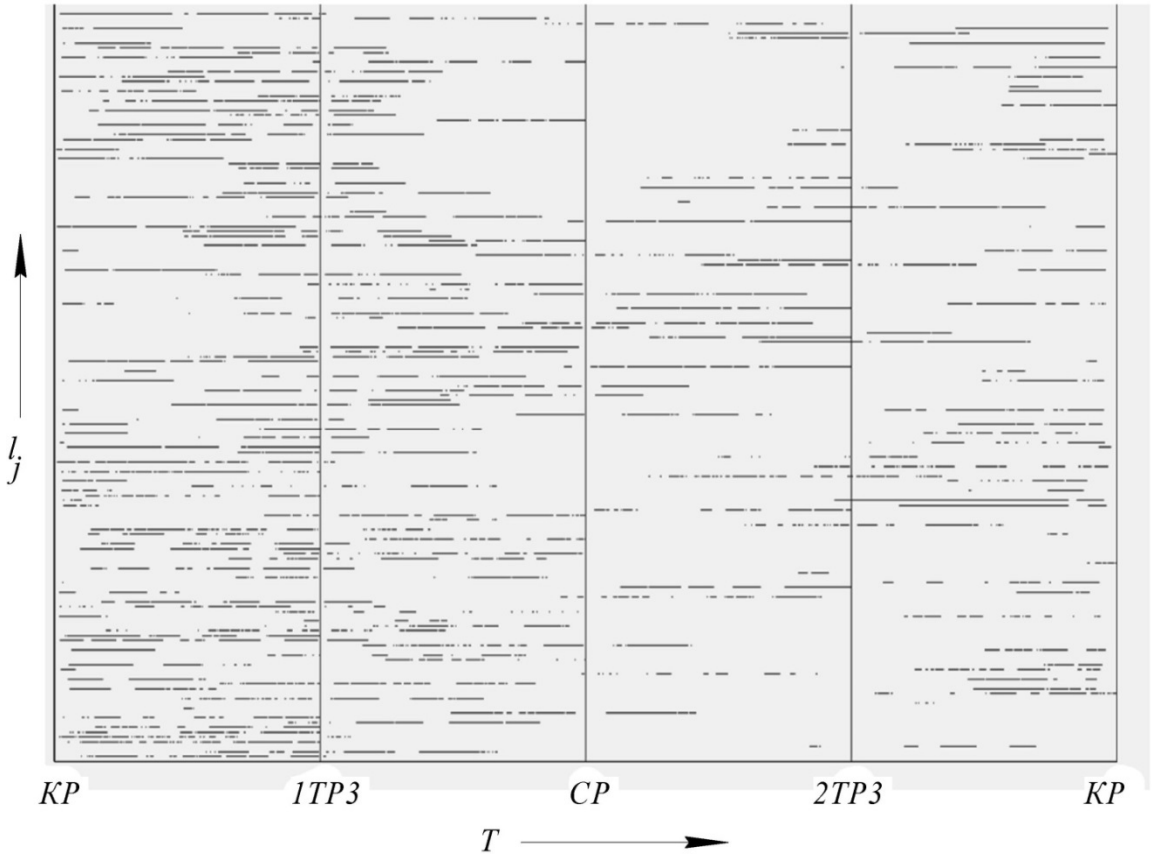


Рисунок 3 – Треки непрерывных записей

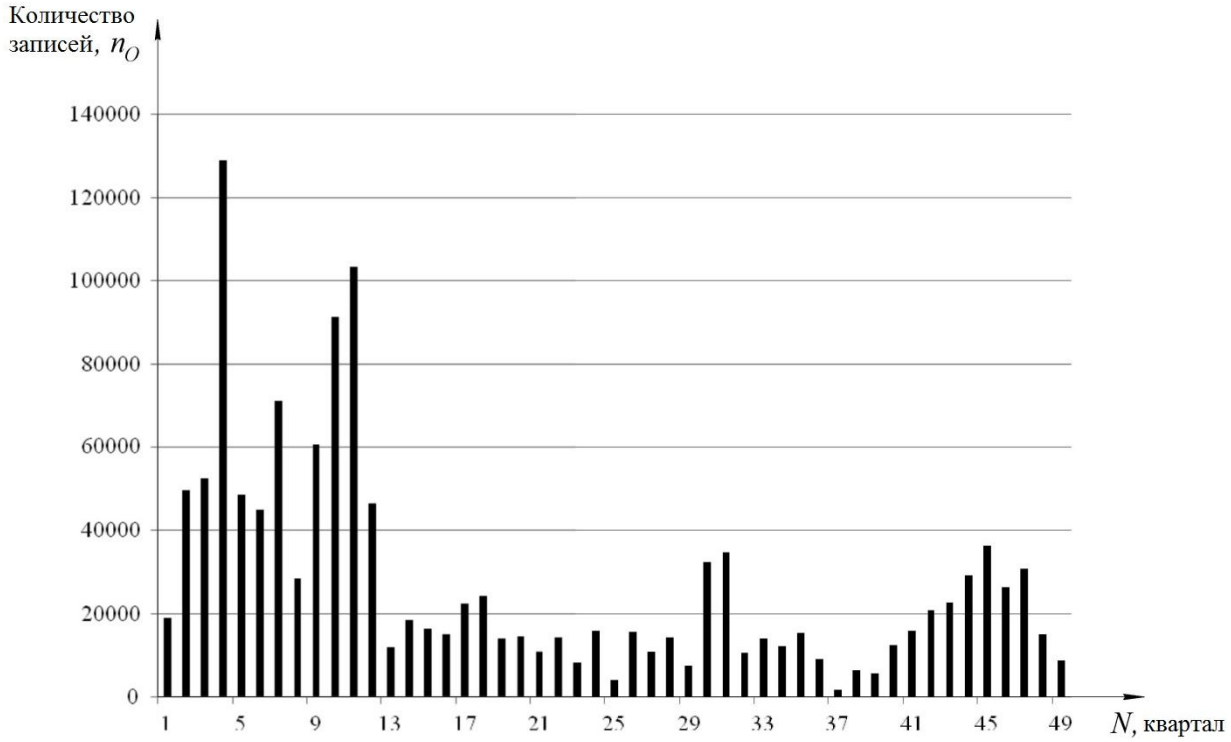


Рисунок 4 – Распределение количества непрерывных записей в файлах по временным отрезкам, равным одному кварталу

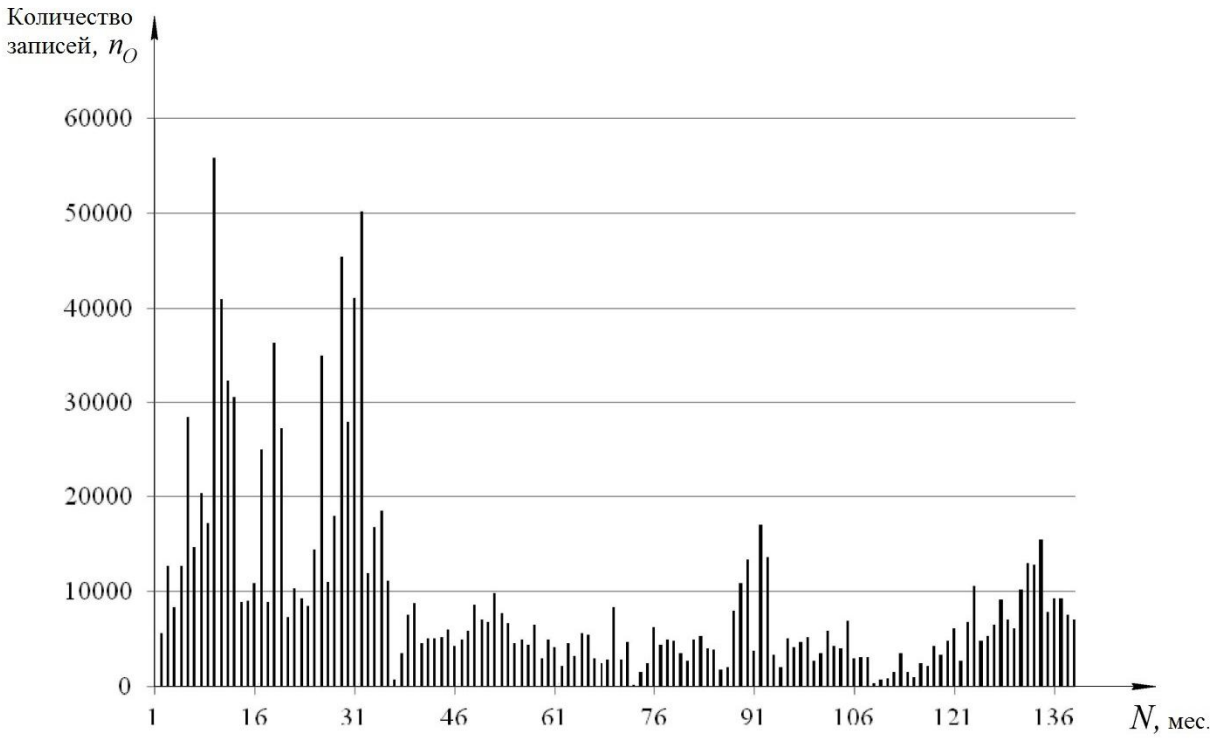


Рисунок 5 – Распределение количества непрерывных записей по временным отрезкам, равным одному месяцу

Таким образом, предложена методика для отображения времени измерения параметров дизель-генераторной установки маневровых тепловозов ТЭМ2 в едином временном пространстве. Также разработано программное обеспечение для реализации предложенной методики. В качестве единого временного пространства предлагается использовать отрезок времени длиной в 12 лет от одного капитального ремонта до следующего с разбиением на участки периодичностью в три года (см. рисунок 1).

Визуальное отображение, в соответствии с рисунком 3, не позволяет оценить численно распределение записей по временным интервалам. Поэтому на рисунках 4 и 5 представлены графики, характеризующие распределение всей совокупности записей n_o в файлах по временным отрезкам, равным одному кварталу и одному месяцу соответственно. При использовании временного отрезка в один месяц (см. рисунок 5) минимальное количество записей в одном из них составило 66. Очевидно, что при дальнейшем уменьшении интервала статистические выборки могут быть недостаточными по размеру. Следовательно, полученные зависимости позволяют вывести еще один важный результат рекомендательного характера – при имеющейся статистической базе для получения релевантной выборки достаточно использовать разбиение на интервалы не менее одного месяца.

Список литературы

1. Пат. 89834 Российская Федерация, МПК B61L 25/00, B61K 9/00. Бортовая система регистрации параметров работы локомотива. Патент на полезную модель / Бочаров В. М., Рубежанский П. Н., Головаш А. Н., Костяной А. А.; заявитель и патентообладатель ОАО «НИИТКД», Рубежанский П. Н., Бочаров В. М. – № 2009133199/22; заявл. 03.09.2009; опубл. 20.12.2009, Бюл. № 35. – 3 с.

2. ГОСТ 20911-89 Техническая диагностика. Термины и определения [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 13 с.

3. Анисимов, А. С. Методы исследования взаимовлияния параметров функционирования тепловоза [Текст] / А. С. Анисимов, В. А. Михеев, Ю. Б. Гришина // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – № 1 (1). – С. 2 – 8.

4. Михеев, В. А. Представление граф-моделью функциональных систем тепловозного дизеля [Текст] / В. А. Михеев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – № 2 (2). – С. 36 – 42.

5. ГОСТ 18322-78 Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 12 с.

6. Электронный справочник по математике: математические формулы по алгебре и геометрии, высшая математика, математика, математические формулы, множества [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.pm298.ru/.

7. Четвергов, В. А. Математические модели внезапных отказов деталей локомотивов в эксплуатации [Текст] / В. А. Четвергов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2011. – № 2 (6). – С. 51 – 58.

8. Четвергов, В. А. Модели параметрических отказов локомотивов в эксплуатации [Текст] / В. А. Четвергов, С. М. Овчаренко, К. И. Грейф // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2012. – № 2 (10). – С. 51 – 58.

9. Иванов, В. Н. Причины неплановых ремонтов и совершенствование системы обслуживания локомотивов: Автореф. дис… канд. техн. наук / В. Н. Иванов. – Санкт-Петербург, 2005. – 17 с.

УДК 629.4.027.432: 629.4.027.352

В. В. Шилер, А. В. Шилер

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ УПРУГОЙ ПРОКЛАДКИ ОБОДА КОЛЕСНОЙ ПАРЫ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ

Выполнена оценка напряженного состояния упругой прокладки обода колесной пары новой конструкции и разработана и обоснована методика ее расчета.

На основании анализа мирового опыта авторами разработана новая конструкция колесной пары с независимым вращением всех поверхностей катания колес и с подрессориванием бандажей колес [1]. Изложим кратко основные конструктивные особенности колесной пары. Каждое колесо новой конструкции разделено на два диска. Первый диск жестко насажен на ось и по периметру имеет форму гребня, который воспринимает только направляющие усилия со стороны рельсов. На втором диске (колесный центр) через упругую прокладку установлен цилиндрический бандаж (в дальнейшем по тексту – обод). На оси колесной пары колесный центр установлен на подшипниках качения, которые обеспечивают его свободное вращение от гребневого диска и соответствующих элементов второго колеса колесной пары. Обод воспринимает вертикальную и продольную нагрузки.

В качестве материала упругой прокладки обода использована резина. Как известно, силовые характеристики резиновых элементов в отличие от металлических существенно зависят от температуры, режима нагружения, влияния агрессивной среды и других многочисленных факторов. В рамках данной статьи не приведены результаты исследований влияния перечисленных внешних факторов на характеристики упругой прокладки обода. В колесной паре упругая прокладка обода и сам обод являются лимитирующими элементами по прочностным параметрам.

Целью представленной работы является разработка и обоснование методики расчета напряженного состояния упругой прокладки обода колеса колесной пары новой конструкции под действием внешней нагрузки.

Следует отметить, что характеристики упругости резиновых изделий при сжатии являются наиболее сложными и менее изучены, чем характеристики при других видах нагружений. Однако значительная часть резиновых амортизаторов работает на сжатие. Эти характеристики приходится определять косвенным путем по другим свойствам резины (например, по ее твердости) или проведением испытаний образцов резины. Приближенно расчетные зависимости для резиновых амортизаторов могут быть получены сравнительно простыми методами сопротивления материалов. Так, например, пределы применимости закона Гука можно расширить, если напряжения рассчитывать не по начальной площади (F) образца, а по величине площади (F_1) поперечного сечения деформированного образца. Характеристики, рассчитанные для этих условий, называют «исправленным» законом Гука. Достаточная для практики точность расчетов деформаций сдвига сохраняется вплоть до 100 % относительных деформаций этого типа. Поскольку при существующем уровне технологии изготовления резины ее механические свойства не являются стабильными даже в пределах одной партии с допуском, меньшим +10 %, то расчетные формулы при совместном действии нескольких нагрузок могут давать более или менее точные результаты лишь при малых деформациях, не превышающих 15 – 20 %. Поэтому, несмотря на многочисленные исследования, общепризнанного решения задачи о виде аналитической зависимости между (σ) и (ε) для сжатия – растяжения резины до настоящего времени не найдено. В этом случае удобно пользоваться графическим изображением характеристики амортизатора [3, 5], являющимся наглядным решением обеих задач — прямой и обратной.

В отечественной литературе при длительной динамической нагрузке для наиболее широко применяемой в амортизаторах резине (сайлент-блоков) рекомендуются допускаемые напряжения: для сдвига – 0,3 ÷ 1,0 МПа, для растяжения – 0,5 ÷ 1,0 МПа, для сжатия – 1,0 ÷ 1,5 МПа [3]. Появление кратковременной ударной нагрузки не приводит к снижению допускаемых напряжений, если резина работает при нормальной температуре.

Твердость используется для приближенного определения многих свойств резины, в частности ее модуля упругости. Это дает возможность провести приближенный расчет характеристик упругости резинового амортизатора. На рисунке 1 графически изображена зависимость модуля сдвига (G) резины при статическом нагружении от ее твердости (H). Модуль упругости резины примерно в три раза больше ее статического модуля сдвига, т. е.

$$E = 3G. \qquad (1)$$

Практические измерения показывают, что коэффициент Пуассона для резины составляет 0,5 при относительных деформациях, не превышающих 20 – 25 % [5].

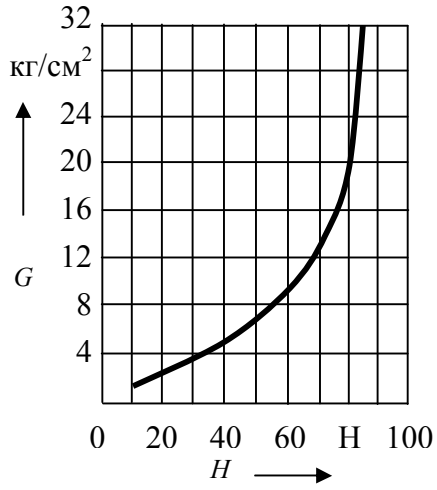


Рисунок 1 – Зависимость модуля сдвига (G) резины от ее твердости (H) по Шору

Степень поджатия резины оценивается коэффициентом

$$n = \delta / \delta_0, \qquad (2)$$

где δ_0 и δ – толщина резиновой втулки в свободном и в поджатом состоянии.

Диапазон оптимальной степени поджатия (n) зависит от твердости резины, максимального условного напряжения ($\sigma_{усл}^{max}$) в сжатой резине, модуля упругости (E) и степени деформации резинового элемента:

$$\sigma_{усл}^{max} = EK(1-n). \qquad (3)$$

Теоретически и экспериментально установлены значения оптимального поджатия резиновых втулок в сайлент-блоках (СБ), которое должно соответствовать 0,46 - n0,48 [5]. Минимальное поджатие определено условным напряжением ($\sigma_{усл}^{min}$), чтобы резина не имела перемещений относительно металла, а во втулке отсутствовали растягивающие напряжения при ее радиальном нагружении силой P:

$$\sigma_{усл}^{min} = n \cdot P / F, \qquad (4)$$

где F – площадь сечения деформированного (поджатого) образца.

Максимальная степень поджатия резины также ограничивается допускаемыми напряжениями ($[\sigma]_{усл}$) в наиболее напряженной части втулки по направлению действия силы. В связи с тем, что твердость резиновых втулок имеет разброс в интервале ±20 % и зависит от типа резины, то каждому значению твердости резиновой втулки должна соответствовать требуемая степень ее поджатия, чтобы не превышать пределы деформации ($\varepsilon < 15 \div 20$ %).

Упругость резинового амортизатора сжатия – растяжения зависит не только от перечисленных выше факторов, но и от формы резинового элемента и способа его крепления к арматуре, которые учитываются коэффициентом формы. Для определения коэффициента формы k принято выражение [3]:

$$k = 1 + mk_0, \qquad (5)$$

где k_0 – отношение площади опорной поверхности к площади свободной боковой поверхности резины;

m – коэффициент, не зависящий от k_0.

Коэффициент m может изменяться в широких пределах [4]. Максимальное значение коэффициент ($m_{max} = 4{,}67$) принимает в случае крепления резины к арматуре.

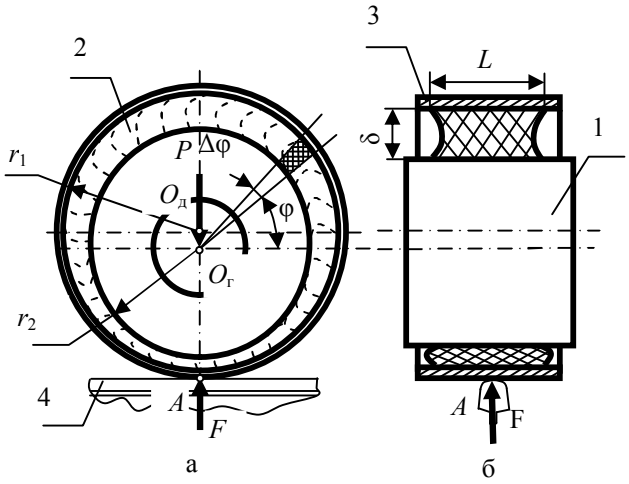


Рисунок 2 – Расчетная схема деформации упругой прокладки при радиальном нагружении обода

Далее приведем расчеты напряженного состояния упругой прокладки обода. На рисунке 2 показаны расчетная схема нагрузки, действующая на обод 3 колеса новой конструкции, и деформации упругой прокладки 2. Обод опирается на рельс 4, а упругая прокладка крепится на колесном центре 1. Упругая прокладка обода воспринимает следующие нагрузки: радиальную нагрузку от веса экипажа; скручивание, которое возникает при пере-

даче силы тяги или торможения; силы поперечного сдвига и перекоса. Принято характеристики резиновых амортизаторов рассчитывать отдельно для двух видов сочетания нагружения, соответствующих двум перемещениям и двум вращениям [3, 5]. При рассмотрении совместного действия двух видов нагружения предполагается справедливым принцип независимости действия сил.

В представленной работе напряженное состояние резиновой прокладки оценивалось для основной группы сил нагрузки: радиальной силы и сил поперечного сдвига и перекоса. При радиальном нагружении упругой прокладки напряженное состояние резины является очень сложным и характеризуется сочетанием напряжений сдвига, сжатия и растяжения, которые представлены на рисунке 2, а. Характер деформаций резины упругой прокладки с плоскими торцами и прикрепленной к арматуре при радиальном нагружении схематично изображен на рисунке 2, б. В каждом сечении, перпендикулярном оси втулки, напряжения сжатия и растяжения достигают экстремальных значений на линии действия внешней нагрузки, а напряжения сдвига максимальны в точках диаметра, перпендикулярного к направлению внешней силы.

Расчет характеристик радиального нагружения упругой прокладки с плоскими торцами выполняется с использованием следующей зависимости [3]:

$$P = \frac{\pi \cdot L \cdot z_0}{\ln \frac{r_1}{r_2}} \left(2E \cdot k \frac{1 - \cos \xi}{\sin^2 \xi \cdot \cos \xi} + G \right), \qquad (6)$$

где z_0 – деформация амортизатора – прокладки, мм;

r_1 – наружный радиус прокладки, мм;

r_2 – внутренний радиус прокладки, мм;

ξ – вспомогательный угол, характеризующий максимальную величину относительной деформации сжатия резины (r_0 / δ), которая всегда меньше единицы и определяется равенством:

$$\frac{z_0}{\delta} = \sin \xi, \qquad (7)$$

где z_0 – деформация амортизатора – прокладки, мм;

δ – толщина резиновой втулки в поджатом состоянии, мм.

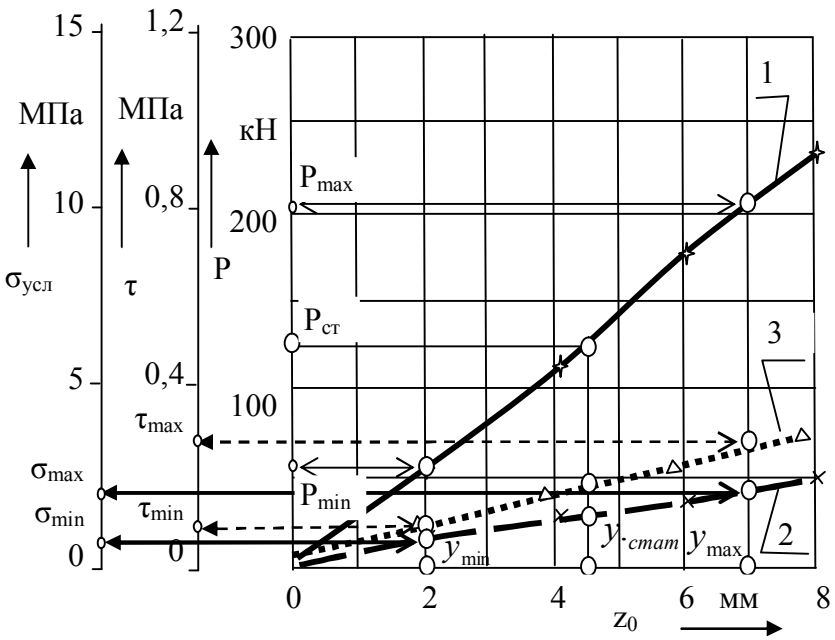


Рисунок 3 – Характеристики амортизатора – прокладки гибкого бандажа (при D = 0,78 м; z_0 = 0,01 м; δ = 0,04 м; L = 0,01 м; m = 0,2; E = 2,3 МПа; G = 0,73 МПа) : 1 – сила радиальной нагрузки (P); 2 – условное напряжение сжатия ($\sigma_{усл}$); 3 – напряжение сдвига (τ) с учетом сил тяги и торможения

Формула (6) остается справедливой и для верхней половины упругой прокладки, в которой действуют напряжения растяжения и сдвига.

Некоторые затруднения представляет расчет по формуле деформаций, соответствующих заданному усилию, так как уравнение неразрешимо относительно деформации (z_0). Для упрощения расчета рекомендуется [3] построить график зависимости (P) от (z_0), представленный на рисунке 3, после этого решается любая задача. На этом же графике строится зависимость условных напряжений сжатия ($\sigma_{усл}$) и сдвига (τ) от деформаций (z_0). Эти напряжения

рассчитывают по формулам:

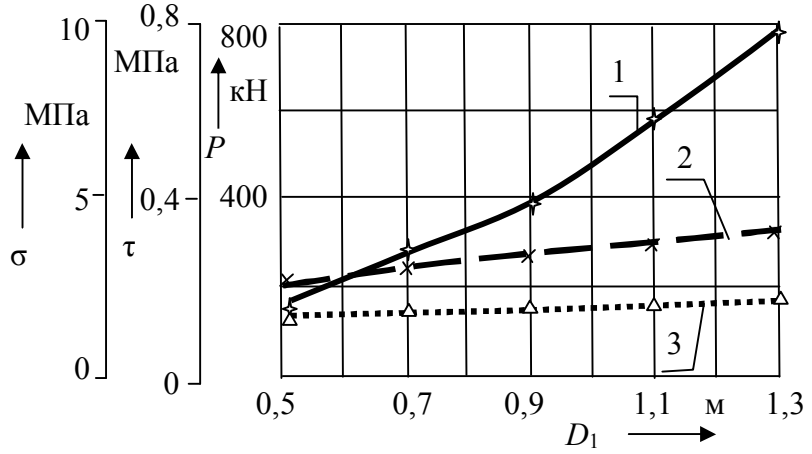


Рисунок 4 – Зависимость характеристик упругой прокладки от диаметра (D_1) (при z_0 = 0,006 м; δ = 0,04 м; L = 0,01 м; E = 5,7 МПа; m = 0,2; G = 1,9 МПа): 1 – сила радиальной нагрузки (P); 2 – условное напряжение сжатия ($\sigma_{усл}$); 3 – напряжение сдвига (τ)

$$\sigma_{усл} = E \cdot k \frac{\delta \cdot z_0}{(\delta - z_0)^2}; \quad (8)$$

$$\tau = G \frac{z_0}{\delta}. \quad (9)$$

Тогда расчет деформаций и напряжений в резине при заданной нагрузке сводится к проведению нескольких прямых линий (ход расчета изображен стрелками на рисунке 3).

На основании представленной выше методики построены графики зависимостей напряженного состояния упругой прокладки от основных параметров резины и обода: внутреннего диаметра обода (*D*), толщины прокладки (δ) (рисунок 4); величины вертикальной деформации обода (z_0) (рисунок 5). Значения конструктивных параметров прокладки (*D* и *L*) соответствуют размерам стандартной колесной пары грузового вагона.

Прочностные характеристики упругой прокладки (z_0, δ, *m*, *E* и *G*) подобраны по графику для интервала амплитуды упругих перемещений z_0, равного ±2,5 мм, который установлен на основании результатов измерений волнообразного износа рельсовых нитей [6]. Согласно выполненным графическим построениям (см. рисунок 5) в пределах принятых значений амплитуды перемещений напряженное состояние резиновой упругой прокладки в два раза меньше допустимых значений.

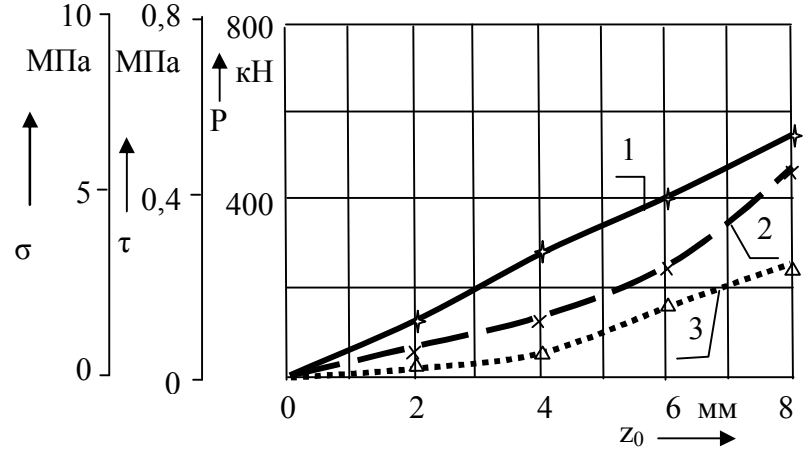


Рисунок 5 – Зависимость характеристик упругой прокладки от величины деформации (z_0) (при D = 0,9 м; δ = 0,04 м; L = 0,01 м; m = 2; E = 5,7 МПа; G = 1,9 МПа;): 1 – сила радиальной нагрузки (P); 2 – условное напряжение сжатия ($\sigma_{усл}$); 3 – напряжение сдвига (τ)

Для выполнения динамических расчетов движения обода по рельсу применены выражения жесткостей, предложенные в работе [5], с использованием которых построены зависимости жесткости упругой прокладки от внутреннего диаметра обода (рисунок 6). Согласно графикам, представленным на рисунке 6, с ростом значения диаметра обода значения жесткостей при перекосе и скручивании увеличиваются на порядок. Следует отметить, что на жесткость резиновых амортизаторов существенное влияние оказывают предварительные механические воздействия.

Если последовательно следуют несколько циклов нагружения и разгружения резины, кривая нагружения становится все более пологой и приближается к некоторому равновесному положению, зависящему от частоты нагружения и степени деформации, а также от качества резины.

Для оценки объективности полученных результатов расчетов резиновой прокладки гибкого обода были выполнены по той же методике расчеты параметров сайлент-блока буксовых поводков тепловоза. Выбор сайлент-блока буксовых поводков в качестве базовой модели для проверки обусловлен тем, что он находится в таких же условиях эксплуатации, что и колесная пара.

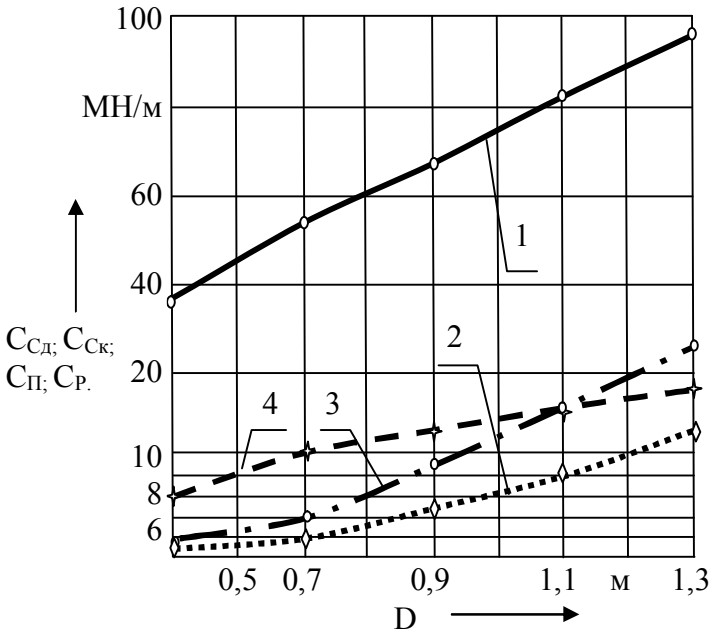


Рисунок 6 – Зависимость жесткости упругой прокладки от диаметра гибкого бандажа (при δ = 0,04м; E = 2,37 МПа; L = 0,01 м; m = 2). Линии: 1 – радиальная жесткость ($C_Р$); 2 – жесткость при перекосе ($C_п$); 3 – жесткость скручивания ($C_{Ск}$); 4 – жесткость при сдвиге ($C_{Сд}$)

Так, по результатам исследований, приведенным в работе [2], значение главных напряжений в резине сайлент-блока поводка могут достигать 6 МПа, что в два раза превышает допустимые значения напряжения. Напряжения сдвига (τ) находятся в зоне допустимых значений (2 МПа). При сравнении этих данных с результатами расчетов резины упругой прокладки обода (см. рисунок 4) можно сделать вывод о том, что напряженное состояние резины упругой прокладки обода значительно ниже, чем у резины сайлент-блока поводка тепловоза, который находится в эксплуатации несколько десятков лет и обеспечивает надежную работу тележки во всех режимах движения. Более низкий уровень напряженного состояния резины упругой прокладки обода в сравнении с другими вариантами конструкций обусловлен следующими факторами: во-первых, отсутствием деформации перекоса и закручивания, обусловленных паразитным проскальзыванием колес в колесной паре, а также отсутствием направляющих усилий со стороны рельса; во-вторых, – большим значением отношения диаметра опорной поверхности резиновой прокладки к величине нагрузки гибкого обода. Окончательный вывод о прочности резиновой прокладки может быть получен после ее испытаний в реальных условиях эксплуатации.

На основании изложенного можно сделать выводы.

1. Составлена расчетная схема сил, действующих на упругую прокладку обода колесной пары новой конструкции.

2. Разработана и обоснована методика расчета напряженного состояния упругой прокладки обода.

3. Результаты расчетов напряженного состояния показывают достаточный уровень прочности упругой прокладки для обода колесной пары новой конструкции.

Список литературы

1. Пат. 2207250 Российская Федерация, МКИ 7 В 60 В 9/12. Колесо рельсового транспортного средства [Текст] / Шилер В. В., Шилер А. Н., Головаш А. Н., Рубежанский П. Н.; заявитель и патентообладатель Государственное унитарное предприятие «Центр внедрения новой техники и технологий «Транспорт». – № 2000125462/28; заявл. 09.10.00; опубл. 27.06.03, Бюл. № 18.

2. Тепляков, А. Н. Пути снижения интенсивности износа гребней колесных пар локомотивов [Текст]: Дис... канд. техн. наук / Тепляков А. Н.. – Хабаровск, 2004. – 157 с.

3. Григорьев, Е. Т. Расчет и конструирование резиновых амортизаторов [Текст] / Е. Т. Григорьев. – М.: Гос. науч.-техн. изд-во машиностроительной литературы, 1960. – 156 с.

4. Потураев, В. Н. Резиновые детали машин [Текст] / В. Н. Потураев, В. И. Дырда. – М.: Машиностроение, 1977. – 216 с.

5. Потураев, В. Н. Прикладная механика резины [Текст] / В. Н. Потураев, В. И. Дырда, И. И. Круш. – Киев: Наукова думка, 1975. – 214 с.

6. Шилер, В. В. Результаты исследований напряженного состояния рельсов и геометрии их поверхностей катания [Текст] / В. В. Шилер // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2012. – № 3. – С. 54 – 59.

УДК 621.331:621.311

Ю. В. Москалев, М. А. Карабанов

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ С ПРИМЕНЕНИЕМ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

На участках железных дорог, электрифицированных на постоянном токе, существует проблема неполной реализации существующего потенциала рекуперативного торможения, что в ряде случаев связано с отсутствием приемников энергии рекуперации. Предложена методика определения оптимальных параметров стационарного накопителя электроэнергии и оптимального закона регулирования его режимов заряда и разряда, которая может быть использована при проектировании и технико-экономическом обосновании эффективности внедрения стационарных накопителей энергии на тяговых подстанциях постоянного тока.

На участках железных дорог, электрифицированных на постоянном токе, существует проблема неполной реализации имеющегося потенциала рекуперативного торможения. Основной причиной этого является отсутствие приемников энергии рекуперации, за счет чего наблюдаются случаи повышения уровня напряжения в контактной сети выше установленной нормы, что недопустимо и вызывает ряд негативных последствий, в том числе – прекращение процесса рекуперации и снижение безопасности движения поездов.

Важным направлением научных исследований является разработка технологий и технических решений для повышения безопасности движения поездов и энергоэффективности железнодорожного транспорта, поэтому вопрос эффективного использования энергии рекуперации актуален, что подтверждается и положениями программы «Энергетическая стратегия железнодорожного транспорта на период до 2010 года и на перспективу до 2030 года».

Существуют различные варианты использования энергии рекуперации: потребление энергии на тягу другими поездами, находящимися на этой или на смежных межподстанционных зонах, возврат в систему внешнего электроснабжения при наличии на подстанциях инверторов, рассеивание энергии поглощающими устройствами.

Анализируя международный опыт по накоплению и использованию запасенной энергии, следует отметить, что одним из перспективных технических решений, направленных на эффективное использование избыточной энергии рекуперации может являться установка накопителей электрической энергии (НЭ). Возможными местами размещения накопителей могут являться тяговые подстанции, посты секционирования (ПС), пункты параллельного соединения (ППС), подвижной состав, а также различные сочетания этих вариантов.

Существуют современные разработки российских и иностранных ученых в области НЭ с различным видом запасаемой энергии в качестве элемента для снижения потерь энергии при ее преобразовании [1 – 4]. Некоторые их них, соответствующие по своим техническим параметрам требованиям магистральных железных дорог, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические параметры НЭ, используемых на транспорте

Критерий сопоставления	Инерционные (механические) НЭ	Химические аккумуляторы	Топливные ячейки (H_2)	Электрохимические конденсаторы	СПИН
Энергоемкость, кВт·ч	До 36* [4]	До 10* [1]	–	До 50* [5]	Сотни кВт·ч
Мощность, МВт	До 5 [4]	До 10 [1]	До 2	До 500	До 500 и более
КПД, %	70 – 90	60 – 90	45 – 55	90	95 – 97
Время реверса, с	0,1	0,01	0,01	0,01	0,01
Число циклов работы	10^4 – 10^6	2 000	–	Около 10^6	До 10^{12}
Время заряда-разряда	Минуты	Десятки минут		Десятки секунд	
Примерная стоимость [3], р./кВт (р./кВт·ч)	280 – 350 (300 – 25000)	300 (250)	1500 (15)	300 (25000 – 40000)	300 (500 – 2000)

*Энергоемкость модуля НЭ, набранного из единичных элементов.

При проектировании НЭ для тяговой сети магистральных железных дорог решаются задачи, включающие в себя выбор вида энергии, запасаемой в накопителе, разработку систем разряда-заряда, определения требуемых параметров устройства, места размещения и режимов работы, а также разработку систем защиты и управления.

Электроэнергетические параметры и технические характеристики НЭ непосредственно зависят от параметров системы тягового электроснабжения, варианта размещения, профиля пути, массы поездов, важными показателями целесообразности использования накопителя являются экономический и технический эффекты.

Рассмотрим подход к определению технических параметров стационарного НЭ, размещенного на тяговой подстанции. В этом случае можно обеспечить стабилизацию напряжения, снижение расхода электроэнергии и минимизацию пиков нагрузки тяговых подстанций.

При определении технических параметров стационарного НЭ для каждого рассматриваемого участка необходимо решить оптимизационную задачу, которая учитывает ряд факторов. В качестве целевой функции могут использоваться технические, энергетические или экономические критерии.

Для решения оптимизационной задачи необходимо использовать математическую модель, описывающую систему тягового электроснабжения. Математическое моделирование электрической сети с тяговыми нагрузками было выполнено с использованием методов мгновенных схем [6] и узловых потенциалов. При моделировании приняты следующие допущения: рассматривается двухпутный участок с двухсторонней схемой питания контактной сети; на ТП нет инверторов и поглощающих устройств; напряжение холостого хода тяговых подстанций равно 3600 В; блуждающие токи отсутствуют.

Необходимо отметить, что имитационное моделирование для определения параметров НЭ с использованием существующих программных комплексов выполнить сложно, так как в этих программах отсутствуют элементы, соответствующие НЭ.

Методика определения оптимальных параметров стационарного НЭ и оптимального закона регулирования его режимов заряда и разряда состоит из двух частей: необходимо подготовить исходные данные, выполнить расчет параметров НЭ по предложенному алгоритму.

Для расчетов необходимо знать значения токов электроподвижного состава (ЭПС) при его перемещении между тяговыми подстанциями (ТП) и параметры системы тягового электроснабжения расчетного участка. Значения токов могут быть получены при выполнении тяговых расчетов [7] или экспериментальных измерений.

Исходными данными для расчета являются следующие.

1) Параметры системы тягового электроснабжения (размещение ТП, постов секционирования, типы трансформаторов (понижающих и преобразовательных), выпрямителей, инверторов на ТП и их электрические параметры; схемы питания контактной сети, марки проводов контактной сети, проводов питающих линий, электрические параметры рельсового пути и т. д.).

2) Параметры участка (расположение станций, данные о железнодорожном пути, профиль, радиусы кривых, бесстыковой или звеньевой путь), информация об ограничении скорости на участках.

3) Технические характеристики поездов (электропоездов).

4) Информация о графиках движения поездов (электропоездов).

Алгоритм методики определения оптимальных параметров стационарного НЭ, размещенного на тяговой подстанции, можно представить в виде последовательности операций.

1. Составляется математическая модель тяговой сети с ЭПС с использованием мгновенных схем [6], выполняется имитационное моделирование перемещения поездов.

2. Определяются моменты времени, при котором подстанция принимает энергию из контактной сети, ее сопротивление принимается равным бесконечности и определяется оптимальное значение ЭДС НЭ и величина запасаемой электроэнергии для этих интервалов времени (использован критерий оптимизации – минимум потерь электроэнергии в тяговой сети).

3. Определяются объемы энергии, которые необходимо запасти в НЭ для всех моментов времени (п. 2) за расчетный период (суточный интервал).

4. Определяются зависимости потерь мощности (электроэнергии) в тяговой сети от ЭДС НЭ $\Delta P_{\text{ТС}} = f(E_{\text{НЭ}})$ и энергии НЭ от ЭДС НЭ $W_{\text{НЭ}} = f(E_{\text{НЭ}})$ для каждого момента времени, при котором ТП отдает электроэнергию на тягу поездов.

5. Выполняется оптимальное распределение запасенной энергии для каждой мгновенной схемы (для каждого момента времени t), при котором ТП с НЭ работают в режиме источника электроэнергии. Оптимальное распределение энергии НЭ обеспечивается за счет оптимального регулирования ЭДС НЭ. Определение оптимальных значений ЭДС НЭ для каждого момента времени t выполняется с использованием оптимизационной модели:

$$\begin{gathered}\Delta P_{\text{ТС}}\left(E_{\text{НЭ1}},...,E_{\text{НЭ}t},...,E_{\text{НЭ}N}\right)=\sum_{t=1}^{N}\left(a_t E_{\text{НЭ}t}^2+b_t E_{\text{НЭ}t}+c_t\right)\to\min;\\ \sum_{t=1}^{N}\left(d_t E_{\text{НЭ}t}^2+f_t E_{\text{НЭ}t}\right)=W_{\text{НЭ}};\ E_{\text{НЭ}t}\ge-\frac{f_t}{d_t},\end{gathered}\qquad(1)$$

где N – количество мгновенных схем (моментов времени t), для которых ТП отдает электроэнергию на тягу поездов;

$a_t - f_t$ – параметры оптимизационной модели, которые определяются на основании описывающей математической модели тяговой сети.

Последнее условие в системе выражений (1) позволяет определить оптимальные ЭДС НЭ без его заряда для моментов времени, при котором ТП отдает электроэнергию на тягу поездов.

Зависимость потерь мощности от ЭДС НЭ может быть описана полиномом 2-й степени, так как потери мощности в сети связаны с токами ветвей по закону параболы и токи ветвей для линейной электрической цепи в соответствии с принципом суперпозиций линейно связаны с ЭДС.

Для определения технических характеристик стационарного НЭ в качестве примера рассмотрим двухпутный участок (рисунок 1), состоящий из трех тяговых подстанций, электрифицированный по системе постоянного тока напряжением 3,3 кВ; тип контактной подвески – М-120+МФ-150+А-185 (схема питания контактной сети – двухсторонняя с ПС и ППС); тип рельса – Р65.

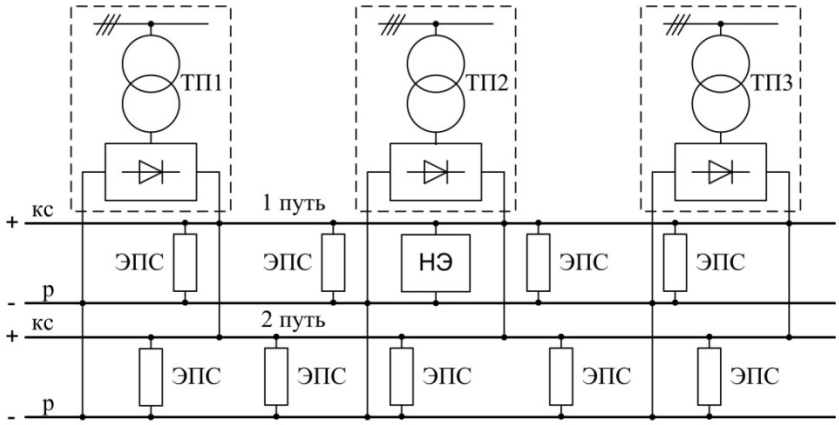


Рисунок 1 – Расчетный участок (ПС, ППС и соединения рельсовых цепей не показаны)

Моделирование выполняется при условии, что в интенсивный интервал времени на участке перемещается семь пар поездов с постоянной скоростью 70 км/ч, расстояние между ними – 6 км. Интенсивный интервал времени равен 34,29 мин и разделен по 1,71 мин. Таким образом, задача решается для 21 мгновенной схемы, которые определяют каждое новое положение поездов. Например, для поезда, который перемещается от ТП 1 до ТП 3, каждое новое положение определяет одна из ветвей 106 – 126 (рисунок 2).

Для описания электрического состояния цепи (см. рисунок 2) для каждого момента времени t заданы значения токов ЭПС и тяговых подстанций (источники тока).

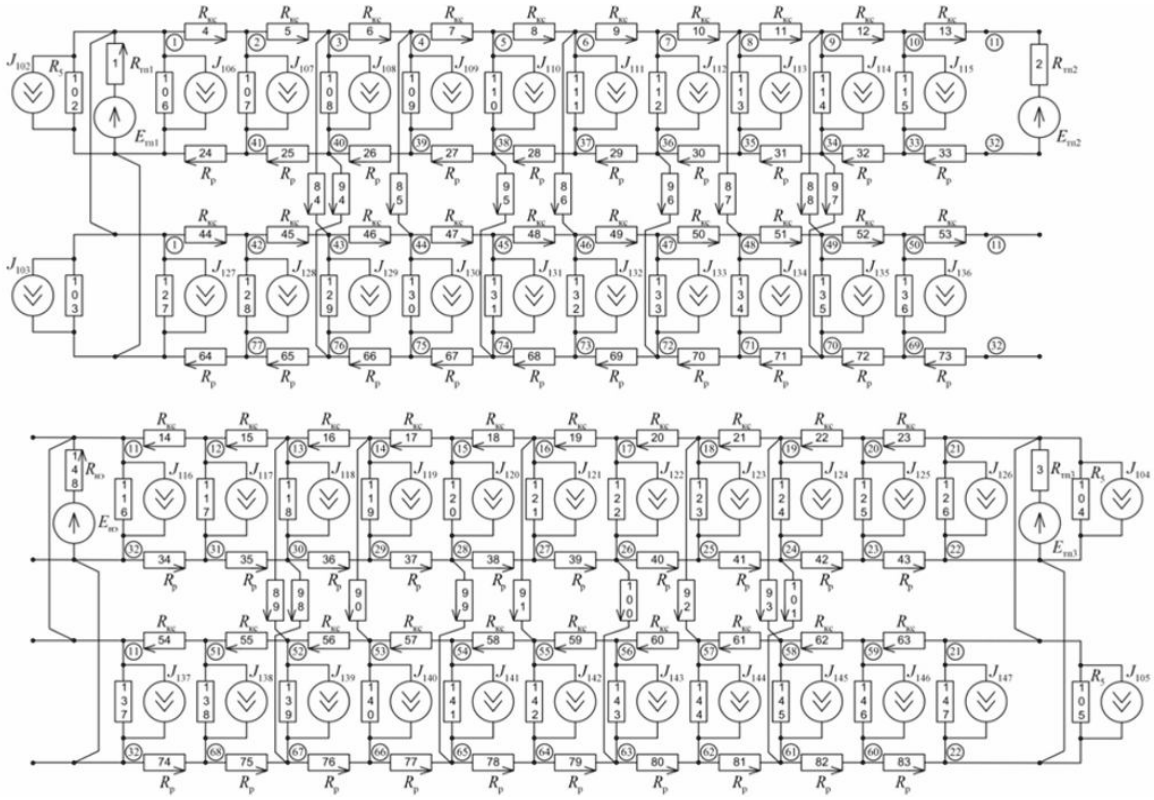


Рисунок 2 – Схема замещения расчетного участка

Электрические параметры элементов системы тягового электроснабжения и параметры модели представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2 – Электрические параметры элементов системы тягового электроснабжения [6]

Марка провода, тип рельса	МФ-150	М-120	А-185	Р-65
Электрическое сопротивление 1 км провода (рельса) при 20°С, Ом/км	0,118	0,158	0,17	0,0155 (одного пути)

Таблица 3 – Параметры модели схемы замещения системы тягового электроснабжения

Параметр (условные обозначения на рисунке 2)	Значение
Внутреннее сопротивление ТП ($R_{тп}$), Ом	0,02
Внутреннее сопротивление НЭ ($R_{нэ}$), Ом	0,1
Расстояние между ТП, км	20
Дискретизация расстояния между ТП, км	2
Сопротивление контактной сети (2 км) ($R_{кс}$), Ом	0,096
Сопротивление рельсовой цепи одного пути (2 км) ($R_р$), Ом	0,031
Сопротивление дроссель-трансформаторов, Ом	0,05
Сопротивление ПС и ППС, Ом	0

В качестве примера в таблице 4 приведены значения токов для моментов времени $t = 4$ и $t = 5$ (всего в примере 21 мгновенная схема). Знак тока зависит от режима работы ЭПС: при положительном значении – тяговый режим, при отрицательном – рекуперация.

В расчете сопротивления пунктов параллельного соединения (ветви 84, 88, 89, 93) и постов секционирования (ветви 86 и 91) приняты равными нулю.

Таблица 4 – Значения токов ЭПС и тяговых подстанций

Номер ветви (см. рисунок 2)	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116
Ток ветвей (t = 4), кА	0,3	1,2	1,2	1,2	2,2	0	0	-1	0	0	-2	0	0	1	0
Ток ветвей (t = 5), кА	1,2	1,2	1,2	1,2	0	1,5	0	0	1,5	0	0	-0,7	0	0	1,2
Номер ветви (см. рисунок 2)	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131
Ток ветвей (t = 4), кА	0	0,5	0	0	0,7	0	0	-2	0	0	0	1,2	0	0	0,5
Ток ветвей (t = 5), кА	0	0	1,1	0	0	1,1	0	0	0,8	0	1,1	0	0	2	0
Номер ветви (см. рисунок 2)	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146
Ток ветвей (t = 4), кА	0	0	1,2	0	0	0,3	0	0	-2	0	0	0,3	0	0	0,8
Ток ветвей (t = 5), кА	0	1,5	0	0	1,3	0	0	0,8	0	0	-1	0	0	1,2	0

С помощью математической модели, составленной с использованием схемы замещения (см. рисунок 2) и метода узловых потенциалов, получены значения параметров оптимизационной модели (1) для всех мгновенных схем.

В таблице 5 приведены параметры модели (1) только для двух моментов времени.

Таблица 5 – Значения параметров оптимизационной модели

Момент времени (t)	a_t	$b_t \cdot 10^4$	$c_t \cdot 10^7$	$d_t \cdot 10^{-4}$	f_t
4	1,3593472986	- 9,7757493824	1,9267714483	2,5131791399	- 0,9049511285
5	1,3311068989	- 1,1225302815	2,965417523	2,5256466905	- 0,8799914849

В таблице 6 показаны оптимальные значения ЭДС НЭ для всех мгновенных схем и потери мощности в тяговой сети без использования и с использованием НЭ.

Таблица 6 – Потери мощности в тяговой сети, напряжение на шинах ТП2 и оптимальные ЭДС НЭ

Момент времени t (заряд-разряд НЭ)	Без использования НЭ			С использованием НЭ		
	напряжение на шинах ТП2, В	потери активной мощности в тяговой сети, кВт	потери активной мощности в тяговой сети, %	ЭДС НЭ ТП2, В (оптимальный закон регулирования ЭДС)	потери активной мощности в тяговой сети, кВт	потери активной мощности в тяговой сети, %
1	3530,22	2442,61	5,26	3530,20	2442,61	5,26
2	3488,05	6170,95	9,67	3488,00	6170,95	9,67
3	3479,51	7738,64	11,31	3479,51	7738,64	11,31
4 (-4,7 кВт·ч)	**3626,13**	**1693,24**	**12,30**	**3595,20**	**1692,13**	**12,16**
5 (+3,8 кВт·ч)	3484,22	6702,10	10,39	3488,80	6693,21	10,40
6 (+0,9 кВт·ч)	3485,04	7399,71	11,24	3486,10	7397,65	11,24
7	3518,68	3869,38	7,54	3518,70	3869,38	7,54
8	3497,74	5685,61	9,36	3497,70	5685,61	9,36
9 (-40 кВт·ч)	**3725,26**	**1761,18**	**7,44**	**3560,61**	**1711,08**	**6,80**
10 (+40 кВт·ч)	3528,07	3665,34	7,18	3575,70	3610,66	7,27
11 (-31,4 кВт·ч)	**3695,79**	**2032,46**	**14,20**	**3567,99**	**2002,27**	**13,05**
12 (+5,4 кВт·ч)	3472,58	7899,93	11,67	3479,50	7885,15	11,68
13	3507,59	3545,18	6,74	3507,60	3545,18	6,74
14	3503,29	5738,03	9,42	3503,30	5738,03	9,42
15 (+26,0 Вт·ч)	3467,07	8576,43	12,27	3498,67	8507,03	12,34
16	3498,66	4623,13	8,12	3498,70	4623,13	8,12
17 (-40 кВт·ч)	**3725,96**	**2219,39**	**9,54**	**3558,71**	**2167,69**	**8,76**
18	3489,29	6800,97	10,67	3489,29	6800,97	10,67
19	3491,54	4848,31	8,33	3491,54	4848,31	8,33
20 (+30,5 кВт·ч)	3474,91	6797,11	10,07	3512,29	6720,19	10,13
21 (+9,5 кВт·ч)	3480,43	7665,15	11,32	3492,71	7640,62	11,34

Потери электрической энергии в тяговой сети с НЭ на ТП снижаются незначительно (на 11 кВт·ч для примера), что можно объяснить появлением дополнительных потерь мощности (энергии) в тяговой сети от токов заряда-разряда НЭ, поэтому основной эффект может быть получен за счет увеличения объемов реализованной энергии рекуперации (116 кВт·ч для примера). В таблице 7 показано изменение физических величин при эксплуатации НЭ.

Таблица 7 – Изменение физических величин при эксплуатации НЭ

Момент времени t	ЭДС НЭ ТП2, В	Ток НЭ, А	Мощность НЭ, кВт	Энергия НЭ, кВтч	Ток ТП2, А
1	3530,2	0,0	0,0	0,0	3489,0
2	3488,0	0,0	0,0	0,0	5598,0
3	3479,5	0,0	0,0	0,0	6024,6
4	3595,2	-47,1	-169,3	-4,7	0,0
5	3488,8	38,5	134,5	3,8	5752,7
6	3486,1	9,0	31,2	0,9	5739,8
7	3518,7	0,0	0,0	0,0	4065,9
8	3497,7	0,0	0,0	0,0	5113,5
9	3560,6	-403,3	-1435,9	-40,0	0,0
10	3575,7	401,0	1433,7	40,0	3219,8
11	3568,0	-313,0	-1116,9	-31,4	0,0
12	3479,5	58,3	202,7	5,4	6316,3
13	3507,6	0,0	0,0	0,0	4620,4
14	3503,3	0,0	0,0	0,0	4835,6
15	3498,7	266,0	930,6	26,0	6396,5
16	3498,7	0,0	0,0	0,0	5066,6
17	3558,7	-409,7	-1457,9	-40,0	0,0
18	3489,3	0,0	0,0	0,0	5535,3
19	3491,5	0,0	0,0	0,0	5423,3
20	3512,3	314,7	1105,5	30,5	5959,2
21	3492,7	103,4	361,1	9,5	5881,3

В таблицах 6 и 7 значения тока, мощности и энергии имеют отрицательный знак в режиме заряда НЭ (ток направлен встречно ЭДС ветви 148 на рисунке 2) и наоборот.

На рисунках 3 и 4 показаны оптимальный закон изменения ЭДС НЭ в зависимости от момента времени t на двухпутном участке и процесс заряда-разряда НЭ.

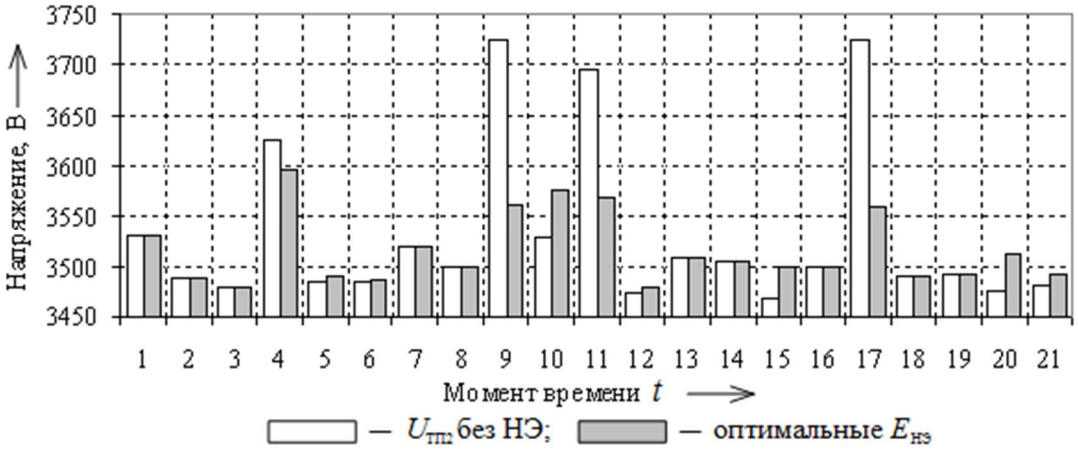


Рисунок 3 – Оптимальный закон изменения ЭДС НЭ

Необходимо отметить, что наиболее простой способ управления работой НЭ (без учета движения поездов и потерь энергии в сети): процесс заряда начинается при превышении напряжения на шинах ТП 3650 В (для ТП без инвертора и поглощающего устройства с напряжением холостого хода ТП 3600 В), а процесс разряда – при напряжении на шинах ТП меньше 3600 В. Возможны другие значения уставок по напряжению на включение и отключение накопителя, обоснованные техническим расчетом.

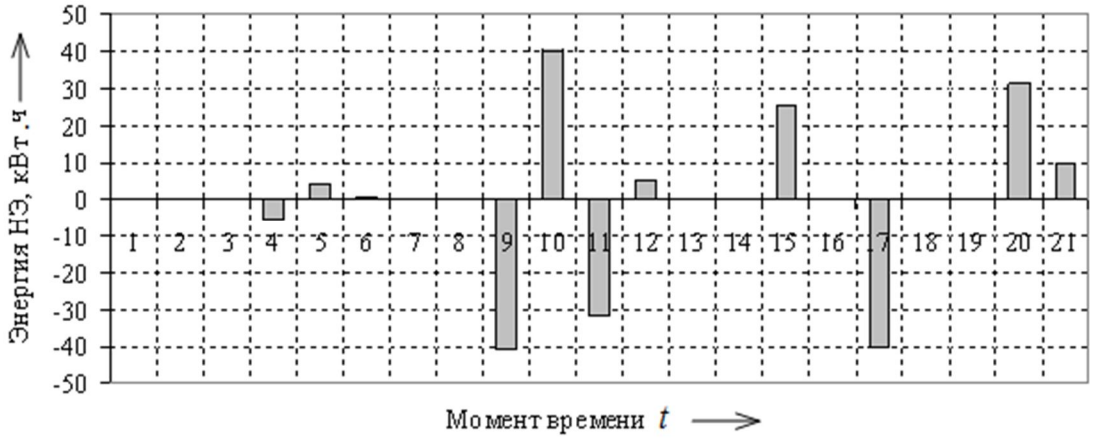


Рисунок 4 – Процесс заряда-разряда НЭ

В таблице 8 приведены рассчитанные оптимальные параметры стационарного НЭ.

Таблица 8 – Оптимальные параметры стационарного НЭ, размещенного на ТП

Параметр	Энергоемкость, кВт·ч (МДж)	Мощность, кВт	Диапазон регулирования ЭДС, В	Ток, А
Значение	40 (144)	1500	3479 – 3595	410

Необходимые электроэнергетические параметры НЭ зависят от множества факторов. Для систем электроснабжения магистральных железных дорог в большинстве случаев необходимая энергоемкость НЭ будет составлять несколько сотен мегаджоулей, мощность несколько мегаватт.

На основании сравнения основных технических параметров существующих НЭ (таблица 1) в большей степени требованиям систем тягового электроснабжения железных дорог удовлетворяют суперконденсаторы, сверхпроводниковые индуктивные и инерционные НЭ. В настоящее время основной причиной, сдерживающей их широкое применение на транспорте, является высокая стоимость НЭ требуемой энергоемкости.

При оценке экономического эффекта необходимо учитывать не только основные его составляющие, обусловленные снижением расхода электрической энергии на тягу поездов, повышением и стабилизацией напряжения в контактной сети, снижением пиков нагрузки в тяговой сети, но и эффекты от увеличения ресурса элементов системы тягового электроснабжения за счет снижения их нагрузки, повышения пропускной способности тяговой сети и безопасности движения поездов. Значительный экономический эффект может быть получен при полном сглаживании графика потребления электроэнергии тяговой подстанции, но при этом энергоемкость НЭ должна составлять сотни киловатт-часов.

Экономический эффект также зависит от количества циклов заряда-разряда НЭ в сутки. Для рассматриваемой в статье модели двухпутного участка постоянного тока 3 кВ снижение расхода электрической энергии на тягу составляет 127 кВт·ч. При повторении такой ситуации m раз в сутки расход энергии уменьшится m раз на 127 кВт·ч. Если принять $m = 11$, то стоимость сэкономленной электроэнергии в год составит 1,453 млн р. (при стоимости электроэнергии 2,85 р./кВт·ч).

Если принять, что стоимость 1 кВт·ч запасенной энергии 0,6 млн р. (электрохимические конденсаторы), то срок окупаемости НЭ составит 17 лет (без учета дисконтирования).

С учетом эффекта от повышения и стабилизации напряжения в контактной сети и, следовательно, увеличения скоростей поездов и КПД электровозов и эффекта от увеличения срока службы выпрямителей и тяговых трансформаторов срок окупаемости существенно снизится.

Известно, что стоимость электрохимических конденсаторов с каждым годом снижается (за 14 лет удельная стоимость за 1 кДж уменьшилась более чем в 220 раз), поэтому в ближайшее время срок окупаемости НЭ с их использованием сократится до нескольких лет.

Таким образом, количественные показатели повышения энергетической эффективности

системы тягового электроснабжения постоянного тока с использованием НЭ зависят от многих факторов, одним из важных является реализация оптимального закона регулирования режимов заряда и разряда НЭ.

Предложенная методика определения оптимальных параметров стационарного НЭ и оптимального закона регулирования его режимов заряда и разряда может быть использована при проектировании и технико-экономическом обосновании эффективности внедрения стационарных накопителей энергии на ТП системы электроснабжения постоянного тока железных дорог.

Список литературы

1. Накопители энергии [Текст] / Д. А. Бут, Б. Л. Алиевский и др. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 400 с.

2. Астахов, Ю. Н. Накопители энергии в электрических системах [Текст] / Ю. Н. Астахов, В. А. Веников, А. Г. Тер-Газарян. – М.: Высшая школа, 1989. – 159 с.

3. Алексеев, Б. А. Применение накопителей энергии в электроэнергетике [Текст] / Б. А. Алексеев // Электро. – 2005. – № 1. – С. 42 – 46.

4. Ruddel, A. Storage Technology Report: WP-ST6 Flywheel /A. Ruddel // CCLRC-Rutherford Appleton Laboratory. – Oxfordshire, 2003. 30 p.

5. Стационарная система аккумулирования энергии рекуперации электроподвижного состава метрополитена на базе емкостных накопителей энергии [Текст] / Ю. А. Бродский, А. И. Подаруев и др. // Электротехника. – 2008. – № 7. – С. 38 – 41.

6. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.

7. Правила тяговых расчетов для поездной работы [Текст]. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.

УДК 621.436

Е. И. Сковородников, А. С. Анисимов, Ю. Б. Гришина, М. В. Глухова

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СМЕСЕВЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ ТЕПЛОВОЗОВ

В статье представлена методика для оценки эффективности использования смесевых углеводородных видов топлива в энергетических установках тепловозов. Модельные расчеты выполнены с учетом изменения физико-химических и теплофизических характеристик топливных смесей и условий эксплуатации тепловозов

Концепция перехода к дальнейшему устойчивому развитию транспортной системы России в значительной степени зависит от развития энергетики – системообразующей отрасли хозяйства – в соответствии с экологическими и экономическими требованиями. Многогранный эффект от использования альтернативных и смесевых видов топлива включает в себя энергетический, экологический и экономический компоненты.

На фоне возрастающей энергетической потребности мировые запасы топлива истощаются. По результатам различных научных прогнозов предполагается, что запасов угля человечеству хватит приблизительно на 100 лет, запасов газа и нефти – на 40 лет.

Проблемы сбережения природных ресурсов требуют противопоставления существующим технологиям производства энергии технологий, основанных на использовании альтернативных источников экологически чистой энергии. По данным Международного конгресса энергетиков доля нетрадиционных и возобновляемых видов энергии в общем мировом энергетическом балансе к 2010 г. увеличится до 4 – 5 %. В России этот прогноз составляет 1 % [1, 2].

По сравнению с традиционными видами топлива альтернативные источники энергии и смесевые виды топлива сжигаются в теоретическом количестве воздуха, благодаря чему обеспечиваются высокий тепловой КПД рабочего цикла дизеля и высокая температура сгорания топливной смеси.

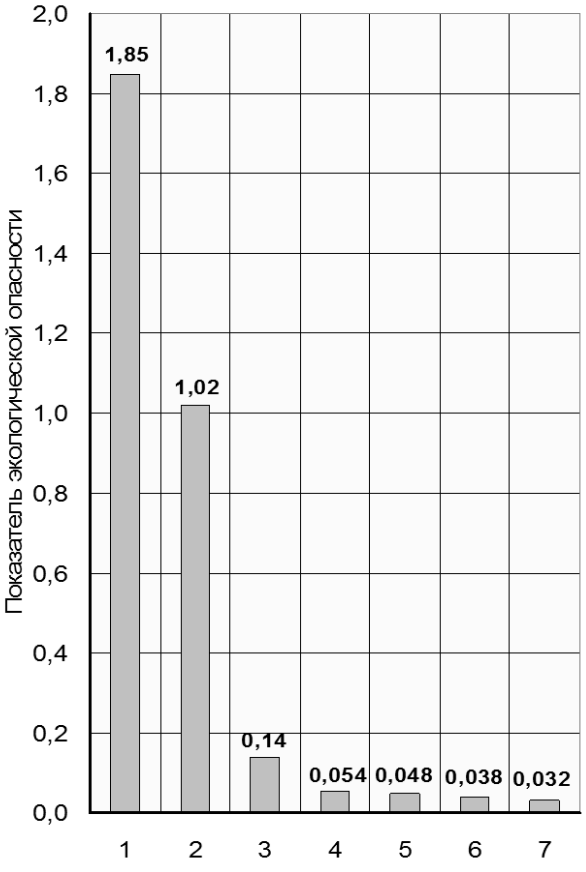


Рисунок 1 – Обобщенная оценка загрязнения окружающей среды продуктами сгорания: 1 – экибастузский уголь; 2 – торф; 3 – мазут; 4 – дизельное топливо; 5 – бензин; 6 – природный газ; 7 – биогаз

Использование природного газа и биогаза как составляющих топливной смеси позволяет получить значительный экологический эффект [3, 4]. Известно, что продукты энергетических процессов, связанных с использованием традиционных видов топлива, составляют около 80 – 88 % всех видов загрязнения окружающей среды. На рисунке 1 представлены показатели суммарной экологической опасности различных видов топлива, используемых в тепловых двигателях различного назначения [1]. Показатели рассчитаны как отношение предельно допустимой концентрации (ПДК) какого-либо вредного вещества в отработавших газах дизеля к ПДК золы.

По данным, представленным на рисунке 1, можно заключить, что при смешивании дизельного топлива с альтернативными видами горючей смеси в различных пропорциях можно обеспечить требуемый характер протекания рабочего процесса в цилиндре дизеля и наилучшие экологические показатели его работы. Очевидно, что при варьировании составом смесевого топлива возможно достижение его приемлемых физико-химических и теплофизических свойств, необходимой плотности, вязкости, коксуемости, температуры вспышки, температуры замерзания, теплоты сгорания, теплоемкости и других, обеспечивающих заданные мощностные, экономические и экологические характеристики тепловозных дизельных двигателей.

При выполнении теоретических исследований в качестве альтернативной добавки к стандартному дизельному топливу выбран природный газ, запасы которого в РФ довольно значительны, и биотопливо состава 87 % CH_4 и 13 % CO_2. Применение биотоплива может способствовать улучшению экологических характеристик ДВС и при незначительной его цене (если это возможно) – повышению эффективности эксплуатации ДВС. В настоящей статье не рассматривались какие-либо способы подачи добавки в цилиндр двигателя. Согласно рекомендациям работы [7] для конвертации дизельного двигателя для работы на различных смесевых видах топлива топливные присадки целесообразно подавать в наддувочный коллектор в газообразном виде, используя в качестве запального топлива дизельное, подаваемое через штатную топливную аппаратуру. Такая технология позволяет создавать «всеядный» дизельный двигатель.

Для оценки эффективности использования смесевых видов топлива в тепловозных дизелях целесообразно сформировать для каждого *j*-го вида топливной смеси обобщенный критерий эффективности $R_0^{(j)}$ в виде суммы безразмерных частных критериев эффективности, характеризующих изменение топливной экономичности, количества вредных выбросов и парниковых газов в продуктах сгорания топлива за рабочий цикл дизеля:

$$R_0^{(j)} = \frac{1}{N}(R_{be}^{(j)} + R_{NOx}^{(j)} + R_{CO}^{(j)} + R_C^{(j)} + R_{H_2O}^{(j)} + R_{CO_2}^{(j)} + ...), \quad (1)$$

где N – количество безразмерных частных критериев эффективности.

Очевидно, на первом этапе оценки эффективности использования альтернативных видов топлива в тепловозных дизелях целесообразно предположить, что если $R_0^{(j)} = 1$, то применение смесевых видов топлива целесообразно при условии, что каждый из используемых частных критериев не превышает значения единицы: $R_{be}^{(j)} = 1$; $R_{NOx}^{(j)} = 1$; $R_{CO}^{(j)} = 1$; $R_C^{(j)} = 1$; $R_{H_2O}^{(j)} = 1$; $R_{CO_2}^{(j)} = 1$.

Учитывая переменный режим работы тепловозной энергетической установки в условиях эксплуатации, в качестве частных критериев эффективности целесообразно выбрать:

отношение часового расхода топлива дизелем тепловоза, работающим на альтернативном (смесевом) топливе, к аналогичным характеристикам дизеля, работающего на стандартном дизельном топливе по ГОСТ 305-82;

отношение количества нормируемых токсичных компонентов в продуктах сгорания смесевых видов топлива за выбранный промежуток времени к аналогичным характеристикам дизеля, работающего на стандартном дизельном топливе по ГОСТ 305-82;

отношение количества парниковых газов в продуктах сгорания альтернативного топлива за выбранный промежуток времени к аналогичным характеристикам дизеля, работающего на стандартном дизельном топливе по ГОСТ 305-82.

Если условие (1) соблюдается, т. е. $R_0^{(j)} = 1$, то необходимо дополнительно использовать экономический критерий, который позволит оценить эксплуатационные затраты на топливо с учетом неизбежного изменения цены смесевого топлива.

В общем случае для дизельных двигателей при оценке их экологической безопасности оценивают количество оксидов азота NO_x, монооксида углерода *CO*, несгоревших углеводородов состава CH_m или C_nH_m, углерода *C* (сажа), водяных паров и диоксида углерода (углекислого газа) в составе продуктов сгорания различных углеводородных видов топлива [5]. Если учесть, что количество несгоревших углеводородов в отработавших газах дизеля незначительно, а дымность отработавших газов (количество несгоревшего углерода в продуктах сгорания) лимитируется количеством несгоревшего топлива и его элементарным составом, то при оценке эффективности применения смесевых видов топлива используем отношение между расчетными, или замеренными, значениями NO_x, *CO* и *C* для смесевых видов топлива к расчетным, или замеренным, значениям NO_x, *CO* и *C* для стандартного дизельного топлива. Таким образом, частные критерии эффективности, входящие в выражение (1), необходимо определять для каждого *j*-го вида топлива с учетом *i*-х эксплуатационных режимов работы дизельных локомотивов из соотношений:

$$R_{b_e}^{(j)} = \frac{\sum_{i=0}^{Пк} t_i b_{e_i}^{(j)} Ne_i^{(j)}}{\sum_{i=0}^{Пк} t_i b_{e_i}^{(д)} Ne_i^{(д)}}; \quad (2)$$

$$R_{NOx}^{(j)} = \sum_{i=0}^{Пк} \frac{t_i m_{NOx_i}^{(j)} be_i^{(j)} Ne_i^{(j)}}{t_i m_{NOx_i}^{(д)} be_i^{(д)} Ne_i^{(д)}}; \quad (3)$$

$$R_{CO}^{(j)} = \sum_{i=0}^{Пк} \frac{t_i m_{CO_i}^{(j)} be_i^{(j)} Ne_i^{(j)}}{t_i m_{CO_i}^{(д)} be_i^{(д)} Ne_i^{(д)}}; \quad (4)$$

$$R_{H_2O}^{(j)} = \sum_{i=0}^{П_к} \frac{t_i m_{H_2O_i}^{(j)} be_i^{(j)} Ne_i^{(j)}}{t_i m_{H_2O_i}^{(д)} be_i^{(д)} Ne_i^{(д)}}; \quad (5)$$

$$R_C^{(j)} = \sum_{i=0}^{П_к} \frac{t_i m_{C_i}^{(j)} be_i^{(j)} Ne_i^{(j)}}{t_i m_{C_i}^{(д)} be_i^{(д)} Ne_i^{(д)}}; \quad (6)$$

$$R_{CO_2}^{(j)} = \sum_{i=0}^{П_к} \frac{t_i m_{CO_{2i}}^{(j)} be_i^{(j)} Ne_i^{(j)}}{t_i m_{CO_{2i}}^{(д)} be_i^{(д)} Ne_i^{(д)}}. \quad (7)$$

В выражениях (2) – (7) обозначено: $П_к$ – количество позиций контроллера машиниста; t_i – доля времени работы дизеля на *i*-й позиции контроллера машиниста тепловоза; $be_i^{(д)}, be_i^{(j)}$ – удельный расход топлива дизелем на *i*-й позиции контроллера машиниста тепловоза, работающего соответственно на дизельном и на *j*-м смесевом виде топлива, кг/(кВт·ч); $Ne_i^{(д)}, Ne_i^{(j)}$ – агрегатная мощность дизеля на *i*-й позиции контроллера машиниста тепловоза, работающего соответственно на дизельном и на *j*-м смесевом виде топлива, кВт; $m_{NOx_i}^{(д)}$, $m_{NOx_i}^{(j)}$ – соответственно, удельное количество окислов азота на *i*-й позиции контроллера машиниста тепловоза, работающего на дизельном и на *j*-м смесевом виде топлива, кг/(кВт·ч); $m_{CO_i}^{(д)}$, $m_{CO_i}^{(j)}$ – удельное количество оксидов углерода на *i*-й позиции контроллера машиниста тепловоза, работающего соответственно на дизельном и на *j*-м смесевом виде топлива, кг/(кВт·ч); $m_{C_i}^{(д)}$, $m_{C_i}^{(j)}$ – удельное количество углерода на *i*-й позиции контроллера машиниста тепловоза, работающего соответственно на дизельном и на *j*-м смесевом виде топлива, кг/(кВт·ч); $m_{CO_{2i}}^{(д)}$, $m_{CO_{2i}}^{(j)}$ – удельное количество диоксидов углерода на *i*-й позиции контроллера машиниста тепловоза, работающего соответственно на дизельном и на *j*-м смесевом виде топлива, кг/(кВт·ч); $m_{H_2O_i}^{(д)}$, $m_{H_2O_i}^{(j)}$ – удельное количество водяных паров на *i*-й позиции контроллера машиниста тепловоза, работающего соответственно на дизельном и на *j*-м смесевом виде топлива, кг/(кВт·ч).

Представленная методика оценки эффективности использования альтернативных видов топлива или топливных присадок в тепловозных дизелях может быть использована для практики, если имеется возможность оценить параметры топливной экономичности и параметры экологической безопасности дизелей, работающих на стандартном и нестандартном топливе. Этот вопрос особо важен при конвертации серийных двигателей для работы их как на смесевых видах топлива, так и на дизельном топливе. Чаще всего эти вопросы решались и решаются путем создания экспериментальных стендов и проведения опытных испытаний, в течение которых решаются многие практические задачи. Понятно, что это направление, несомненно, необходимо, но оно должно быть заключительным при решении теоретических и практических задач по разработке рабочих циклов дизелей, работающих на нестандартных видах топлива [6].

Реализацию предложенной выше методики покажем на примере тепловозного дизеля типа 2А-5Д49 с эффективной мощностью *Ne* = 2940 кВт, частотой вращения *n* = 1000 мин$^{-1}$ и удельным расходом *be* = 0,210 кг/(кВт·ч).

Полагаем, что при выполнении теоретических расчетов предварительно решены следующие задачи: выбран вид альтернативной добавки, определен угол опережения подачи в цилиндр дизеля дизельного топлива, разработана система дозирования альтернативной горючей смеси, обеспечивающая требуемое среднее индикаторное давление и минимальный удельный расход топлива за рабочий цикл для всех эксплуатационных режимов работы тепловоза.

В рассматриваемом примере в качестве альтернативной добавки к дизельному топливу выбраны

биогаз состава 87 % CH_4 и 13 % CO_2 и природный газ состава 100 % CH_4, для которых разработаны математические модели, позволяющие определить элементарный состав и теплофизические характеристики горючих смесей в зависимости от количества добавки.

При оценке технико-экономической эффективности применения в тепловозных дизелях смесевых видов топлива авторы использовали математические модели, разработанные на кафедре «Локомотивы» ОмГУПСа, предусматривающие

моделирование индикаторной диаграммы рабочего цикла дизеля, расчет индикаторных и эффективных показателей цикла с учетом степени нагружения дизеля (позиции контроллера машиниста) по результатам контрольных испытаний;

расчет эксплуатационных экологических характеристик дизеля по позициям контроллера машиниста с учетом закона и характеристик выгорания различных топливных смесей в камере сгорания.

При выполнении теоретических расчетов для серийных двигателей во всем диапазоне нагрузочных режимов, а именно для дизеля типа 2А-5Д49, целесообразно представить мощностные, скоростные и экономические характеристики в относительных значениях, рассчитанных по паспортным данным:

$$\frac{Ne_i}{Ne_{\text{н}}} = \delta Ne_i = 0,00155\Pi_{\text{к}}^{\,2} + 0,042885\Pi_{\text{к}} + 0,018576; \quad (8)$$

$$\frac{n_{\text{д}i}}{n_{\text{дн}}} = \delta n_{\text{д}i} = -0,001682\Pi_{\text{к}}^{\,2} + 0,063584\Pi_{\text{к}} + 0,388; \quad (9)$$

$$\frac{be_i}{be_{\text{н}}} = \delta be_i = 0.002351\Pi_{\text{к}}^{\,2} - 0,063047\Pi_{\text{к}} + 1,425, \quad (10)$$

где Ne_i, $n_{\text{д}i}$, be_i – соответственно эффективная мощность, частота вращения и удельный расход топлива дизелем на i – й позиции контроллера машиниста; $Ne_{\text{н}}$, $n_{\text{дн}}$, $be_{\text{н}}$ – соответственно эффективная мощность, частота вращения и удельный расход топлива дизелем на номинальном режиме работы. Индексы корреляции для выражений (8) – (10) составляют соответственно 0,987; 1,000 и 0,996.

На основании выражений (8) – (10) при заданных значениях $Ne_{\text{н}}$, $n_{\text{дн}}$ и $be_{\text{н}}$ определяются эффективная мощность, частота вращения коленчатого вала и величина удельного расхода топлива дизелем для частичных режимов работы тепловоза (позиции контроллера машиниста от нулевой до 15-й включительно). Выполненные расчеты позволяют, используя конструктивные параметры дизеля 2А-5Д49 (16 ЧН26/26), определить величину среднего эффективного давления для каждой i-й позиции контроллера машиниста тепловоза по выражению, МПа,

$$Pe_i = 0,565\frac{Ne_i}{n_{\text{д}i}} \quad (11)$$

и соответствующий этому давлению удельный расход топлива в дизельном тепловом эквиваленте, кг/(кВт·ч),

$$be_i = 0,15138Pe_i^2 - 0,5212Pe_i + 0,6463. \quad (12)$$

Для наиболее объективной оценки необходимо оценить величину среднего эффективного давления цикла дизеля, работающего как на дизельном, так и на смесевых видах топлива при одинаковом значении номинальной эффективной мощности энергетической установки, т. е. необходимо определить количество альтернативной добавки к дизельному топливу, если величина его цикловой подачи будет уменьшена на 20 %. Для номинального режима работы при $Ne = 2940$ кВт, $n = 1000$ мин$^{-1}$, $be = 0,210$ кг/(кВт·ч) величина цикловой подачи топлива $b_{\text{ц}}$ составит 0,00136 кг/цикл.

Уменьшение цикловой подачи дизельного топлива на 20 % , т. е. на 0,000257 кг/цикл, приведет к уменьшению общего количества тепла, полученного при сгорании дизельного топлива, на 10,96 кДж/цикл, к снижению эффективной работы цикла и к уменьшению эффективной мощности дизеля. Это снижение необходимо компенсировать добавлением к дизельному топливу какой-либо альтернативной присадки, причем количество этой присадки будет зависеть от теплоты ее сгорания.

По результатам моделирования рабочего цикла дизеля построены аналитические зависимости изменения среднего эффективного давления цикла и удельного расхода топлива дизелем от количества альтернативной добавки. Расчеты выполнены для номинального режима работы дизеля и теплоты сгорания топливной смеси, соответствующей теплоте сгорания дизельного топлива ($H_u = 42609$ кДж/кг) (рисунок 2).

Так, для природного газа состава 100 % CH_4 имеем

$$Pe = 3{,}189 \cdot 10^{-3} d^2 - 7{,}9371 \cdot 10^{-2} d + 1{,}335229, \qquad (13)$$

для биогаза состава 87% CH_4 и 13 % CO_2 –

$$Pe = 3{,}186 \cdot 10^{-3} d^2 - 8{,}3894 \cdot 10^{-2} d + 1{,}335. \qquad (14)$$

Выражения (13), (14) позволили установить, что при изменении цикловой подачи дизельного топлива на 20 % для достижения нормативных значений агрегатной мощности дизеля 2А-5Д49 при его работе на смесевых видах топлива необходимо дополнительно использовать либо 25,4 % природного газа, теплота сгорания которого $H_u = 35615$ кДж/кг, либо 27,05 % биогаза состава 87 % CH_4 и 13 % CO_2 с теплотой сгорания $H_u = 23260$ кДж/кг.

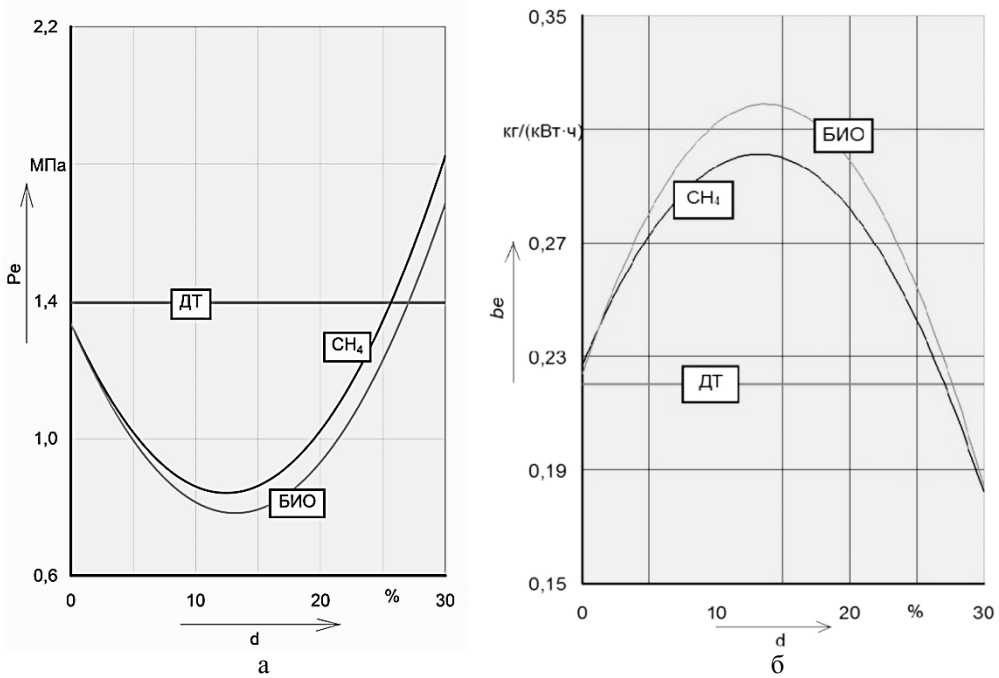


Рисунок 2 – Зависимость среднего эффективного давления рабочего цикла и удельного расхода топлива дизелем на номинальном режиме работы от изменения доли альтернативной добавки к стандартному дизельному топливу

При снижении величины цикловой подачи дизельного топлива на 0,000257 кг/цикл для реализации паспортного значения мощности дизеля для номинального режима работы потребуется дополнительный расход природного газа в количестве 0,000308 кг/цикл или дополнительный расход биогаза в количестве 0,000471 кг/цикл.

Аналогичные расчеты, выполненные для промежуточных, частичных, режимов нагрузки дизеля, позволили построить следующие аналитические зависимости для различных топливных смесей.

Для смеси дизельного топлива и природного газа:

для 1-й позиции – $Pe = 8{,}29 \cdot 10^{-4} d^2 - 1{,}6491 \cdot 10^{-2} d + 0{,}352;$ (15)

для 6-й позиции – $Pe = 1{,}526 \cdot 10^{-3} d^2 - 3{,}6674 \cdot 10^{-2} d + 0{,}784;$ (16)

для 10-й позиции – $Pe = 2{,}311 \cdot 10^{-3} d^2 - 5{,}7169 \cdot 10^{-2} d + 1{,}062;$ (17)

Для смеси дизельного топлива и биогаза:

для 1-й позиции – $Pe = 8{,}89 \cdot 10^{-4} d^2 - 1{,}9751 \cdot 10^{-2} d + 0{,}352;$ (18)

для 6-й позиции – $Pe = 1{,}497 \cdot 10^{-3} d^2 - 3{,}9423 \cdot 10^{-2} d + 0{,}783;$ (19)

для 10-й позиции – $Pe = 2{,}24 \cdot 10^{-3} d^2 - 6{,}008 \cdot 10^{-2} d + 1{,}064.$ (20)

Выражения (13) – (20) позволили установить количество альтернативной добавки к дизельному топливу в случае, если его цикловая подача будет уменьшена на 20 % для всех позиций контроллера машиниста, что стало основой для предложения закона регулирования количества альтернативной добавки по режимам работы дизеля или по позициям контроллера машиниста.

Так, для топливной смеси состава ДТ+CH_4

$$d = -4{,}289 \cdot 10^{-2} П_к^{\,2} + 0{,}989 П_к + 20{,}147, \quad (21)$$

а для топливной смеси состава ДТ+БИО –

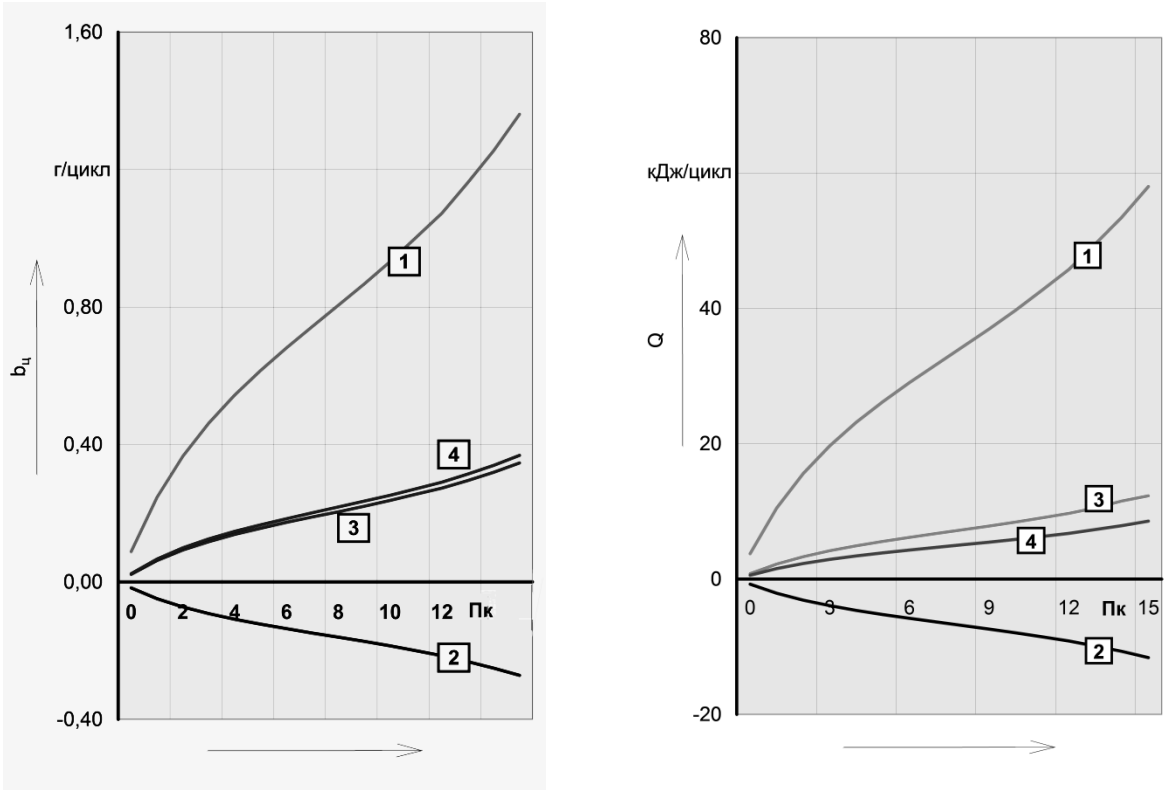
$$d = 4{,}8333 \cdot 10^{-2} П_к^{\,2} + 1{,}036 П_к + 22{,}291. \quad (22)$$

На рисунке 3 представлены качественные зависимости, характеризующие величину циклового расхода дизельного топлива и теплоты сгорания по позициям контроллера машиниста при изменении цикловой подачи дизельного топлива на 20 %. Величина дополнительной добавки альтернативной присадки по позициям контроллера машиниста, предназначенной для компенсации потери мощности при уменьшении подачи дизельного топлива, принята соответственно 25,4 % для природного газа и 27,05 % для биогаза принятого элементарного состава.

Зависимости, представленные на рисунке 3, позволяют рассчитать стоимость единицы работы, полученной при сгорании различных видов углеводородного топлива в цилиндре дизеля 2А-5Д49. При использовании дизельного топлива среднего элементарного состава по ГОСТ 305-82 с теплотой сгорания Hu = 42609 кДж/кг и стоимостью $Ц_т$ = 28200 р./т стоимость единицы работы составит 0,000662 р./кДж.

При использовании топливной смеси, состоящей из дизельного топлива и природного газа с теплотой сгорания Hu = 35615 кДж/кг, плотностью $\rho_{пр.газ}$= 0,88 кг/м^3, стоимостью $Ц_{Сн4}$ = 3302 р./1000 м^3 стоимость единицы работы составит 0,000571 р./кДж.

Оценить эффективность использования смеси дизельного топлива с биогазом в экономическом отношении довольно сложно, так как определяющим в этом случае является стоимость биогаза. В настоящее время понятие «стоимость биогаза» – это ноу хау фирм производителей, поэтому расчеты подготовлены по осредненным данным различных иностранных источников. Известно, что стоимость биогаза ориентировочно может быть определена в размере от 0,4 до 0,5 евро за 1 л в бензиновом тепловом эквиваленте, или (1 евро = 40,2713 р.) 18,122 р./л. Тогда стоимость единицы работы с учетом теплоты сгорания биогаза Hu = = 23260 кДж/кг, плотности $\rho_{БИО}$ = 1,16 – 1,27 кг/м^3 составит 0,000684 р./кДж.



а б

Рисунок 3 – Зависимость циклового расхода и теплоты сгорания топлива при работе дизеля 2А-5Д49 на смесевых углеводородных видах топлива

Экологические характеристики, т. е. количество вредных выбросов и количество парниковых газов в отработавших газах дизельных двигателей, работающих на различных смесевых углеводородных видах топлива, определены по условию равновесного состава. По условиям равновесного состава рассчитывается 36 различных элементов в продуктах сгорания углеводородных видов топлива. Расчет выполняется для каждого момента выгорания топлива с учетом состава горючей смеси, вида и параметров закона выгорания топлива, текущего объема, температуры и давления рабочего тела [7]. Изменение в продуктах сгорания количества парниковых газов для каждого режима работы дизеля может быть вызвано изменением элементарного состава горючей смеси, которая, несомненно, будет отлична от состава горючей смеси при использовании топлива среднего элементарного состава по ГОСТ 305-82.

Так, для дизеля 2А-5Д49 с учетом *j*-го вида смесевого топлива и позиции контроллера машиниста некоторые экологические характеристики могут быть определены по соответствующим выражениям.

Для дизельного топлива, г/(кВт·ч):

удельное количество оксидов азота – $m_{NO_x} = -0,012П_к^2 + 0,349П_к + 0,370$;

удельное количество оксида углерода – $m_{CO} = (415,874\exp(0,297П_к)\cdot 10^{-7}$;

удельное количество углерода (сажи), кг/ч, – $m_C = 0,002П_к^2 - 0,058П_к + 0,572$;

удельное количество паров воды – $m_{H_2O} = 0,0874П_к^2 - 2,719П_к + 36,38$;

удельное количество диоксида углерода – $m_{CO_2} = 0,232П_к^2 - 6,927П_к + 92,694$;

для смеси дизельного топлива и биогаза, г/(кВт·ч):

удельное количество оксидов азота – $m_{NO_x} = -0,000876П_к^2 + 0,008871П_к + 0,830$;

удельное количество оксида углерода – $m_{CO} = (70,219\exp(0,323П_к)\cdot 10^{-9}$, кг/ч;

удельное количество углерода (сажи), кг/ч, – $m_C = 0,00149П_к^2 - 0,0426П_к + 0,433$;

удельное количество паров воды – $m_{H_2O} = 0,937П_к^2 - 17,783П_к + 111,902$;

удельное количество диоксида углерода – $m_{CO_2} = 0,199П_к^2 - 6,66П_к + 124,09$;

для смеси дизельного топлива и природного газа, г/(кВт·ч):

удельное количество оксидов азота – $m_{NO_x} = 0,00289П_к^2 - 0,0671П_к + 1,204$;

удельное количество оксида углерода, кг/ч, – $m_{CO} = (17,437\exp(0,293П_к)\cdot 10^{-8}$;

удельное количество углерода (сажи), кг/ч, – $m_C = 0,00194П_к^2 - 0,0545П_к + 0,525$;

удельное количество паров воды – $m_{H_2O} = -0,155П_к^2 + 5,56П_к + 3,537$;

удельное количество диоксида углерода – $m_{CO_2} = 0,476П_к^2 - 11,959П_к + 108,39$.

Согласно действующим нормативам локомотивное депо обязано выполнять отчисления на охрану окружающей среды по фактическим выбросам: 52 р. за 1 т выбросов оксидов азота; 0,6 р. за 1 т выбросов окиси углерода и 41 р. за 1 т сажи. Если фактическая величина вредных выбросов в отработавших газах дизеля неизвестна, то пользуются обобщенным показателем, равным 2,5 р. на 1 т сожженного дизельного топлива.

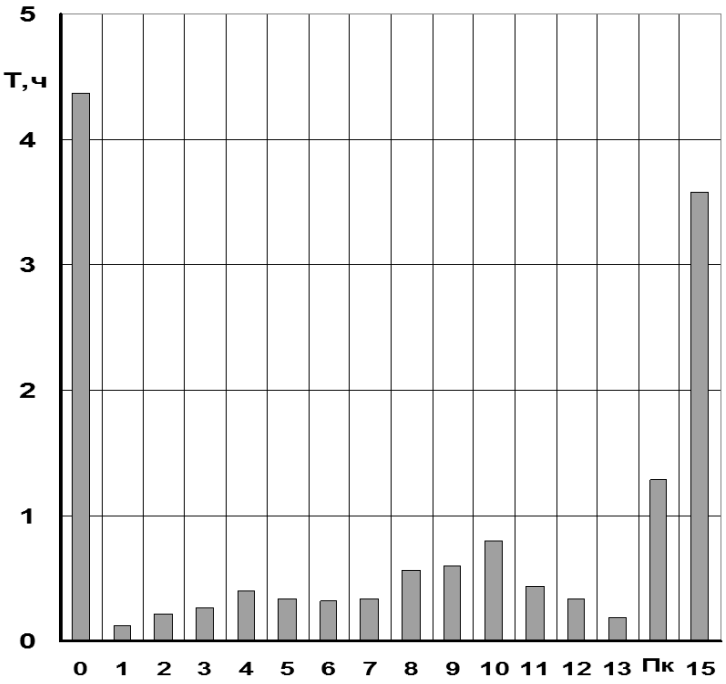


Рисунок 4 – Режимы работы тепловоза ТЭ70 на выбранном участке обращения

Очевидно, что для решения задачи оценки технико-экономической эффективности применения смесевых видов топлива в транспортных двигателях большой мощности с переменным эксплуатационным режимом работы целесообразно использовать метод комплексной оценки эффективности на основе критерия, учитывающего эксплуатационный расход и финансовые затраты на топливо и суммарное количество выбросов нормируемых токсичных компонентов в отработавших газах и финансовые затраты на охрану окружающей среды [8].

Величина этого критерия для тепловозных энергетических установок должна быть определена с учетом среднеэксплуатационных режимов работы локомотива. Предположим, что тепловоз серии ТЭ70 с поездом расчетной массы на выбранном участке эксплуатации работает 14,2 ч в условиях одной поездки в четном или нечетном направлении. Время работы тепловоза по позициям контроллера машиниста распределилось в соответствии с диаграммой, приведенной на рисунке 4. С учетом сформированных режимов нагрузки среднеэксплуатационный удельный расход топлива дизелем тепловоза при использовании различных углеводородных видов топлива может быть определен с использованием зависимости:

$$be_{\text{ср}} = \sum_{i=0}^{n} (G_{\text{т}i} K_i) / \sum_{i=0}^{n} Ne_i K_i \,, \qquad (23)$$

где n – количество позиций контроллера машиниста;

Ne_i, G_{ti}, K_i – соответственно, эффективная мощность, часовой расход топлива и время работы энергетической установки на i-й позиции контроллера машиниста

Экономические и экологические параметры работы дизеля тепловоза ТЭ70 на различных смесевых углеводородных видах топлива в условиях поездной работы представлены в таблице. Полагаем, что предложенную в настоящей работе методику можно использовать и при оценке эффективности применения топливных присадок, совершенствования конструкции узлов и вспомогательных систем дизеля и тепловоза.

Анализ данных, представленных в таблице, позволяет однозначно заключить, что использование смесевых углеводородных видов топлива позволит

снизить себестоимость перевозочного процесса за счет уменьшения стоимости топливной смеси. В приведенном примере показано, что использование в качестве альтернативной добавки природного газа уменьшит расходы на топливо примерно на 16 %, а применение биогаза может увеличить затраты на 3 % при заданной его себестоимости;

значительно улучшить эксплуатационные экологические характеристики тепловозного дизеля за счет уменьшения количества вредных выбросов в отработавших газах. Так, применение природного газа снижает количество NO_x в 3,4, CO в 5,8 и C в 1,6 раза. Применение биогаза снижает количество NO_x в 3,6, CO в 8,9 и C в 2,3 раза;

уменьшить суммарное количество парниковых газов (CO_2 + H_2O) в продуктах сгорания смесевых видов топлива. Так применение смеси ДТ и природного газа снижает количество парниковых газов в 1,4 раза и смеси ДТ и биогаза в 1,6 раза.

Обобщенные сравнительные характеристики результатов эксплуатации тепловозов на различных смесевых углеводородных видах топлива

Наименование параметра	Значения параметра для топливной смеси		
	ДТ	ДТ+CH_4	ДТ+БИО
Время работы тепловоза, ч	14,2	14,2	14,2
Суммарный расход топлива за поездку, кг	4052,76	3728,61	3650,62
Суммарная работа ДГУ за поездку, кВт·ч	18397,27	18397,27	18397,27
Суммарные расходы за поездку, р.	**43844**	**37817**	**45301**
Количество паров H_2O в отработавших газах, кг	310,27	217,41	196,74
Количество диоксида углерода CO_2 в отработавших газах, кг	790,84	554,12	501,48
Количество оксида углерода CO в отработавших газах, кг	7,93E-4	1,36E-04	8,97E-05
Суммарные расходы за выбросы CO за поездку, р.	**$4{,}8\cdot10^{-7}$**	**$8{,}2\cdot10^{-8}$**	**$5{,}4\cdot10^{-8}$**
Количество оксидов азота NO_X в отработавших газах, кг	18,043	5,289	5,061
Суммарные расходы за выбросы NO_X за поездку, р.	**0,938**	**0,275**	**0,263**
Количество углерода C в отработавших газах, кг	3,410	2,145	1,656
Суммарные расходы за выбросы C за поездку, р.	**0,140**	**0,088**	**0,068**
Всего расходов, р.	**43845,1**	**37817,4**	**45301,3**

Список литературы

1. Охрана окружающей среды: Модели социально-экономического прогноза [Текст] / Д. П. Аниашвили, Л. А. Барский и др. – М.: Экономика, 1982. – 224 с.

2. Сковородников, Е. И. Анализ качества функционирования системы экологического мониторинга дизельного подвижного состава в условиях эксплуатации [Текст] / Е. И. Сковородников, М. В. Тарута, Ю. Б. Гришина // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – № 2 (2). – С. 42 – 48.

3. Балясников, И. А. Экологически эффективный способ переработки органических отходов [Текст] //Актуальные проблемы экологии на рубеже третьего тысячелетия и пути их

решения: Междунар. науч.-практ. конф. / И. А. Балясников, М. Ю. Мишланов, А. Н. Шлема / Брянская гос. с.-х. акад. – Брянск, 1999. – С.112 – 115.

4. Фофанов, Г. А. Альтернативные виды топлива на подвижном составе железнодорожного транспорта [Текст] / Г. А. Фофанов, Д. Н. Григорович, А. С. Нестрахов // Труды ВНИИЖТа. – М.: Интекст, 2008. – 144 с.

5. Сковородников, Е. И. Методика определения физико-химических характеристик топливных смесей различного элементарного состава [Текст] / Е. И. Сковородников, А. С. Анисимов, Ю. Б. Гришина // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2011. – № 4 (8). – С. 33 – 41.

6. Сковородников, Е. И. Оценка влияния снижения давления наддува на выходные параметры работы тепловозного дизеля [Текст] / Е. И. Сковородников, А. С. Анисимов, Ю. Б. Гришина // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2012. – № 1 (9). – С. 39 – 42.

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

8. Методы оценки технического состояния, эксплуатационной экономичности и экологической безопасности дизельных локомотивов: Монография [Текст] / Под ред. А. И. Володина. – М.: Желдориздат, 2007. – 264 с.

УДК 621.31

Е. А. Третьяков, А. В. Краузе, В. А. Ткач

ПОГЛОЩЕНИЕ ИЗБЫТОЧНОЙ ЗАРЯДНОЙ МОЩНОСТИ В ПРОТЯЖЕННЫХ МАЛОНАГРУЖЕННЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ 110 кВ

В данной работе рассмотрена возможность применения управляемых шунтирующих реакторов (УШР) для поглощения избыточной зарядной мощности в протяженных малонагруженных линиях электропередач 110 кВ северных электрических сетей филиала ОАО «МРСК Сибири» – «Омскэнерго». Возникновение избытков реактивной мощности приводит к возрастанию напряжения в узлах энергосистемы и появлению значительных потерь мощности. Обосновано применение УШР, выполнен расчет их необходимой мощности, определено место установки, произведена предварительная технико-экономическая оценка.

Регулирование уровней напряжения и реактивной мощности в электрических сетях представляет собой одну из важнейших задач. Режим напряжения электрических сетей во многом определяет надежность работы как самого энергообъединения, так и электроснабжения отдельных потребителей. Кроме того, поддержание оптимальных уровней напряжения на шинах подстанций обеспечивает минимизацию потерь активной мощности в электрических сетях и тем самым повышает эффективность функционирования электрических сетей [1].

Расчет установившегося режима 110 кВ филиала ОАО «МРСК Сибири» – «Омскэнерго» (рисунок 1, таблица 1) свидетельствует о том, что режим не может быть реализован за счет повышенного уровня напряжения из-за значительных перетоков емкостной мощности.

Таблица 1 – Результаты расчета и анализа электрических режимов электрических сетей (Rastr)

№ п/п	Линия	Мощность, минимум, МВ·А (лето 3^{00})	Напряжение, кВ	Отклонение, %
1	2	3	4	5
1	Тевриз –	2,4-j4,7	131,61	-13,86
2	Бакшеево		131,42	-13,51
3	Бакшеево –	2,7-j6,4		
4	Шухово		131,02	-13,04
5	Шухово –	2,8-j7,4		

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5
6	Знаменка		130,63	-12,64
7	Знаменка –	5,3-j12,5		
8	Тара		129,14	-11,87
9	……	…	…	
10	Шипицыно –	7,0-j10,0 | 9,7- j15,2	127,21	-10,31
11	Большеречье		127,44	-10,55
12	Карташово 2Т –	2,7-j5,2	127,34	-10,41
13	Большеречье		127,44	-10,55
14	……	….	…	
15	Щербаки –	8,2-j13,7	126,66	-9,45
16	Саргатская		125,24	-8,43
17	Свердлово –	8,2-j12,7	125,90	-9,03
18	Саргатская		125,24	-8,43
19	Баженово –	1,8-j1,7	125,38	-8,58
20	Саргатская		125,24	-8,43

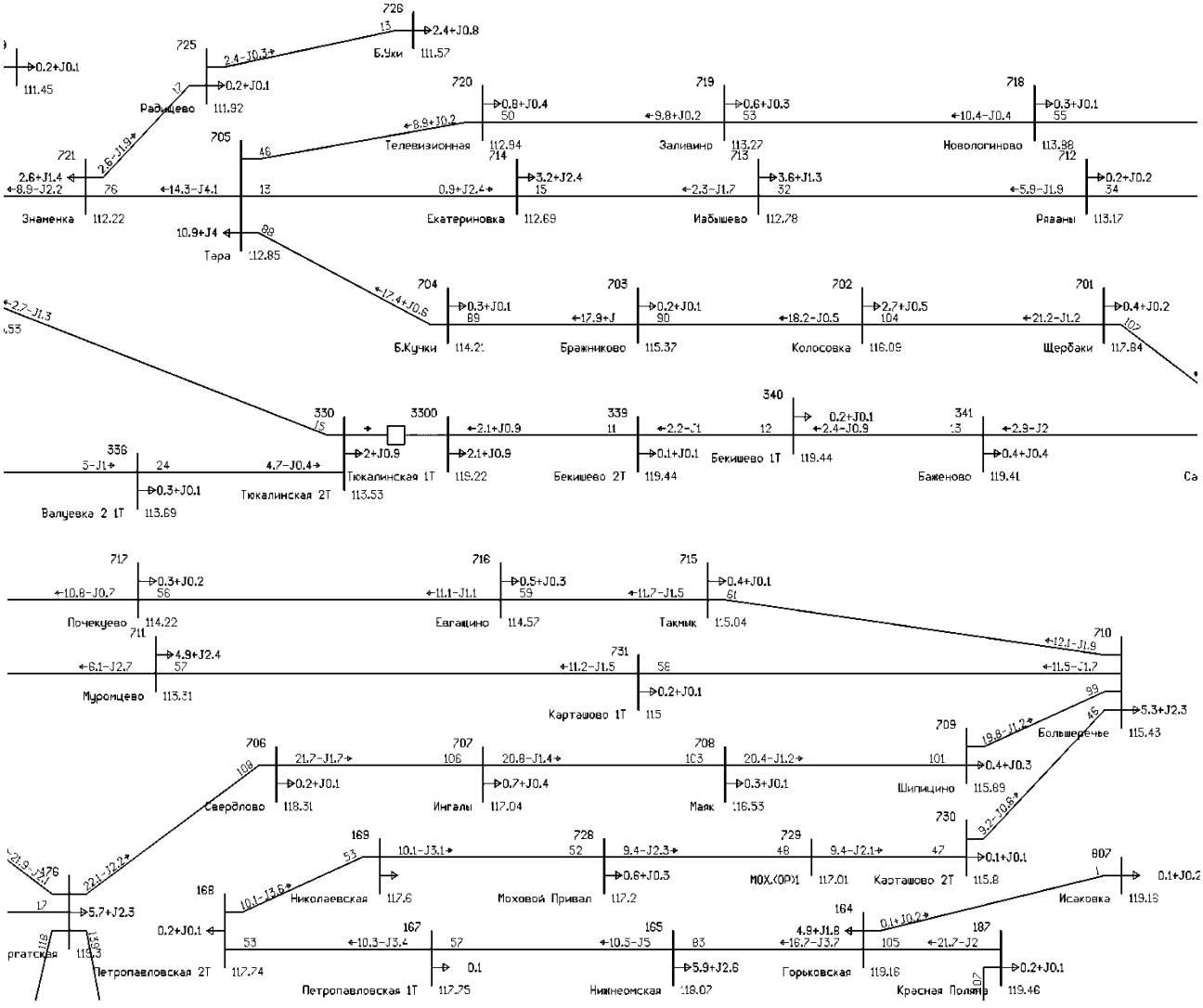


Рисунок 1 – Фрагмент электрической сети 110 кВ с результатами расчета установившегося режима в режиме минимальных нагрузок

Некомпенсированные зарядные мощности по сечениям подстанций составляют (в минимальном режиме), Мвар: Тара – 12,5; Большеречье – 15,2 (2,7 Мвар за вычетом перетоков от Тары и нагрузки); Саргатская – 28,1 (около 8,0 Мвар за вычетом перетоков). Суммарная некомпенсированная зарядная мощность линии 110 кВ рассматриваемого участка составляет около 23,2 Мвар.

Таким образом, наибольшая некомпенсированная реактивная мощность (емкостная) со стороны линий 110 кВ наблюдается на подстанции Тара, что подтверждается соответствующим уровнем напряжения, зависящим от баланса реактивной мощности в узле.

В максимальном режиме также наблюдаются активно-емкостные потоки мощности по линиям. Напряжение при этом находится в допустимых пределах.

Двунаправленная передача активной и емкостной мощности существенно увеличивает потери в ней, усложняет заложенные в систему электроснабжения механизмы регулирования напряжения. Серьезные проблемы возникают и на этапе генерации мощности на ТЭЦ при активно-емкостной нагрузке. Основная причина подобных явлений – низкая загрузка протяженных линий высокого напряжения.

Решение задачи обеспечения нормальных режимов работы электрической сети 110 кВ и требуемых стандартов качества и надежности электроэнергии невозможно без управляемых средств регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности.

Неотъемлемыми элементами электропередач нового поколения являются устройства регулирования, относящиеся к категории FACTS. Классификация устройств FACTS представлена на рисунке 2, ориентировочные стоимостные показатели (на 2009 г.) – на рисунке 3 [2].

На рисунках 2 и 3 приняты условные обозначения: ШР – шунтирующий реактор; УШР – управляемый шунтирующий реактор с подмагничиванием постоянным током; ВРГ – реакторные группы, коммутируемые выключатели; УУПК (ТУПК) – управляемые устройства продольной компенсации; БК – батарея статических конденсаторов; СК – синхронные компенсаторы; СТК – статические тиристорные компенсаторы; АСК – асинхронизированные компенсаторы; ОРПМ – объединенные регуляторы потока мощности; СТАТКОМ – статический компенсатор реактивной мощности на базе преобразователя напряжения; ФРТ – фазорегулирующие трансформаторы.

Рисунок 2 – Классификация устройств FACTS

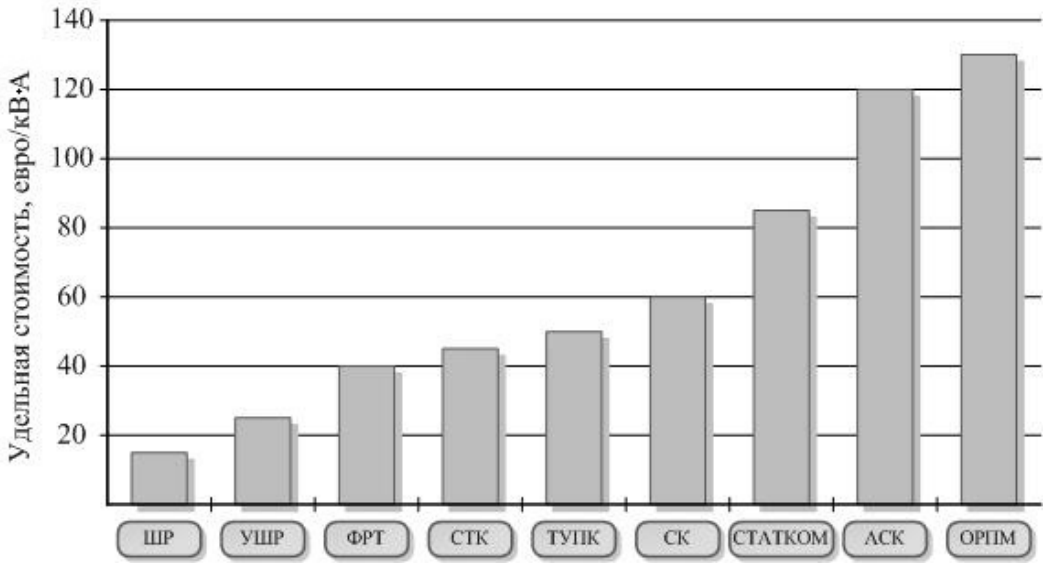


Рисунок 3 – Стоимостные показатели компенсирующих и управляющих устройств типа FACTS

Выбор типов устройств FACTS для высоковольтной линии (ВЛ) 110 кВ определяется той ролью, которая на них возлагается [3]:

компенсация зарядной мощности и стабилизация напряжения малонагруженных длинных линий;

повышение пропускной способности линии с плавным регулированием напряжения;

повышение статической и динамической устойчивости электроэнергетической системы.

Наиболее перспективными устройствами FACTS для рассматриваемой задачи являются управляемые шунтирующие реакторы. Накоплен успешный (до восьми лет) опыт эксплуатации шести управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов в высоковольтных сетях (четыре трехфазных реактора мощностью 25 МВ·А 110 кВ типа РТУ-25000/110, трехфазный реактор мощностью 100 МВ·А 220 кВ типа РТУ-100000/220 и трехфазный реактор мощностью 180 МВ·А 330 кВ типа РТУ-180000/330).

Попытки обоснования применения устройства продольной компенсации (УПК) в сетях низкого напряжения (НН) понизительного трансформатора предпринимались только для промышленных сетей с резкопеременными нагрузками [4]. Последовательное включение конденсаторных батарей (КБ) позволяет достигнуть уменьшения суммарного индуктивного сопротивления, ведущего к снижению потерь напряжения в цепи питания. УПК характеризуется параметрическим свойством регулирования напряжения, т. е. создают переменную добавку напряжения, зависящую от нагрузки. Кроме того, для обеспечения бесперебойного питания и защиты КБ от протекающих токов аварийных режимов в УПК применяют разрядники и нелинейные ограничители перенапряжения различной конструкции, дорогостоящую коммутационную аппаратуру [2].

Эксплуатация четырех управляемых реакторов типа РТУ-25000/110 и реакторов типа РТУ-100000/220 и РТУ-180000/330 показала их высокую эффективность. Выполнение указанными реакторами основных функций – автоматическое регулирование своей мощности и поддержание напряжения сети на заданном уровне – приводит к существенному облегчению работы высоковольтного оборудования подстанций, в том числе к резкому (на порядок) снижению числа переключений устройств РПН трансформаторов, к существенному улучшению электроснабжения потребителей. Например, эксплуатация трех реакторов типа РТУ-25000/110 на подстанциях Сибири привела к резкому снижению аварийных отключений нефтедобывающего оборудования.

Таким образом, применительно к рассматриваемым сетям 110 кВ предлагается проанализировать варианты применения неуправляемых и управляемых шунтирующих реакторов.

Суммарная мощность шунтирующего реактора (ШР) должна быть распределена по подстанциям исходя из компенсации зарядной мощности половины длины примыкающих к подстанции линий с учетом потребления реактивной мощности местной нагрузкой и с учетом ограничений по реактивной мощности генераторов электростанции, работающей на данные линии.

Суммарная мощность ШР, установленных в сети, должна на 25 % превосходить зарядную мощность линий, что учитывает возможное расширение сети, а также целесообразность работы с перекомпенсацией. ШР желательно устанавливать на узловых подстанциях.

Использование сухих ШР является оптимальным средством для снижения передачи реактивной мощности по линии и связанных с ней потерь энергии в режимах малых спокойных нагрузок (рисунок 4).

Процесс выбора технических средств регулирования реактивной мощности, напряжения современных силовых электроустановок при их модернизации должен сопровождаться обширными экспериментальными исследованиями с помощью цифровых средств измерений и диагностирования. Применительно к поставленной задаче выполним оценочный расчет.

Рисунок 4 – Общий вид ШР

Выбор типа, мощности, других параметров, размещения и способа присоединения ШР в электрических сетях 110 – 750 кВ должен основываться на расчетах характерных режимов энергосистем (зимний и летний максимумы и минимумы нагрузки), анализе уровней напряжений в суточном графике в нормальных и ремонтных схемах энергосистем, а также, при необходимости, переходных процессов. Место установки управляемых ШР должно выбираться на основе технико-экономических расчетов.

Так как суммарная мощность реакторных групп и параллельно включенной нагрузки не должна превышать номинальной мощности трансформатора, то при рассмотрении вариантов размещения ШР на подстанциях Тара, Большеречье, Саргатское их максимальная мощность должна быть ограничена значениями 16 (32) Мвар.

Для стабилизации параметров режима по напряжению достаточно установить ШР на подстанции Тара мощностью 16 – 25 Мвар к шинам 110 кВ.

Минимальный ряд номиналов мощностей подобных устройств начинается с 33333 Мвар (реактор типа РОД-33333/110У1, РОМБС-33333/110У1 ОАО ХК «Электрозавод»), что является неприемлемым, так как суммарная некомпенсированная зарядная мощность линии 110 кВ рассматриваемого участка составляет около 23,2 Мвар, в том числе Тара – 12,5 Мвар.

В программе RASTR было проведено моделирование режимов работы источников реактивной мощности на базе шунтирующего реактора на подстанции Тара для следующих случаев (таблица 2): реактор отключен (исходный режим) и реактор включен в минимальных и максимальных режимах.

Таблица 2 – Результаты расчета нагрузочных потерь мощности в линии 110 кВ

Режим	Без ШР и УШР	УШР – 25 Мвар, подстанция Тара (на полную мощность)	ШР – 33,33 Мвар, подстанция Тара
	потери, МВт		
Минимальный	0,95	0,37	0,66
Максимальный	2,67	4,64 (1,9)*	6,73

Примечание: так как нагрузка отходящей линии по подстанции Тара в максимальном режиме составляет 14,3 – j4,1 МВ·А, то использование УШР в управляемом режиме позволит снижать потери мощности круглый год (в отличие от ШР).

На основе полученных результатов моделирования был сделан вывод о том, что для компенсации реактивной мощности на подстанции и стабилизации напряжения в режиме минимальных нагрузок необходимо установить ШР мощностью 17,5 – 25 Мвар на подстан-

ции Тара. В часы максимальных нагрузок ШР должен быть выведен из работы. Как уже говорилось, у ШР таких номиналов не существует.

Рассмотрим второй вариант – вариант с УШР (см. таблицу 2). Управляемый шунтирующий реактор – это переменное индуктивное сопротивление, плавно регулируемое подмагничиванием ферромагнитных элементов магнитной цепи. Производителями оборудования, входящего в состав управляемых реакторов, являются ОАО «Запорожтрансформатор» (электромагнитные части реакторов) и ОАО «Энергия-Т» (преобразователь, система управления).

Основные функциональные возможности УШР серии РТУ заключаются в следующем:

компенсация избыточной зарядной мощности линий электропередач осуществляется реактором в автоматизированном режиме путем задания оператором в системе управления требуемой уставки по индуктивности электромагнитной части реактора;

стабилизация напряжения на шинах подстанции или линии осуществляется в автоматическом режиме путем плавного изменения потребляемой мощности электромагнитной частью реактора в соответствии с сигналом рассогласования, вырабатываемого системой управления. Потребляемый ток электромагнитной части реактора изменяется в результате подмагничивания его магнитной системы постоянным током, вырабатываемым тиристорным преобразователем, встроенным в трансформатор. При увеличении напряжения сети на (0,5÷5)% от заданного значения уставки потребляемая мощность реактора плавно меняется от холостого хода до номинальной мощности.

В каждом из управляемых реакторов серии РТУ значение потребляемой мощности регулируется автоматически или с помощью оператора в диапазоне от 0,01 до 1,2 – 1,3 номинальной с неограниченным ресурсом возможных изменений, поэтому в автоматическом режиме работы УШР 25 потери будут существенно ниже значений, представленных для расчетных режимов (см. таблицу 2, рисунок 5).

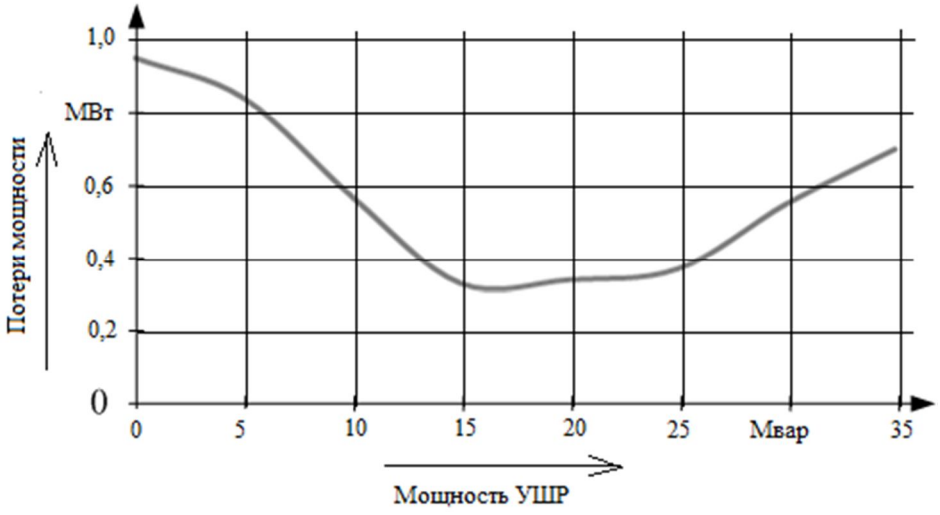


Рисунок 5 – Зависимость потерь мощности в сети от изменения реактивной мощности (УШР) на подстанции Тара в минимальном режиме

На серию реакторов РТУ (рисунок 6, таблица 3) в установленном порядке введены в действие ТУ 3411-001-53950285-2004 «Реакторы управляемые трехфазные масляные типа РТУ мощностью от 32000 до 180000 кВ·А классов напряжения 110, 220, 330 и 500 кВ».

Математически выбор места расположения УШР определяется по максимальным значениям критерия (среди подстанций Тара, Большеречье, Саргатская): $\delta U / \delta Q$ – критериальное соотношение, которое показывает степень изменения напряжения на подстанциях системы при изменении мощности реактора на 1 о. е. [5].

В соответствии с данными таблицы 1 было получено, что наиболее чувствительным по напряжению местом при изменении подключаемой индуктивности (реактор) является подстанция Тара.

Согласно утверждению источника [6] основными составляющими эффекта от внедрения УШР применительно к рассматриваемому случаю являются повышение качества электрической энергии и нормализация параметров режима работы.

Рисунок 6 – Шунтирующий реактор, управляемый подмагничиванием, типа РТУ-25000/110

Таблица 3 – Основные технические параметры управляемого подмагничиванием шунтирующего реактора РТУ-25000/110

Параметр	Значение параметра
Номинальная мощность, кВ·А	25000
Номинальное напряжение, кВ	121
Диапазон изменения мощности, кВ·А	250-25000
Номинальный ток фазы сетевой обмотки, А	114
Максимальная скорость изменения мощности, кВ·А/с	20000
Максимальное значение любой из высших гармоник в токе фазы, А	≤ 5
Потери холостого хода, кВт	≤ 25
Потери короткого замыкания, кВт	≤ 175
Средний уровень шума в любом режиме, дБ·А	≤ 85
Номинальная мощность трансформатора подмагничивания, кВ·А	160
Диапазон уставки по напряжению, кВ	105 – 125

В электрических сетях технический эффект от повышения качества электроэнергии может выражаться в снижении потерь мощности в электросетевом оборудовании и в уменьшении расхода электроэнергии на собственные нужды подстанций. Кроме этого можно ожидать снижения вероятности перегрузки и перевозбуждения автотрансформаторов связи электрических сетей разных классов напряжения, которые могут возникать при значительных отклонениях параметров режима от нормативных значений.

Нормализация параметров режимов работы сетей обеспечивает стабилизацию напряжения на сетевом оборудовании и оборудовании подстанций, облегчение режимов работы турбогенераторов по реактивной мощности, разгрузку от реактивной мощности линий электропередач и сетевых трансформаторов и может иметь своими последствиями снижение темпов износа оборудования, потока отказов оборудования с соответствующим уменьшением числа технологических нарушений и активных потерь в линиях электропередач и сетевых трансформаторах.

Установка УШР РТУ-25000/110 (стоимость работ – 35 млн р.) позволит получить годовой технический эффект в виде снижения потерь не менее 5,1 млн кВт·ч (0,58 МВт·8760 ч), что при тарифе электроэнергии (110 кВ) в 1,148 р. / кВт·ч составит 5,85 млн р. в год. Простой срок окупаемости составляет около шести лет только за счет снижения потерь без учета других эффектов.

Список литературы

1. Авилов, В. Д. Целевой энергетический мониторинг эффективности использования ТЭР структурными подразделениями железных дорог [Текст] / В. Д. Авилов, Е. А. Третьяков, А. Г. Звягинцев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2012. - № 1 (9). – С. 59 – 69.
2. Третьяков, Е. А. Разработка продольно-параллельных фильтр-устройств для управления входными сопротивлениями элементов питающей сети в частотной области [Текст] / Е. А. Третьяков, А. В. Краузе // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2012.
3. Кондратьев, Ю. В. Совершенствование методов расчета параметров и выбора мест установки устройств продольной и поперечной компенсации реактивной мощности в условиях применения рекуперативного торможения и протекания уравнительных токов [Текст] / Ю. В. Кондратьев, С. Я. Привалов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – № 4 (4). – С. 63 – 67.
4. Третьяков, Е. А. Оптимизация структуры компенсирующих устройств [Текст] / Е. А. Третьяков, Н. Н. Малышева, А. В. Краузе // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. - № 4 (4). – С. 85 – 94.
5. Третьяков, Е. А. Оптимизация качества и потерь электрической энергии в электрических сетях нетяговых потребителей [Текст] / Е. А. Третьяков // Транспорт Российской Федерации. – Санкт-Петербург, 2011. – № 3 (34). – С. 50 – 54.
6. Манусов, В. З. Исследование методов снижения несимметрии загрузки трехфазной сети на тяговых подстанциях скоростных железных дорог переменного тока [Текст] / В. З. Манусов, В. П. Морозов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2012. – № 2 (10). – С. 87 – 93.

УДК 621.331:621.311

В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В статье изложен порядок составления программ энергосбережения в хозяйстве электрификации и электроснабжения. Приведен перечень основных мероприятий, направленных на снижение потерь электроэнергии в тяговой сети и оборудовании тяговых подстанций, а также на повышение пропускной способности участков железных дорог. Представлены результаты исследований по оценке потенциала повышения энергоэффективности системы тягового электроснабжения железных дорог.

Снижение энергоемкости перевозочного процесса является одним из ключевых условий обеспечения конкурентоспособности железнодорожного транспорта. В условиях снижения темпов роста объема перевозочной работы добиться снижения энергоемкости можно только за счет реализации организационно-технических мероприятий (ОТМ), направленных на снижение потребления энергоресурсов на тягу поездов. Так как 85 % перевозочной работы на сети железных дорог Российской Федерации выполняется на электротяге, поиск путей повышения эффективности использования электрической энергии на тягу поездов как основного вида деятельности ОАО «Российские железные дороги» можно считать приоритетным.

В 2011 – 2012 гг. в ходе реализации федерального законодательства в ОАО «Российские железные дороги» выполнялось энергетическое обследование, непосредственное участие в организации и проведении которого в части электротяги принимали специалисты Омского

государственного университета путей сообщения [1, 2]. При этом рассматривались три направления повышения эффективности использования электроэнергии на тягу поездов: в системе тягового электроснабжения, на пассажирском и грузовом электроподвижном составе, на мотор-вагонном подвижном составе [3, 4]. Особенности и результаты обследования электровозов и мотор-вагонного подвижного состава изложены в работах [5 – 8].

Для системы тягового электроснабжения разработка программы внедрения ОТМ по экономии электроэнергии включает в себя несколько этапов:

1) анализ текущего уровня использования электроэнергии на тягу поездов;

2) составление перечня мероприятий, направленных на снижение потерь электроэнергии и повышение пропускной способности участков железных дорог по условиям режима работы системы тягового электроснабжения;

3) оценка потенциала повышения энергетической эффективности системы тягового электроснабжения, достигаемого за счет снижения потерь электроэнергии для конкретных участков железных дорог;

4) расчет технико-экономического эффекта и определение сроков окупаемости мероприятий для конкретных участков железных дорог;

5) составление, согласование и утверждение программ повышения энергетической эффективности системы тягового электроснабжения железных дорог.

В рамках работы по оценке энергоэффективности системы тягового электроснабжения были выполнены следующие виды работ:

проведены сбор и обобщение детализированных сведений о характеристиках тягового электроснабжения в границах обследуемых железных дорог;

определение межподстанционных зон, лимитирующих пропускную способность по устройствам тягового электроснабжения;

дана характеристика тяговых подстанций, в том числе оценка условий питания межподстанционных зон участков постоянного и переменного тока и анализ эффективности применения сглаживающих фильтров и устройств компенсации реактивной мощности.

выполнен анализ эффективности передачи электроэнергии в тяговой сети, в том числе оценка оптимальности схемы питания тяговой сети, расположения постов секционировании и пунктов параллельного соединения; оценка равномерности распределения нагрузок между смежными тяговыми подстанциями и рационального использования усиливающих фидеров и проводов.

Ожидаемый суммарный технико-экономический эффект для ОАО «Российские железные дороги», достигаемый за счет реализации мероприятий по повышению энергоэффективности системы тягового электроснабжения на сети железных дорог, составил 1,6 % от расхода электроэнергии на тягу поездов. Средневзвешенный простой срок окупаемости мероприятия составит 9,3 года.

Структура мероприятий, направленных на повышение энергоэффективности системы тягового электроснабжения, и их долевой вес в ожидаемом суммарном технико-экономическом эффекте, а также долевой вес мероприятий в суммарных капитальных затратах на их внедрение приведены в таблице.

Структура мероприятий по повышению энергоэффективности системы тягового электроснабжения

Наименование мероприятия	Долевой вес мероприятия в ожидаемом суммарном эффекте, о. е.	Долевой вес мероприятия в суммарных капитальных затратах на внедрение, о. е.
1	2	3
Установка выпрямительно-инверторных агрегатов на тяговых подстанциях постоянного тока	0,320	0,102
Модернизация преобразовательных агрегатов на тяговых подстанциях постоянного тока	0,285	0,225

Окончание таблицы

1	2	3
Оптимизация работы и замена понижающих трансформаторов на тяговых подстанциях постоянного и переменного тока	0,112	0,195
Снижение потерь электрической энергии в тяговой сети и увеличение пропускной способности участка за счет использования усиливающих и экранирующих проводов	0,081	0,089
Повышение эффективности применения компенсирующих устройств на тяговых подстанциях и постах секционирования участков переменного тока	0,072	0,077
Снижение перетоков мощности в тяговой сети участков переменного тока	0,064	0,003
Минимизация потерь электрической энергии в тяговой сети за счет изменения схемы питания	0,025	0,027
Модернизация сглаживающих устройств на тяговых подстанциях постоянного тока	0,019	0,165
Перевод переключателей ответвлений обмоток без возбуждения (ПБВ) на преобразовательных трансформаторах из положения III в положение II	0,016	0,000
Прочие мероприятия, направленные на увеличение пропускной способности участков	0,006	0,117

Рассмотрим принципы возникновения эффекта от разработанных мероприятий, перечисленных в таблице.

1. Установка выпрямительно-инверторных агрегатов (ВИПов) на тяговых подстанциях постоянного тока приводит к снижению нереализованной доли избыточной электрической энергии рекуперации на участках постоянного тока.

Возврат энергии рекуперации и, следовательно, процесс электрического торможения, возможны только при одновременном потреблении энергии. Таким образом, величина рекуперируемой энергии зависит главным образом от наличия приемников энергии, их характеристик и характеристик электроподвижного состава.

На однопутных и многопутных участках энергия рекуперации в некоторых случаях может превышать величину, которую можно реализовать на электроподвижном составе, находящемся в режиме тяги. В этих случаях появляется избыточная энергия рекуперации.

Тип, мощность и размещение приемников избыточной энергии рекуперации рациональным образом выбираются на основании величин абсолютной и избыточной энергии рекуперации. Исходными положениями при этом принимаются следующие:

мощность и расположение приемников избыточной энергии необходимо выбирать так, чтобы поездам, следующим по спускам, были созданы условия для применения рекуперативного торможения при любых, даже наиболее тяжелых, поездных ситуациях на участке;

тип и количество выбираемых установок должны быть оправданы экономическими соображениями, т. е. они должны обеспечить наибольший экономический эффект от применения рекуперативного торможения.

Проведенные исследования позволили выделить три группы тяговых подстанций, на которых необходимо провести работы по модернизации или внедрению ВИПов:

1) тяговые подстанции, на которых необходимо выполнить замену существующих ВИПов на новые (21 ед. ВИПов);

2) тяговые подстанции, оборудованные тяговыми трансформаторами, конструкция которых позволяет подключать к ним ВИПы (три ед. ВИПов);

3) тяговые подстанции, на которых целесообразно выполнить замену выпрямительных агрегатов на ВИПы с одновременной заменой тяговых трансформаторов (31 тяговая подстанция).

Проведенные расчеты показали, что реализация предложенных мероприятий имеет простой срок окупаемости около семи лет.

2. Модернизация преобразовательных агрегатов на тяговых подстанциях постоянного тока обеспечивает повышение эксплуатационной надежности и эффективности работы системы тягового электроснабжения

за счет снижения удельного расхода электрической энергии для тяги поездов примерно на 2,5 – 3,5 % в зависимости от загрузки подстанции;

повышения пропускной способности электрифицированного участка;

снижения потерь в тяговом трансформаторе за счет применения трансформаторов рациональной мощности;

снижения потерь электроэнергии в вентильных конструкциях.

В настоящее время на тяговых подстанциях постоянного тока значительная часть выпрямительно-инверторных агрегатов собрана по шестипульсовой схеме, имеющей более низкие технико-экономические показатели, чем двенадцати- и двадцатичетырехпульсовые.

Двенадцатипульсовые преобразователи имеют существенные технико-экономические преимущества перед шестипульсовыми. В частности, при применении двенадцатипульсовых выпрямителей коэффициент мощности повышается до 0,96 – 0,97 против 0,91 – 0,93 шестипульсовых. Коэффициент наклона внешней характеристики снижается до 0,26 против 0,52 шестипульсового выпрямителя. В сетевом токе отсутствуют гармоники с номерами 5, 7, 17, 19 и т. д., что приводит к улучшению показателей качества электрической энергии питающей сети.

Внедрение двенадцатипульсовых выпрямителей на тяговых подстанциях возможно двумя путями. Первый заключается в приобретении новых тяговых трансформаторов (с масляным охлаждением типа ТРДП-12500, ТРМП-6300, ТРДТНП-16000 и сухих типа ТРСЗП-6300 и ТРСЗП-12500) и новых вентильных конструкций (В-ТПЕД, ТПЕД-Ж). Этот путь характеризуется значительными затратами. Второй путь, характеризующийся значительно меньшими затратами, заключается в модернизации ранее установленных выпрямительных трансформаторов шестипульсовых нулевых выпрямителей параллельного типа (ТМРУ, УТМРУ и ТМПУ с габаритной мощностью 16000 кВ·А) и вентильных конструкций УВКЭ-1, ПВКЕ-2, ПВЭ-3, ПВЭ-5.

Суть модернизации трансформаторов при переходе на двенадцатипульсовые мостовые схемы выпрямления сводится к перераспределению витков вторичных обмоток в соответствии с параметрами новой схемы выпрямления. Ориентировочная стоимость модернизации одного преобразовательного трансформатора составляет около 20 % от стоимости нового масляного трансформатора. Модернизация вентильных конструкций может быть выполнена с использованием силовых блоков БСЕ, выпускаемых опытным заводом Всероссийского электротехнического института (ОЗ ВЭИ). В этом случае затраты на приобретение блоков не превысят 1,6 млн р. Модернизация вентильных конструкций обычно проводится на местах силами ремонтно-ревизионных участков.

Модернизация трансформаторов малой мощности (2хТМПУ-6300, 2хУТМРУ-6300, 2хТМРУ-6300), как правило, нецелесообразна ввиду их существенного морального и физического износа. В этом случае необходимо рассмотреть возможность их замены на трансформаторы ТРДП-12500.

В отдельных случаях модернизация преобразовательных агрегатов с шести- на двенадцатипульсовую схему нецелесообразна ввиду существенных капитальных затрат и, как следствие, большого срока окупаемости мероприятия. В этом случае рекомендуется модернизация вентильных конструкций с использованием блоков БСЕ без изменения схемы выпрямления.

Ожидаемый простой срок окупаемости модернизации преобразовательных агрегатов на тяговых подстанциях постоянного тока на сети железных дорог составляет 12,7 года.

3. Оптимизация работы и замена понижающих трансформаторов на тяговых подстанциях постоянного и переменного тока обеспечивает повышение эксплуатационной надежности и эффективности работы системы тягового электроснабжения.

На полигоне постоянного и переменного тока электрифицированных железных дорог эксплуатируется большое количество понижающих трансформаторов с истекшим сроком службы (свыше 25 лет). Вследствие этого снижается надежность системы тягового и нетягового электроснабжения, повышаются потери холостого хода и короткого замыкания трансформаторов, увеличиваются затраты на их ремонт и техническое обслуживание.

В большинстве случаев на тяговых подстанциях переменного тока применяются два или более понижающих трансформатора. При этом возможны следующие основные варианты организации системы питания нагрузок:

– питание районной и тяговой нагрузки от одного трансформатора;

– раздельное питание районной и тяговой нагрузки;

– параллельная работа двух трансформаторов на тягу поездов.

Выбор оптимальной схемы питания зависит от величины тяговой и районной нагрузки, установленной мощности трансформаторов, несимметрии напряжения на шинах трансформаторов и от других факторов.

В целях снижения эксплуатационных расходов и потерь электрической энергии к внедрению предлагаются мероприятия по замене устаревших или имеющих неудовлетворительные технические характеристики трансформаторов, а также мероприятия по выбору оптимального режима работы понижающих трансформаторов. Снижение потерь электрической энергии в трансформаторном оборудовании составит более 65 млн кВт·ч в год. Однако данное мероприятие является одним из наиболее затратных, а простой срок его окупаемости (без учета эффекта от повышения пропускной способности участков железных дорог) составляет более 25 лет.

4. Использование усиливающих и экранирующих проводов приводит к снижению потерь электрической энергии в тяговой сети и увеличению пропускной способности участков железных дорог.

Использование усиливающих фидеров или изменение параметров контактной подвески в границах межподстанционных зон носит многоцелевой характер, поскольку позволяет повысить пропускную способность участков на лимитирующих зонах и одновременно сократить потери электрической энергии в тяговой сети.

На многих участках электрифицированных железных дорог в качестве мероприятия по снижению падения напряжения в тяговой сети применяют различные способы по уменьшению сопротивления тяговой сети. В результате принятых мер снижаются потери электрической энергии в тяговой сети от протекающих токов и, как следствие, уменьшаются потери напряжения.

Увеличение сечения тяговой сети возможно за счет подвешивания усиливающего и экранирующего проводов и уменьшения сопротивления рельса.

Такое мероприятие, как уменьшение сопротивления рельса, часто неприменимо вследствие больших капитальных затрат на демонтаж и монтаж элементов системы электроснабжения и ограничения движения поездов. Таким образом, наиболее оптимальным является вариант подвешивания усиливающего и экранирующего проводов.

Выбор сечения выполняется на основании результатов имитационного моделирования с использованием пакета прикладных программ «КОРТЭС» с учетом обеспечения пропускной способности участка.

Анализ данных, характеризующих тип контактной подвески на всем протяжении обследуемых железных дорог, позволил определить участки тяговой сети, требующие усиления за счет применения усиливающих и экранирующих проводов. Снижение потерь электрической энергии в тяговой сети за счет использования усиливающих и экранирующих проводов составит более 41 млн кВт·ч в год. Простой срок окупаемости внедрения усиливающих и экранирующих проводов (без учета эффекта от повышения пропускной способности) составляет 16,7 года.

5. Повышение эффективности применения компенсирующих устройств на тяговых

подстанциях и постах секционирования участков переменного тока обеспечивает снижение потерь электроэнергии, повышение уровня напряжения в контактной сети и обеспечение пропускной способности участков железных дорог.

По результатам анализа режимов работы системы тягового электроснабжения участков переменного тока был проведен выбор варианта компенсации реактивной мощности с точки зрения минимизации приведенных затрат. Выбор оптимального варианта компенсирующего устройства выполняется на основании результатов имитационного моделирования с использованием пакета прикладных программ «КОРТЭС» (ВНИИЖТ), с учетом приказа ФСТ России от 31 августа 2010 г. № 219-э/6 «Об утверждении Методических указаний по расчету повышающих (понижающих) коэффициентов к тарифам на услуги по передаче электрической энергии в зависимости от соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии, применяемых для определения обязательств сторон по договорам об оказании услуг по передаче электрической энергии по единой национальной (общероссийской) электрической сети (договорам энергоснабжения)».

В ходе проведения анализа была дана оценка технического состояния устройств компенсации реактивной мощности и влияния работы устройств на пропускную способность рассматриваемого участка. По результатам анализа были разработаны рекомендации, которые могут быть сгруппированы по следующим направлениям:

– ремонт и модернизация существующих устройств компенсации реактивной мощности;

– внедрение новых устройств продольной компенсации на тяговых подстанциях и постах секционирования.

Результаты проведенных исследований показали, что основной эффект от внедрения устройств компенсации реактивной мощности заключается в увеличении пропускной способности участка. Поэтому, несмотря на существенные затраты на реализацию данного мероприятия, простой срок его окупаемости с учетом постепенного линейного увеличения размеров движения по участкам железных дорог составляет около двух лет.

6. Снижение перетоков мощности в тяговой сети участков переменного тока приводит к снижению потерь электроэнергии в контактной сети.

Система тягового электроснабжения является несимметричным нелинейным потребителем с переменной нагрузкой, режимы ее работы характеризуются неравномерностью загрузки смежных тяговых подстанций, уравнительными токами в межподстанционных фидерных зонах, достигающих значений нормальных эксплуатационных. В результате наблюдаются повышенные значения потерь напряжения и мощности в тяговой сети, что снижает технико-экономические показатели системы тягового электроснабжения. Кроме того, система тягового электроснабжения ухудшает показатели качества электрической энергии в системе внешнего электроснабжения.

Так как сети системы тягового электроснабжения оказываются подключенными параллельно линиям системы внешнего электроснабжения, то по тяговой сети протекает часть мощности транзита и поэтому уменьшаются потери электрической энергии в электроэнергетической системе, содержащей тяговую нагрузку, но увеличиваются потери в тяговой сети и оборудовании тяговых подстанций.

На основании анализа условий питания межподстанционных зон были выявлены наиболее вероятные участки со значительными перетоками мощности на сети железных дорог переменного тока, для которых были выполнены измерения.

По результатам натурных измерений был выполнен расчет значений уравнительного тока и потерь электроэнергии от его протекания при различных режимах работы системы тягового электроснабжения и разработаны рекомендации по их снижению. К таким рекомендациям относятся регулирование напряжения на шинах 27,5 кВ смежных тяговых подстанций, перевод на раздельное питание районной и тяговой нагрузки, изменение схемы питания тяговой подстанции, а также внедрение устройств режимного управления постом секциониро-

вания. Ожидаемое уменьшение потерь электроэнергии в контактной сети от снижения протекания уравнительных токов составляет 37 млн кВт·ч в год, а окупаемость данного мероприятия не превышает одного года.

7. Изменение схемы питания тяговой сети с целью минимизации потерь электрической энергии в тяговой сети должно выполняться при безусловном обеспечении пропускной способности участков и минимуме приведенных затрат.

Экономичность и надежность работы контактной сети зависят от схемы ее питания и секционирования. Схема секционирования контактной сети определяется эксплуатационными условиями. Расчет потерь электроэнергии проводится путем имитационного моделирования с использованием пакета прикладных программ «КОРТЭС» (ВНИИЖТ). В рамках данного пункта было выполнены расчеты показателей системы тягового электроснабжения при всех возможных на участке схемах питания с учетом обеспечения пропускной способности участка (с учетом фактического размера движения и возможности увеличения пропускной способности на перспективу). Оценка оптимальности схемы питания тяговой сети и расположения постов секционирования (ПС) и пунктов параллельного соединения (ППС) выполнялась в соответствии с п. 1.8 Методических указаний по проведению энергетического обследования объектов ОАО «РЖД», утвержденных распоряжением старшего вице-президента ОАО «РЖД» В. А. Гапановича от 31 марта 2011 г. № 685р. Оценка целесообразности установки новых ПС и ППС в основном выполнена для участков, лимитирующих пропускную способность. Расчет технико-экономического эффекта выполнен с учетом только снижения потерь электроэнергии в тяговой сети.

Дополнительная установка новых ПС и ППС не приводит к значительному уменьшению потерь электроэнергии, однако приводит к снижению просадки напряжения в тяговой сети и тем самым повышает пропускную способность участка и надежность работы системы тягового электроснабжения.

По результатам проведенных работ было определено, что на сети железных дорог целесообразно реконструировать и восстановить 6 ПС и 2 ППС, внедрить 14 новых ПС и 47 новых ППС, а также одну автотрансформаторную подстанцию.

Ожидаемое снижение потерь электроэнергии в тяговой сети составит более 14 млн кВт·ч в год. Простой срок окупаемости без учета эффекта от повышения пропускной способности участка составляет около 22 лет.

8. Модернизация сглаживающих устройств на тяговых подстанциях постоянного тока обеспечивает повышение эксплуатационной надежности и эффективности работы системы тягового электроснабжения. Эффект достигается

за счет возможности получения достаточного сглаживающего действия для нормального функционирования устройств связи и системы централизации и блокировки (СЦБ);

минимальных потерь электрической энергии;

уменьшения эксплуатационных расходов.

Сглаживающие устройства (СУ) тяговых подстанций постоянного тока применяются для снижения мешающего влияния системы тягового электроснабжения на устройства связи и системы централизации и блокировки.

На ряде тяговых подстанций применяются устаревшие двухзвенные СУ, собранные по схемам ЗСЖД и ВНИИЖТа. Недостатком указанных СУ являются значительные эксплуатационные затраты и повышенные потери электрической энергии за счет применения двух сглаживающих реакторов с высокой индуктивностью.

В связи с внедрением кабельных и волоконно-оптических линий связи применение двухзвенных СУ с точки зрения потерь электрической энергии и эксплуатационных расходов не является целесообразным. При названных выше условиях следует реконструировать такие СУ в более простые и экономичные однозвенные.

Кроме того, на ряде тяговых подстанций с шестипульсовыми и двенадцатипульсовыми выпрямителями эксплуатируются однозвенные СУ с резонансными контурами 300, 600, 900

и 1200 Гц, предназначенные для шестипульсовых схем. В эксплуатации находятся и устаревшие многоконтурные схемы с количеством резонансных контуров от семи до девяти.

В границах любого ЭЧ предлагается реконструировать существующие СУ на тяговых подстанциях в однозвенные апериодические, а на станциях стыкования и смежных с ними – в резонансно-апериодические. Параметры реконструируемых СУ зависят от типа автоблокировки и линий связи на участке и числа пульсаций в схеме преобразовательного агрегата.

В случае использования на ТПС однозвенных апериодического и резонансно-апериодического СУ с резонансным контуром 100 Гц модернизация СУ не требуется.

Расчет выполнен с учетом того, что работы по реконструкции СУ выполняются оперативно-ремонтным персоналом тяговой подстанции и ремонтным персоналом ремонтно-ревизионного участка (РРУ) в течение одной рабочей смены. Реконструкция заключается в отключении избыточных индуктив-ностей и конденсаторов, поэтому новых материалов не требует. Количественный состав исполнителей принят с учетом сложности и объема работ, но не менее двух человек согласно правилам техники безопасности.

Ожидаемое снижение потерь в СУ составляет 11,2 млн кВт·ч в год, а срок окупаемости данного мероприятия не превышает одного года.

9. Перевод переключателей ответвлений обмоток без возбуждения (ПБВ) на преобразовательных трансформаторах из положения III в положение II позволяет снизить потери электроэнергии в преобразовательных трансформаторах.

С целью дополнительного снижения потерь холостого хода и потребления реактивной мощности из сети выбор положения переключателя преобразовательного трансформатора необходимо производить исходя из среднего (наиболее вероятного) значения напряжения на шинах, питающих преобразовательные агрегаты. На трансформаторах, оснащенных переключателями ответвлений обмоток без возбуждения, правильность выбора коэффициента трансформации должна проверяться не менее двух раз в год. В процессе регулирования напряжения переключением ответвлений с помощью устройства ПБВ или РПН персонал не должен допускать длительного повышения напряжения на трансформаторе сверх номинального для данного ответвления более чем на 5 % при нагрузке не выше номинальной.

Это требование вызвано тем, что современные трансформаторы строятся с максимальной индукцией в стали, близкой к насыщению стали, и сравнительно небольшое увеличение подводимого к трансформатору напряжения ведет к резкому увеличению индукции, а следовательно, и тока, и потерь холостого хода трансформатора. Таким образом, нельзя применять ответвления трансформатора для компенсации ненормально большой потери напряжения во вторичной сети и работать с недопустимо высоким для данного ответвления первичным напряжением. При этом потери в стали возрастают пропорционально квадрату напряжения, а ток увеличивается еще в большей степени. Увеличение потерь в стали ведет к преждевременному износу изоляции и является причиной местного нагрева стальных конструкций.

В целях снижения потерь электрической энергии в тяговых трансформаторах была рассмотрена возможность перевода ПБВ из положения III в положение II. Данное мероприятие является организационным и не требует дополнительных капитальных затрат.

10. К прочим мероприятиям, направленным на увеличение пропускной способности и обеспечение надежности электроснабжения участков железных дорог, относятся

– строительство четырех новых тяговых подстанций;
– усиление отсасывающих линий на 20 тяговых подстанциях;
– усиление питающих линий на двух тяговых подстанциях;
– реконструкция участков контактной сети.

Необходимо указать еще одно перспективное направление, которое позволит существенно усовершенствовать систему контроля эффективности использования электроэнергии на тягу поездов – внедрение современной системы учета электроэнергии на фидерах контактной сети и электроподвижном составе, отвечающей техническим требованиям,

предъявляемым к системам коммерческого учета электроэнергии [9]. Внедрение указанной системы позволит обеспечить контроль уровня потерь электроэнергии в границах межподстанционных зон и границах тарифных зон и исключить человеческий фактор при съеме и обработке показаний приборов учета электроэнергии на электроподвижном составе. В настоящее время специалистами Омского государственного университета путей сообщения проводятся работы по созданию элементов единой автоматизированной системы учета электроэнергии на фидерах контактной сети и электроподвижном составе [10 – 12].

Список литературы

1. Черемисин, В. Т. Основные направления реализации Федерального Закона «Об энергосбережении…» № 261-ФЗ от 23.11.09 в холдинге «Российские железные дороги» [Текст] / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров // Известия Транссиба/ Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – № 2 (2). – С. 119 – 123.

2. Никифоров, М. М. Концепция организации энергетического обследования в ОАО «Российские железные дороги» [Текст] / М. М. Никифоров // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – № 4 (4). – С. 120 – 126.

3. Черемисин, В. Т. Повышение энергетической эффективности системы тягового электроснабжения и электроподвижного состава [Текст] / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров // Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы науч.-практ. конф./ Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2012. – С. 9 – 15.

4. Никифоров, М. М. Энергетическое обследование системы тягового электроснабжения и электроподвижного состава [Текст] / М. М. Никифоров // Инновационное развитие железнодорожного транспорта России: Материалы всерос. науч.-практ. конф./ / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2012. – С. 113 – 119.

5. Давыдов, А. И. Особенности проведение энергетического обследования электрической тяги поездов [Текст] / А. И. Давыдов, М. М. Никифоров // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока / Новосибирская гос. акад. водного транспорта. – Новосибирск, 2011. – № 1. – С. 303 – 306.

6. Никифоров, М. М. Основные направления повышения энергоэффективности моторвагонного электроподвижного состава [Текст] / М. М. Никифоров, А. И. Давыдов, Т. Е. Никишкин// Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы науч.-практ. конф./ Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2012. – С. 29 – 35.

7. Незевак, В. Л. Потенциал энергосбережения в сфере эксплуатации мотор-вагонного подвижного состава постоянного тока [Текст] / В. Л. Незевак, М. М. Никифоров // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: Материалы всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2012. – С. 251 – 256.

8. Никифоров, М. М. Методика оценки потенциала энергоэффективности применения рекуперативного торможения [Текст] / М. М. Никифоров, А. Л. Каштанов, В. А. Кандаев // Известия Транссиба/ Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2012. – № 1 (9). – С. 72 – 78.

9. Король, Ю. Н. Внедрение единой автоматизированной системы мониторинга и учета электроэнергии на фидерах контактной сети и ЭПС – первый шаг к созданию «интеллектуальной» сети тягового электроснабжения [Текст] / Ю. Н. Король, Ю. А. Чернов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – № 4 (12) . – С. 102 – 110.

10. Пат. 97829 Российская Федерация, МПК7 G01R11/54. Универсальный электронный счетчик для учета электрической энергии на электроподвижном составе постоянного и переменного тока [Текст] / Черемисин В. Т., Грицутенко С. С., Никифоров М. М., Чижма С. Н., Хряков А. А.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – № 2010118148/10; заявл. 05.05.2010; опубл. 20.09.2010.

11. Хряков, А. А. Снижение коммерческой составляющей потерь электрической энергии на тягу поездов на полигоне постоянного тока [Текст] / А. А. Хряков, М. М. Никифоров // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2011. – № 1 (5). – С. 42 – 45.

12. Пат. 2446065 Российская Федерация, МПК7 B60M3/02. Информационная система для учета электроэнергии в тяговых сетях [Текст] / Черемисин В. Т., Чижма С. Н. Кондратьев Ю. В., Никифоров М. М., Ануфриев А. С.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – № 2010143100/11; заявл. 20.10.2010; опубл. 27.03.2012.

УДК 519.72

Е. Д. Зачатейский, А. А. Лаврухин

АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ КВАНТОВАНИЯ СИГНАЛОВ ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

В статье приведен сравнительный анализ различных оптимальных методов квантования непрерывных сигналов, в том числе с минимальной среднеквадратичной ошибкой, с максимальной энтропией и субоптимального по энтропии, при различных параметрах вероятностного распределения сигнала.

Современные электронные устройства оперируют с цифровым представлением непрерывных сигналов, полученным путем дискретизации сигналов по времени и квантования по уровню. Железнодорожный транспорт все больше использует достижения цифровой техники, которая в своем составе содержит как обязательный элемент аналого-цифровые преобразователи (АЦП). Повышению точности цифровой обработки данных может способствовать применение оптимальных алгоритмов квантования. Например, при модуляции и демодуляции сигналов в телекоммуникационных системах может оказаться существенным повышение числа эффективных двоичных разрядов АЦП, а значит, и повышение точности цифрового представления и обработки; в устройствах контроля и диагностики систем электроснабжения при обработке данных, имеющих характерные особенности (сосредоточенных по амплитуде в узкой части динамического диапазона), применение оптимального квантования может повысить отношение точности обработки данных к стоимости элементной базы.

Решение задачи квантования сигнала по уровню заключается в преобразовании значений сигнала из непрерывного множества в множество разрешенных дискретных значений, которые называют уровнями квантования. Более подробно процесс аналого-цифрового преобразования сигнала описан в источниках [1 – 4].

Минимизация ошибки квантования может осуществляться путем увеличения числа уровней квантования (повышения разрядности АЦП) либо выбора оптимальных уровней квантования, либо комбинацией этих двух методов. Поскольку повышение разрядности сопряжено с увеличением стоимости устройства, то рассматривают различные методы, направленные на выбор оптимальных уровней квантования, в соответствии с некоторым критерием (максимизация энтропии, минимизация среднеквадратичной ошибки квантования (СКО) и др.). Будем считать, что априорной информацией является форма сигнала или статистические характеристики (функции распределения – интегральная $F(x)$ или дифференциальная $f(x)$).

В данной работе проводится анализ и сравнение среднеквадратичной ошибки для следующих методов квантования:

1) равномерного;
2) неравномерного оптимального с максимальной энтропией [1];
3) субоптимального по энтропии [5];
4) предложенного Л. А. Барановым неравномерного оптимального по уровню [6].

Анализ осуществляется путем моделирования методов квантования, при которых для

одного сигнала в виде реализации случайного процесса получают значения среднеквадратичных ошибок, соответствующих различным способам квантования. Оценка состоятельности проводится сравнением величины полученной ошибки рассматриваемого метода и величины среднеквадратичной ошибки равномерного способа квантования. Эксперименты проводились при следующих исходных условиях: число уровней квантования N принималось равным 128, 256, 512 и 1024; объем выборки (длина дискретной последовательности непрерывных значений сигнала) равнялся 500000; функция распределения $f(x)$ квантуемой величины нормальная, со значениями дисперсии σ2 = 2, 3, 5, 7 и 9; длина диапазона значений квантуемой величины ($x_k - x_0$) равна 10.

При равномерном квантовании область возможных значений $X = [x_0; x_k]$ сигнала разбивается на равные отрезки $[b_{i-1}; b_i)$, $b_0 = x_0$, $b_k = x_k$, количество которых равно числу уровней квантования. Данный метод является достаточно простым, но неоптимальным.

Уменьшение среднеквадратичной ошибки квантования осуществляется за счет уменьшения шага квантования для тех областей сигнала, плотность распределения вероятности в которых выше.

Метод квантования, оптимальный по энтропии, заключается в определении уровней квантования через функцию, обратную интегральной функции распределения исходного сигнала.

Максимум энтропии достигается в случае равномерного распределения вероятностей по всем уровням квантования [1], когда

$$\int_{b_{i-1}}^{b_i} f(x)dx = \frac{1}{N}, \tag{1}$$

что эквивалентно (учитывая свойства функции распределения случайной величины) равенству:

$$F(b_i) - F(b_{i-1}) = \frac{1}{N} \text{ для } i = \overline{1, N}. \tag{2}$$

Поскольку b_0 является нижней границей множества X и $F(b_0) = 0$, то из формулы (2) следует, что

$$F(b_i) = \frac{i}{N} \text{ для } i = \overline{1, N}. \tag{3}$$

Таким образом, необходимо определить аргументы bi функции F, которые разбивают ее область значений на равные отрезки.

Будем считать, что функция F отображает множество X (диапазон изменения квантуемой величины или область определения функции F) на Y (область значений функции F). Алгоритм квантования можно записать в виде последовательности действий:

1. Определить $y_0 = F(x_0), y_k = F(x_k)$ и получить область значений $Y = [y_0; y_k]$.

2. Выполнить равномерное квантование интервала Y:

$$y_i = y_0 + \frac{y_k - y_0}{N} i \text{ для } i = \overline{1, N}. \tag{4}$$

3. Вычислить обратное отображение дискретного множества $\{y_i\}$ на $\{b_i\}$:

$$b_i = F^{-1}(y_i). \tag{5}$$

4. Заменить последовательность непрерывных значений xj на последовательность квантующих индексов ij так, чтобы для всех j выполнялось $x_j \in [b_{i_j-1}; b_{i_j})$.

При выполнении деквантования (восстановления по индексу ij значения сигнала xj) каж-

дый *i*-й отрезок $[b_{i_j-1}; b_{i_j}]$ заменяется его математическим ожиданием $z_i = M\left([b_{i-1}; b_i]\right)$.

Представленный алгоритм может применяться при разных методах квантования. В случае квантования, оптимального по энтропии, функция *F(x)* является интегральной функцией распределения вероятностей и для нормального закона имеет вид:

$$F_2(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{x_0}^{x} \exp\left(\frac{-t^2}{2\sigma^2}\right) dt. \quad (6)$$

График зависимости $F2(x)$ представлен на рисунке 1.

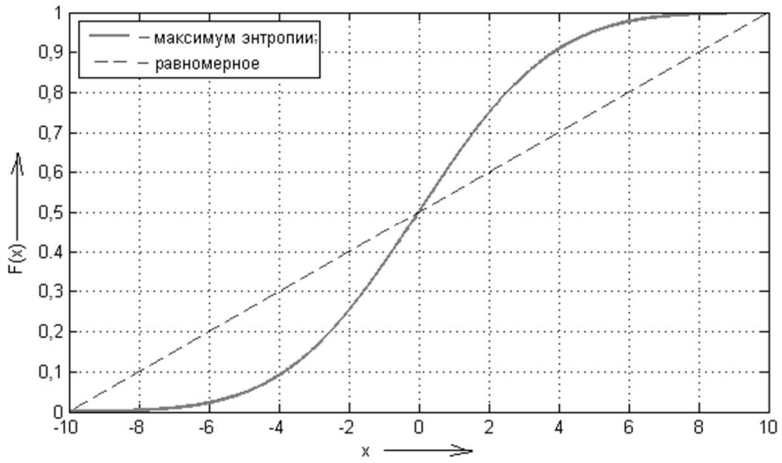


Рисунок 1 – График зависимостей $F_1(x)$ и $F_2(x)$

На рисунке 1 для сравнения изображена зависимость $F_2(x)$ для равномерного квантования, которая представляет собой прямую линию:

$$F_1(x) = kx + c. \quad (7)$$

Оценка состоятельности метода с максимальной энтропией проводилась в ходе экспериментов. Границы квантов определялись по формуле (5). Ошибка квантования определялась как разница между исходным значением сигнала и значением, полученным в результате последовательного квантования и деквантования. По ошибкам квантования всей рассматриваемой последовательности (случайного сигнала) вычислялось СКО.

Результатом каждого из экспериментов является отношение СКО исследуемого метода к ошибке равномерного квантования:

$$k\left(f(x),\, N\right) = \frac{\sigma_{\text{иссл}}\left(f(x),\, N\right)}{\sigma_{\text{равн}}\left(f(x),\, N\right)}. \quad (8)$$

Результаты вычислительных экспериментов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Отношение среднеквадратичной ошибки квантования методом максимальной энтропии к среднеквадратичной ошибке равномерного квантования

Дисперсия распределения σ	Число уровней квантования N			
	128	256	512	1024
2	10,69	17,91	30,53	50,43
3	2,18	2,22	2,26	2,27
5	1,19	1,18	1,19	1,18
7	1,06	1,06	1,06	1,05

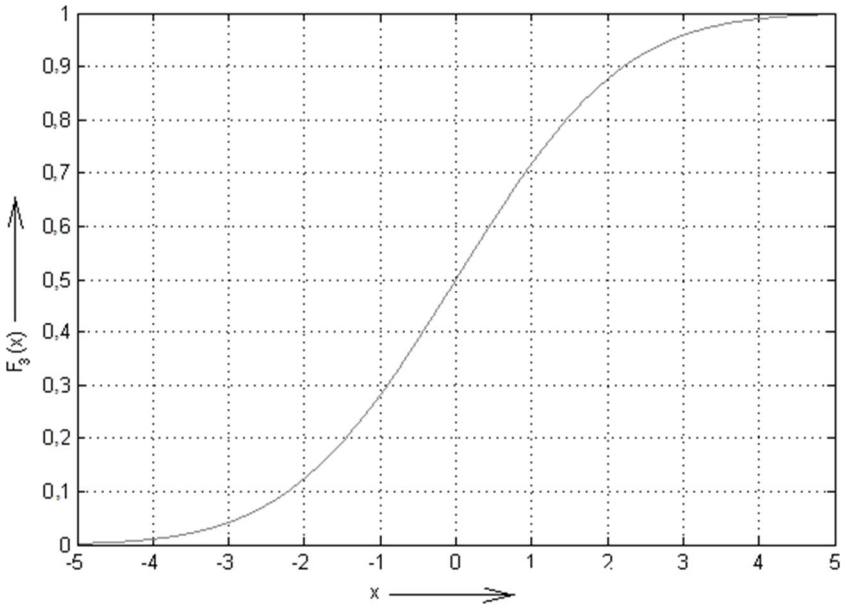
Как следует из приведенных в таблице 1 данных, СКО шума квантования, оптимального по энтропии, больше, чем при равномерном квантовании, что естественно, так как критерием оптимальности для данного метода является максимизация энтропии сигнала, а не миними-

зация ошибки. В случаях, когда целью оптимизации является уменьшение ошибки квантования, данный метод применять нецелесообразно.

Метод, позволяющий заметно сократить СКО шума квантования при незначительных потерях в величине энтропии, предложен в работе [5] и является оптимальным с точки зрения простоты реализации и субоптимальным для компромиссной максимизации энтропии и минимизации функции «скорость – искажение». Суть метода заключается в изменении способа определения уровней, когда в качестве функции $F(x)$ выбирается интегральная функция распределения с дисперсией, увеличенной в $\sqrt{3}$ раз. Функция $F_3(x)$ в таком случае имеет вид:

$$F_3(x) = \frac{1}{\sqrt{3}\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{x_0}^{x} \exp\left(\frac{-t^2}{2\sqrt{3}\sigma^2}\right) dt. \qquad (9)$$

График зависимости $F_3(x)$ представлен на рисунке 2.



Риунок 2 – График функции $F_3(x)$

Результаты экспериментов с теми же исходными данными, что и для предыдущего эксперимента, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Отношение среднеквадратичной ошибки квантования субоптимальным методом к среднеквадратичной ошибке равномерного квантования

Дисперсия распределения σ	Число уровней квантования N			
	128	256	512	1024
2	0,32	0,33	0,32	0,32
3	0,81	0,81	0,81	0,82
5	0,95	0,95	0,95	0,95
7	0,98	0,98	0,99	0,98

Как видно из данных таблицы 2, среднеквадратичная ошибка квантования при использовании метода, субоптимального по энтропии, меньше, чем при равномерном квантовании, вне зависимости от параметров функции распределения, и возрастает с увеличением параметра σ.

Вычислительные эксперименты проводились и для оценки состоятельности метода, предложенного Л. А. Барановым [6]. В этом методе так же, как в рассмотренных, шаг квантования берется более коротким для тех значений сигнала, плотность вероятности которых выше. При заданном одномерном законе распределения $f(x)$ квантуемой величины x в диапазоне от x_0 до x_k и при известном числе уровней квантования N минимизируется функционал:

$$J = \sum_{i=1}^{N} \int_{x_{i-1}}^{x_i} (z_i - x)^2 f(x) dx. \tag{10}$$

Минимизация функционала (10) позволяет представить функцию неравномерного квантования в виде:

$$F_4(x) = \frac{x_k - x_0}{\int_{x_0}^{x_k} \sqrt[3]{f(x)dx}} \times \int_{x_0}^{x} \sqrt{f(x)dx} + x_0. \tag{11}$$

График функции $F_4(x)$ для нормального распределения случайной величины x в диапазоне [–10; 10] изображен на рисунке 3. Равномерное квантование области значений функции $F_4(x)$ обеспечивает неравномерное оптимальное квантование аргумента x, при котором достигается минимум дисперсии погрешности.

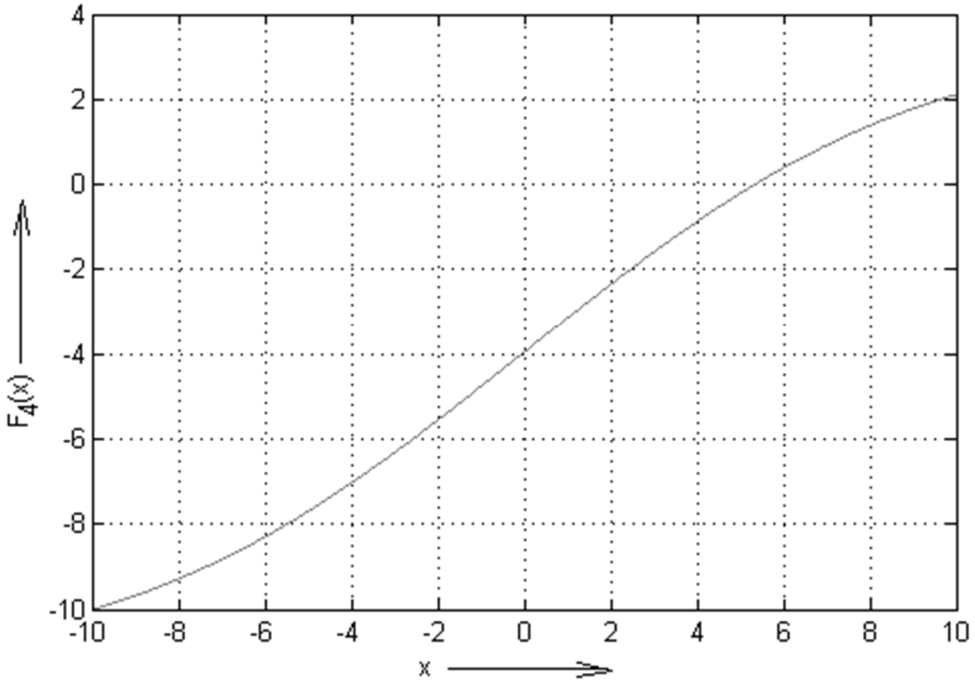


Рисунок 3 – График функции $F_4(x)$

Результаты экспериментов представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Отношение среднеквадратичной ошибки квантования метода Баранова к среднеквадратичной ошибке равномерного квантования

Дисперсия распределения σ	Число уровней квантования N			
	128	256	512	1024
2	0,50	0,49	0,49	0,49
3	0,83	0,83	0,83	0,84
5	0,96	0,96	0,96	0,96
7	0,99	0,99	0,99	0,99

Зависимости для проведения сравнительного анализа полученных данных, обобщающие результаты экспериментов представлены на рисунке 4.

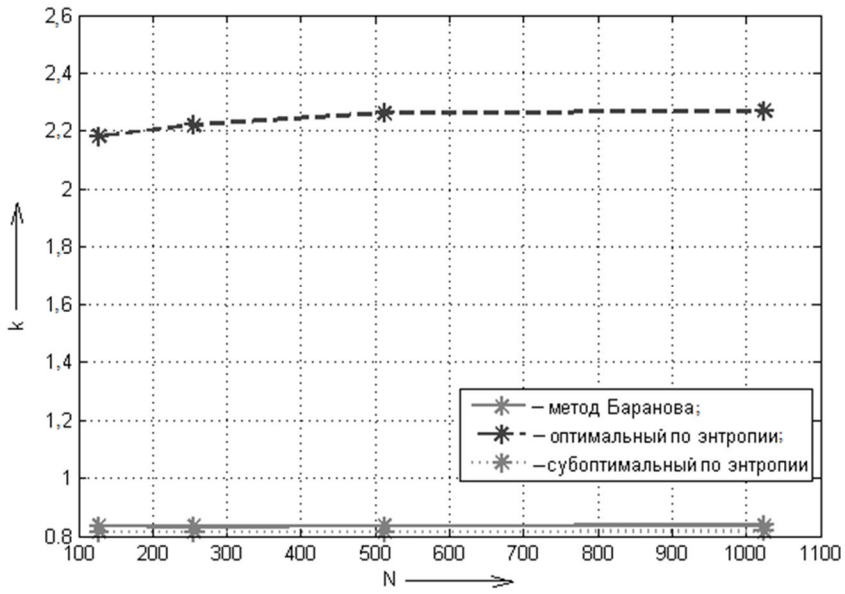


Рисунок 4 – Зависимости отношения ошибки квантования от числа уровней квантования для различных методов квантования

Таким образом, в результате проведенных экспериментов были вычислены СКО шума при различных методах квантования, выполнено сравнение методов и вычислены отношения их СКО квантования к СКО равномерного квантования. В случаях, когда величина интервала квантуемых значений в четыре раза и более превышает значение σ, для методов Баранова и субоптимального по энтропии наблюдается снижение ошибки в сравнении с методом равномерного квантования. Для метода максимальной энтропии, наоборот, происходит увеличение величины СКО ошибки квантования, что компенсируется максимизацией энтропии выходного сигнала [1]. Субоптимальный метод, как объединяющий преимущества вычислительной простоты реализации и минимизации шума квантования, можно считать наилучшим для большинства случаев применения, когда требуется минимизировать ошибку или сократить количество двоичных разрядов в цифровом представлении сигнала.

Изучение различных методов квантования и их анализ позволяют выбрать структуру системы принятия решений, позволяющей решить задачу нелинейного квантования наиболее оптимальным способом (в соответствии с заданными критериями) и в зависимости от вида исходного сигнала. Разработанные алгоритмы проведения вычислительных экспериментов и методики проведения сравнительного анализа являются основной составляющей частью таких автоматизированных систем.

Список литературы

1. Cover, T. M. Elements of information theory / T. M. Cover, J. A. Thomas. – Wiley-Interscience, 2006. – 748 p.

2. Грицутенко, С. С. Метод линеаризации характеристики преобразования АЦП [Текст] / С. С. Грицутенко, А. Г. Панюков // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2012. – № 1 (9). – С. 78 – 84.

3. Сидоренко, А. С. Ограничения алгоритмов параллельных вычислений в цифровой обработке сигналов [Текст] / А. С. Сидоренко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – № 3 (3). – С. 89 – 94.

4. Лаврухин, А. А. Эффективная программная реализация помехоустойчивых блоковых кодов современными микропроцессорными средствами [Текст] / А. А. Лаврухин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – №1 (1). – С. 86 – 91.

5. Грицутенко, С. С. Критерии оптимальности для неравномерного квантования в задачах уплотнения цифровых каналов связи [Текст] / С. С. Грицутенко, А. А. Лаврухин, С. В. Панькин // Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – С. 214 – 219.

6. Баранов, Л. А. Квантование по уровню и временная дискретизация в цифровых системах управления [Текст] / Л. А. Баранов. М.: Энергоатомиздат, 1990. – 304 с.

УДК 004.942

К. А. Королёва

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ОПТИМАЛЬНОЙ ИНТЕРПОЛЯЦИИ ВЕКТОРОМ, НЕЙТРАЛЬНЫМ ПО СВЕРТКЕ В ПРИЕМНОМ ТРАКТЕ КОММУНИКАЦИОННОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В статье исследуется задача интерполяции сигналов нейтральным по свертке вектором. Предложен метод интерполяции, имеющий оптимальный результат в смысле равномерного распределения ошибки интерполяции в спектральной области. Представлены результаты численного эксперимента. Показана эффективность предложенного метода в смысле повышения точности восстановления дискретного сигнала в приемном тракте коммуникационного железнодорожного оборудования.

В настоящее время цифровые методы представления и обработки сигналов составили основу управляющей, телекоммуникационной и измерительной техники, применяемой на железнодорожном транспорте [1 – 4]. В используемых электронных устройствах реальные непрерывные сигналы $x(t)$ (являющиеся континуальными функциями) представляются дискретными числовыми значениями $x(nT)$, т. е. набором их значений в узловых точках, взятых через равные промежутки. Но на практике часто могут понадобиться значения сигнала и в других, отличных от узловых, точках. Например, в случае пересчета частоты дискретизации (resampling) необходимо по отсчетам сигнала $x(nT_1)$ вычислять отсчеты $x(nT_2)$. Подобное вычисление значений функции $x(t)$ в промежуточных точках, между узловыми значениями, является задачей интерполяции. В состав оборудования, применяемого на железнодорожном транспорте, входят измерительное оборудование, устройства связи и другие электронные приборы, использующие различные методы интерполяции сигналов. Однако потенциально возможные характеристики устройств для обработки сигналов могут быть ухудшены на этапе цифроаналогового преобразования из-за ошибок при восстановлении сигнала. Для уменьшения таких ошибок разработаны методы восстановления сигналов на основе различных видов интерполяции.

Целью статьи является описание способа оптимальной интерполяции, в смысле равномерного распределения ошибки интерполяции в спектральной области, нейтральным по свертке вектором [5 – 7].

Сегодня на практике ввиду более простой реализации наиболее распространено использование полиномиальной интерполяции, при которой рассматриваемую функцию $f(t)$ представляют в виде интерполяционного многочлена:

$$f(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + \ldots + a_{N-1} t^{N-1} = \sum_{k=0}^{N-1} a_k \cdot t^k , \qquad (1)$$

Данный многочлен в узловых точках $t = nT$ принимает значения, равные $f(nT)$. Для реализации задачи полиномиального интерполирования для N узловых точек составляют систему линейных уравнений N-го порядка:

$$\begin{cases} a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + \ldots + a_{N-1} T^{N-1} = f(T); \\ a_0 + a_1 2T + a_2 (2T)^2 + \ldots + a_{N-1} (2T)^{N-1} = f(2T); \\ a_0 + a_1 3T + a_2 (3T)^2 + \ldots + a_{N-1} (3T)^{N-1} = f(3T); \\ \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \\ a_0 + a_1 NT + a_2 (NT)^2 + \ldots + a_{N-1} (NT)^{N-1} = f(NT). \end{cases} \quad (2)$$

Таким образом, в результате решения системы (2) получают N значений коэффициентов a_k. Степень интерполяционного многочлена в этом случае будет равна $N - 1$. Точность полиномиальной интерполяции непосредственно зависит от порядка интерполяционного многочлена. Однако при большой степени многочлена решение системы (2) требует большого объема вычислений.

Кроме того, как было показано в источнике [8], в случае использования интерполяционных многочленов ошибка интерполяции группируется в области высоких частот, как это представлено на рисунке 1. В данной работе интерполяции с использованием полиномов разных степеней подвергался синусоидальный сигнал. На графике отображался уровень максимальной гармоники интерполированного сигнала в зависимости от частоты этого сигнала. Таким образом, в смысле равномерности спектра ошибки в частотной области данный вид интерполяции считаться оптимальным не может.

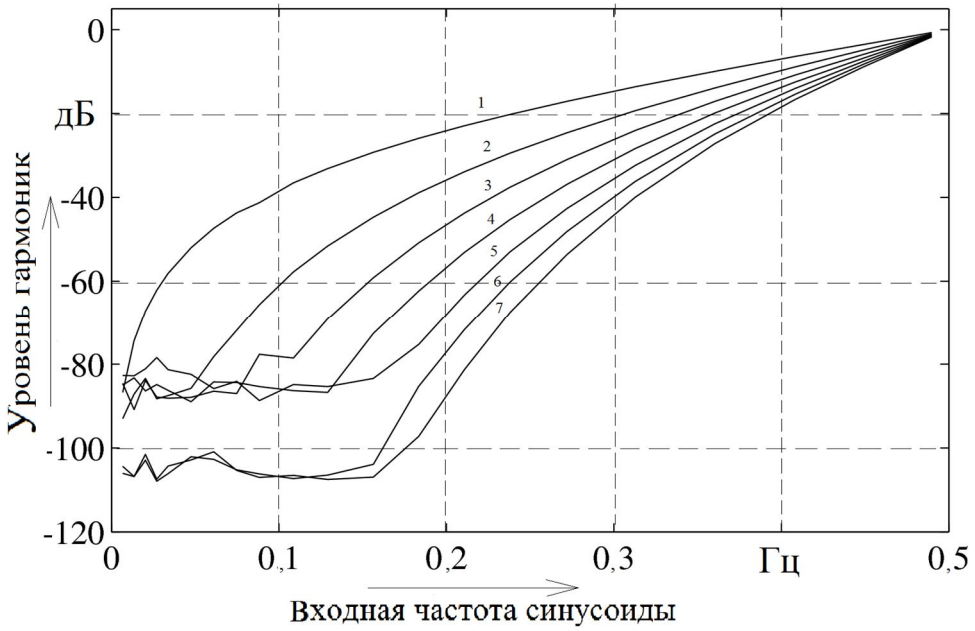


Рисунок 1 – Зависимость ошибки интерполяции синусоиды от ее частоты полиномами 1-й, 3-й, 5-й, 7-й, 9-й, 11-й и 13-й степени

Для уменьшения ошибки в области высоких частот за счет некритичного ее увеличения на низких частотах предлагается использовать интерполяцию нейтральным по свертке вектором. Известно, что спектр дискретизированного сигнала представляет собой сумму сдвинутых копий исходного непрерывного аналогового сигнала с шагом сдвига, равным частоте дискретизации. Очевидно, что если спектры копий не перекрываются, то по центральной копии спектра дискретного сигнала можно с абсолютной точностью восстановить исходный сигнал. Так как интерполяция противоположна дискретизации, по сути восстановление исходного аналогового сигнала по его выборкам может быть осуществлено с помощью идеального низкочастотного фильтра:

$$x(n-\Delta t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(n-k) \frac{\sin \pi (k-\Delta t)}{\pi (k-\Delta t)}, \quad (3)$$

где $x(n)$ – исходные отсчеты сигнала в узловых точках; $x(n-\Delta t)$ – интерполированные отсчеты сигнала, смещенные относительно исходных на величину Δt.

Восстановление сигнала производится при помощи функции sinc, которая имеет бесконечную протяженность по времени и достигает максимального значения, равного единице, в нуле. Реализация фильтра с бесконечной импульсной характеристикой $\frac{\sin\pi(k-\Delta t)}{\pi(k-\Delta t)}$ невозможна в контексте обработки сигналов, а ограничение области суммирования функций sinc прямоугольным окном приводит к появлению эффекта Гиббса в восстановленной функции. Наилучшим методом сглаживания резкого нарушения непрерывности функции sinc на границах интервала, ограничивающего функцию sinc, является использование оконных функций. Умножив функцию sinc на окно, резкость перепада усеченных концов становится меньше. В рассмотренном ниже примере использовано окно Чебышева $w_{cheb}(i)$ длины N. Соответственно, при восстановлении сигнала $x(n-\Delta t)$ возникнет ошибка $\eta(n)$:

$$x(n+\Delta t)+\eta(n)=\sum_{k=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} x(n-k)\frac{\sin\pi(k+\Delta t)}{\pi(k+\Delta t)}w_{cheb}(n).$$

На рисунке 2 приведен спектр ошибки $\eta(n)$.

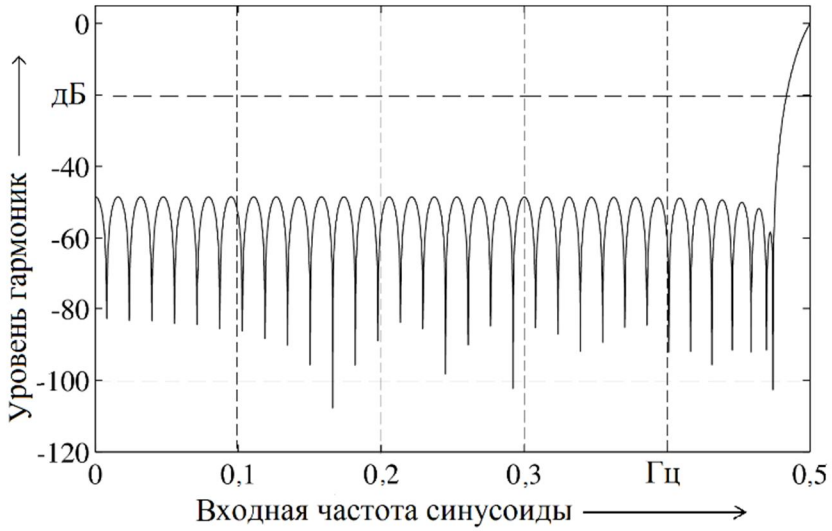


Рисунок 2 – Спектр ошибки интерполяции при использовании нейтрального по свертке вектора

Однако при реализации КИХ-фильтра с импульсной характеристикой $\frac{\sin\pi(k+\Delta t)}{\pi(k+\Delta t)}w_{cheb}(n)$ возникает эффект смещения нуля частотной характеристики ошибки интерполяции, как это показано на рисунке 3, т. е. у спектра $\eta(n)$ появляется систематическая составляющая. Соответственно избавившись от этой составляющей, можно повысить точность интерполяции. Такое смещение вызвано резким нарушением непрерывности на концах усеченной функции sinc в связи с ограничением бесконечной по времени функции sinc окном и, как следствие, с усечением ряда Фурье частотной характеристики фильтра. Уменьшение рассматриваемого интервала N не решает данную проблему, так как существенную роль играет нарушение непрерывности.

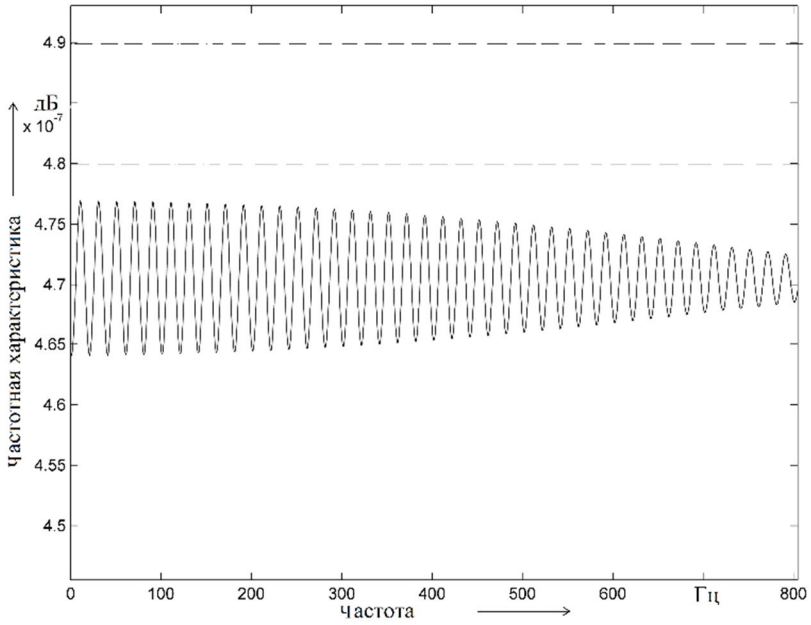


Рисунок 3 – Смещение нуля частотной характеристики фильтра

Для того чтобы решить задачу смещения оси колебаний спектра, предлагается следующий алгоритм. Вычисляются максимальное и минимальное значения колебаний на интервале *N/3* и их среднее. Это значение принимаем за систематическую составляющую ошибки и нормируем значение спектра относительно данного значения. Так, ось симметрии колебаний ошибки смещается на нулевой уровень (рисунок 4).

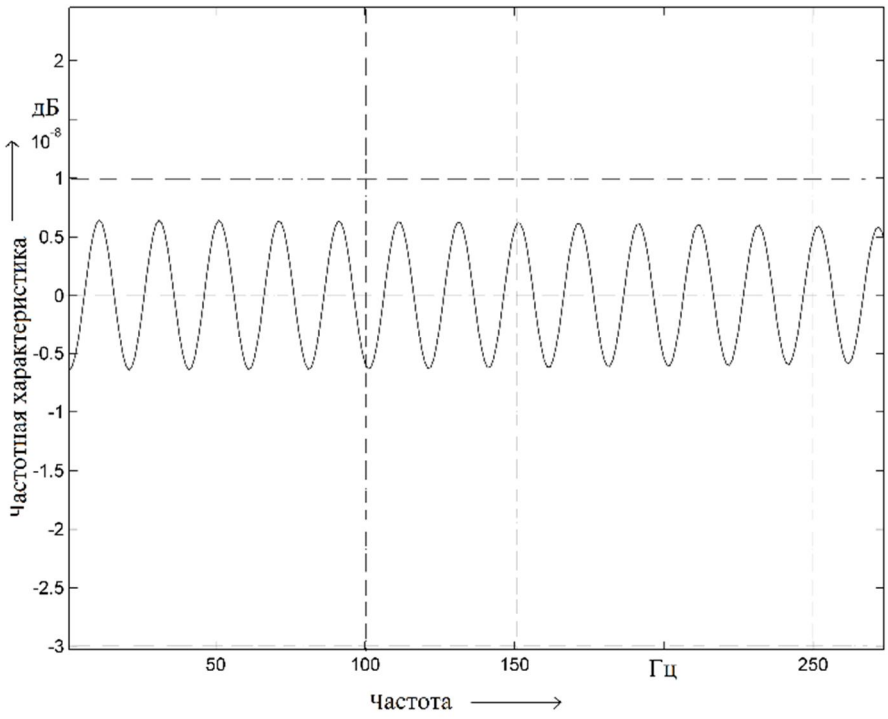


Рисунок 4 – Нормированная частотная характеристика фильтра

Исследуем получившийся фильтр. В качестве дискретного сигнала зададим синусоиду $y = \sin\left(\frac{2\pi}{N}n + \frac{\pi}{10}\right)$ с числом отсчетов 20 (пусть $-\frac{N}{2} < n < \frac{N}{2} - 1$). Интерполяция синусоиды с частотой, равной четырем, представлена на рисунке 5.

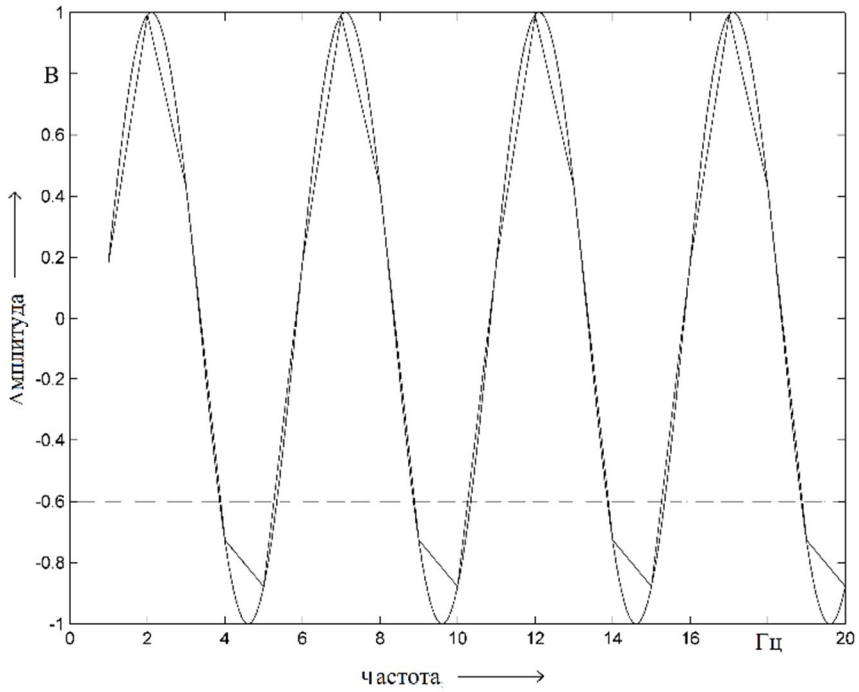


Рисунок 5 – Исходная и восстановленная синусоиды при $f = 4$

Отсчеты функции являются узловыми точками. В интервале между отсчетами (узловыми точками) ограниченный окном sinc имеет ненулевые значения. Суперпозицией этих значений по текущим значениям в момент времени t от всех sinc, максимумы которых доходят до данного значения узлового отсчета в t, и образуются значения восстановленного аналогового сигнала в интервалах между отсчетами (узловыми точками). Таким образом, результатом интерполяции является функция с большим числом промежуточных значений.

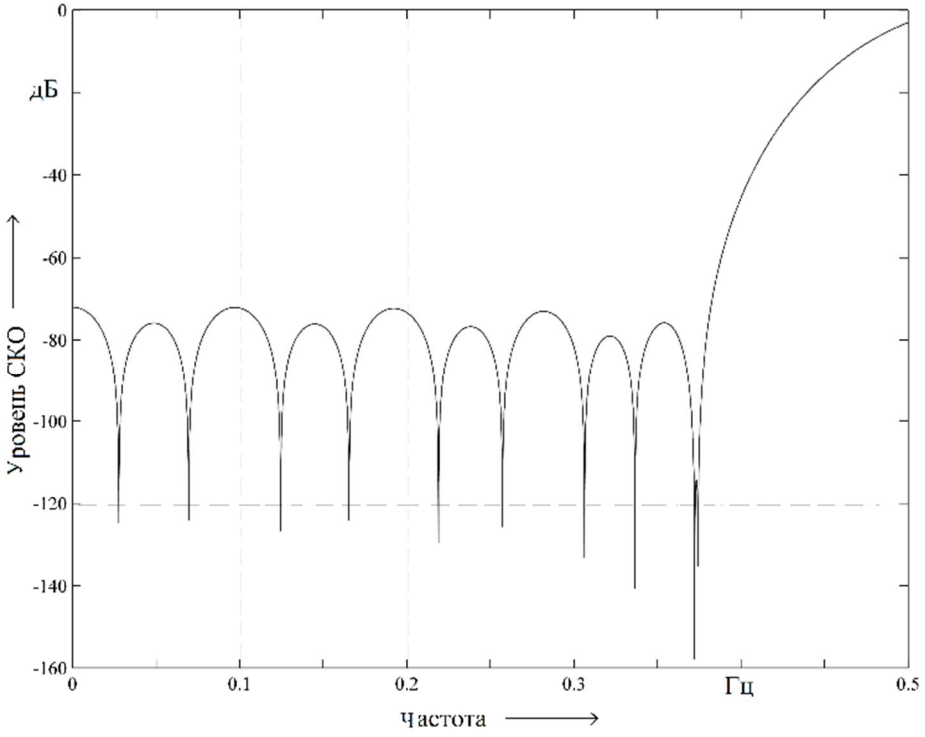


Рисунок 6 – Среднеквадратичная ошибка интерполяции значений сигнала при использовании вектора, нейтрального по свертке

Важными задачами обработки сигналов является восстановление (интерполяция), а также оптимальное размещение точек наблюдения (узловых точек) при сохранении минимальной ошибки интерполяции. При этом одной из задач является оценка потенциально достижимой точности интерполяции. Очевидно, наибольшая погрешность интерполяции имеет место в центре, между отсчетами (узлами интерполяции), как наиболее удаленной точке от всех наблюдений.

Далее, чтобы проследить графически среднеквадратичную ошибку интерполяции на разных частотах, изменяем частоту синусоиды от единицы до половины частоты дискретизации с единичным шагом именно в середине между узловыми точками.

Для вычисления среднеквадратичной ошибки все ошибки для каждого отсчета возводятся в квадрат и суммируются, сумма делится на общее число отсчетов, затем из этого выражения извлекается квадратный корень. Полученное в результате число характеризует суммарную ошибку, значения которой на разных частотах отложены по вертикальной оси на рисунке 6.

Анализируя полученный график распределения среднеквадратичной ошибки интерполяции, можно сделать вывод о том, что по сравнению с интерполяцией полиномами произошло ухудшение значений среднеквадратичной ошибки интерполяции на низких частотах. Однако при увеличении частоты сигнала уровень ошибки не изменяется и остается таким же, как и на низких частотах. Другими словами произошло равномерное распределение ошибки интерполяции на всем частотном диапазоне. Такое распределение может считаться оптимальным. При интерполяции сигналов с частотой, меньшей половины частоты дискретизации, восстановленный сигнал будет повторять исходный с одинаковой точностью вне зависимости от частоты, кроме частот, близких к половине частоты дискретизации, где ошибка интерполяции резко возрастает. Следовательно, представленный метод, использующий дельта-вектор [6, 7], имеет преимущество перед методом интерполяции полиномами, за исключением низкочастотных сигналов.

Список литературы

1. Грицутенко, С. С. Адекватность использования аналогий в цифровой обработке сигналов [Текст] / С. С. Грицутенко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – № 2 (2). – С. 80 – 86.

2. Грицутенко, С. С. Компенсация эффекта Доплера в OFDM-сигнале / С. С. Грицутенко, А. С. Сидоренко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2012. – № 3 (11). – С. 100 – 105.

3. Грицутенко, С. С. Метод линеаризации характеристики преобразования АЦП [Текст] / С. С. Грицутенко, А. Г. Панюков // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2012. – № 1 (9). – С. 78 – 83.

4. Фирсанов, К. А. Основные подходы, используемые при создании высокопроизводительных библиотек математических функций для цифровых сигнальных процессоров с фиксированной точкой [Текст] / К. А. Фирсанов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2011. – № 4 (8). – С. 79 – 87.

5. Грицутенко, С. С. Введение понятия «дельта-вектор» в пространстве Гильберта для корректного представления данных в информационных системах [Текст] / С. С. Грицутенко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – № 1 (1). – С. 73 – 78.

6. Грицутенко, С. С. Дельта-вектор в пространстве Гильберта [Текст] / С. С. Грицутенко // Труды. Сер. Цифровая обработка сигналов и ее применение / Российское науч.-техн. общество радиотехники, электроники и связи им. А. С. Попова. – М., 2010. – Вып. XII-1. – С. 141 – 144.

7. Грицутенко, С. С. Векторы с фильтрующим свойством в сверточных алгебрах [Текст] / С. С. Грицутенко // Вестник Ижевского гос. техн. ун-та / Ижевский гос. техн. ун-т. – Ижевск, 2010. – № 2 (46). – С. 146 – 149.

8. Biberdorf, E. A new principle of dynamic range expansion by analog-to-digital converting / E. Biberdorf, S. Gritsutenko, K. Firsanov – Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'09). – Kharkov National University of Radioelectronics . – Moscow. Russia. September 18–1. 2009. P. 193 – 195.

УДК 621.3

А. А. Любченко, С. Г. Разумный, И. А. Никитин

АНАЛИЗ ОТКАЗОВ ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ РАДИОСВЯЗИ

В статье проанализировано текущее состояние систем технологической радиосвязи, приведены перспективы их развития, обоснована необходимость дальнейшего использования аналоговых каналов радиосвязи. Выполнен анализ статистических данных об отказах оборудования радиосвязи, используемого на Южно-Уральской железной дороге.

Технологическая радиосвязь в ОАО «Российские железные дороги» предназначена для повышения безопасности движения поездов, оперативного управления перевозочным процессом и для **передачи данных в информационно-управляющих системах.** Она подразделяется на поездную, станционную (маневровую) и ремонтно-оперативную радиосвязь. Непрерывная двусторонняя поездная радиосвязь (ПРС) осуществляется между поездным диспетчером и машинистами локомотивов, находящихся в пределах диспетчерского участка; между машинистом локомотива, расположенного на перегоне, и дежурным по ближайшей станции, а также между машинистами встречных поездов. Станционная радиосвязь применяется при выполнении маневровых работ в пределах территории станции (маневровая связь), роспуске и сортировке вагонов (горочная связь). Системы ремонтно-оперативной радиосвязи предназначены для оперативного управления ремонтно-восстановительными работами на железнодорожных перегонах [1].

В зависимости от территориального размещения абонентов связи относительно подвижного локомотива технологическая радиосвязь подразделяется на два вида: линейная и зонная радиосвязь. В настоящее время на железнодорожном транспорте используются преимущественно линейные сети симплексной поездной радиосвязи гектометрового (2150 и 2130 кГц) диапазона и зоновые (в пределах станций и прилегающих к ним перегонов) сети симплексной поездной и станционной радиосвязи метрового (151,72-156,000 МГц) диапазона. Эти аналоговые радиосети предназначены главным образом для передачи речевых сообщений. Им присущи следующие недостатки: ограниченные функциональные возможности; значительное влияние радиопомех на качество связи; проблемы в обеспечении электромагнитной совместимости радиосредств, особенно в крупных узлах; сложности в эксплуатации, обусловленные невысокой надежностью и разнообразием применяемых устройств [2]. Очевидно, что сложившаяся ситуация ограничивает развитие современных технологий организации эксплуатации железных дорог, систем автоматического управления движением и безопасности, препятствует повышению пропускной способности железных дорог.

В соответствии со стратегическими направлениями научно-технического развития ОАО «РЖД» до 2030 г. одной из целей модернизации сети железных дорог является создание единого информационного пространства, интегрированного с информационными системами других видов транспорта и промышленности иностранных железных дорог. Достижение данной цели возможно на основе систем цифровой радиосвязи. Наиболее известными стандартами цифровой радиосвязи и в большинстве случаев применяемыми в зарубежных странах являются транкинговая радиотелефонная связь TETRA и сотовая беспроводная связь GSM-R.

Опыт ОАО «РЖД» по строительству двух зон цифровой системы радиосвязи стандарта TETRA на участках Свердловской и Октябрьской железных дорог показал, что существующие системы TETRA не отвечают требованиям «РЖД» к цифровым системам радиосвязи. Это связано с отсутствием специализированных железнодорожных приложений и оборудования, что требует значительных доработок аппаратуры и программного обеспечения [3]. Радиосети стандарта GSM-R работают лишь на опытном полигоне участка Нестеров – Калининград – Балтийск Калининградской железной дороги. Во многом это связано с влиянием экономических факторов, ограничивающих возможности реализации дорогостоящих цифровых систем [4]. При этом ведущие специалисты ОАО «НИИАС» отмечают, что с учетом большого парка аналоговых сетей и ограничения объемов инвестиций в нынешних условиях переход на существенно более дорогие цифровые технологии на всем протяжении железных дорог в ближайшее время практически невозможен – он требует значительных временных и финансовых ресурсов [2]. Таким образом, аналоговые каналы (гектометровый диапазон) еще долгое время будут основой при организации поездной радиосвязи, применяемой на 95 % протяженности всех железных дорог Российской Федерации.

В настоящее время системы технологической радиосвязи на сети железных дорог Российской Федерации, как правило, построены с использованием аналогового малоканального оборудования, работающего в гектометровом и метровом диапазонах по принципу «одна частота – один канал». В частности, информационный обмен в сетях поездной радиосвязи осуществляется с помощью стационарных и возимых радиостанций третьего и четвертого поколения. При этом парк стационарных и возимых радиостанций ОАО «РЖД» составляет около 31 и 60 тысяч единиц оборудования, соответственно [5]. Радиостанции стационарные (РС) необходимы для связи диспетчеров с машинистами поездных локомотивов, а также руководителей ремонтных подразделений с диспетчерским аппаратом соответствующих служб и применяются в системах линейной поездной и ремонтно-оперативной симплексной радиосвязи. Радиостанция возимая (РВ) устанавливается на подвижных объектах железнодорожного транспорта и предназначена для связи машинистов с диспетчерским аппаратом соответствующих служб, руководителями ремонтных подразделений и работает в сетях связи с групповым вызовом. Широкое распространение получили радиостанции стационарные – РС-46М, РС-46МЦ, возимые – РВ-1М, реже – РВ-1МЦ.

Стационарная радиостанция РС-46М (Владимирского завода «Электроприбор», разработки «Владимирского КБ радиосвязи») предназначена для работы в системе линейной и зонной поездной радиосвязи, управляется по двух- или четырехпроводной линии связи со стороны вызывного устройства – распорядительной станции СР-234М. Внешний вид радиостанции РС-46М представлен на рисунке 1,а.

а б

Рисунок 1 – Внешний вид радиостанции: а – РС-46М и РС-46МЦ; б – РВ-1М

Современная стационарная радиостанция РС-46МЦ производства Ижевского радиозавода в отличие от ее предшественницы РС-46М может работать как в аналоговых линейных сетях, так и в цифровых, что обеспеченно наличием цифрового интерфейса и соответствующей обработки сигналов. Цифровая внутренняя структура РС-46МЦ имеет ряд преимуществ: гибкие алгоритмы обработки сигналов, возможность сопряжения с цифровым приемопередатчиком и др. Однако приемопередающие устройства РС-46МЦ частично сохранили свою структуру и аналоговую элементную базу.

Возимая дуплексно-симплексная радиостанция РВ-1М (Новосибирского завода «Электросигнал») используется для организации связи машинистов поездных локомотивов между собой, с диспетчерами, дежурными по станциям и другими абонентами, находящимися в поезде и рассредоточенными вдоль пути следования. Устанавливается на подвижных объектах железнодорожного транспорта: магистральных и маневровых локомотивах, мотор-вагонных поездах (электро- и дизель-поезда, рельсовые автобусы), специальном подвижном составе (мотовозы, дрезины, автомотрисы, путевые машины). Локомотивная радиостанция РВ-1М представлена на рисунке 1, б.

Усовершенствованная возимая радиостанция РВ-1МЦ, как и ее предшественница РВ-1М, предназначена для организации поездной, станционной и ремонтно-оперативной радиосвязи на железнодорожном транспорте в метровом, гектометровом и дециметровом диапазонах (ДМВ). В диапазоне ДМВ радиостанция РВ-1МЦ предоставляет возможность подключения приемопередатчика, работающего в цифровом стандарте TETRA.

В соответствии с п. 6.40 Правил технической эксплуатации железных дорог поездная радиосвязь должна обеспечивать надежную двустороннюю связь между абонентами радиосети. Высокая надежность электронных устройств железнодорожного транспорта обеспечивается комплексом взаимосвязанных мероприятий на всех этапах их проектирования, изготовления и эксплуатации. Методы повышения надежности электронной аппаратуры технологической радиосвязи подразделяют на три группы: конструктивные (при проектировании аппаратуры), технологические (при ее производстве) и эксплуатационные [6]. Одним из эксплуатационных методов обеспечения требуемого уровня надежности устройств технологической радиосвязи является проведение технического обслуживания. Более того, своевременное, правильно организованное техническое обслуживание на основе научно обоснованных методов – обязательное условие поддержания работоспособного состояния устройств радиосвязи. Такой способ повышения надежности имеет особое значение для железнодорожной аппаратуры, которая работает на локомотивах без постоянного наблюдения. Радиооборудование поездных локомотивов может быть проверено только во время нахождения локомотивов в депо, причем время осмотра часто ограничено. Все это осложняет обслуживание устройств ПРС и требует серьезного внимания и непрерывного совершенствования методов текущего обслуживания и моделей его организации. Для совершенствования разработанных ранее моделей оптимизации технического обслуживания устройств радиосвязи [7 – 9] необходим анализ отказов радиостанций, находящихся в данный момент в эксплуатации.

Анализ отказов производился по данным, предоставленным контрольно-ремонтным пунктом (КРП) Челябинского регионального центра связи (РЦС-1) Южно-Уральской железной дороги (ЮУЖД) за 2010 и 2011 гг. Диаграмма, показывающая общее количество аппаратуры в РЦС-1 ЮУЖД, представлена на рисунке 2.

На основе анализа полученных данных об использовании средств технической радиосвязи выявлено, что наиболее часто в РЦС-1 ЮУЖД используются носимые радиостанции. Это обусловлено тем, что эти радиостанции выдаются большому количеству работников, которые непосредственно работают на перегоне, на станции, в депо, тогда как стационарные и возимые радиостанции устанавливаются в кабинах локомотивов, кабинетах диспетчеров и дежурных по станциям.

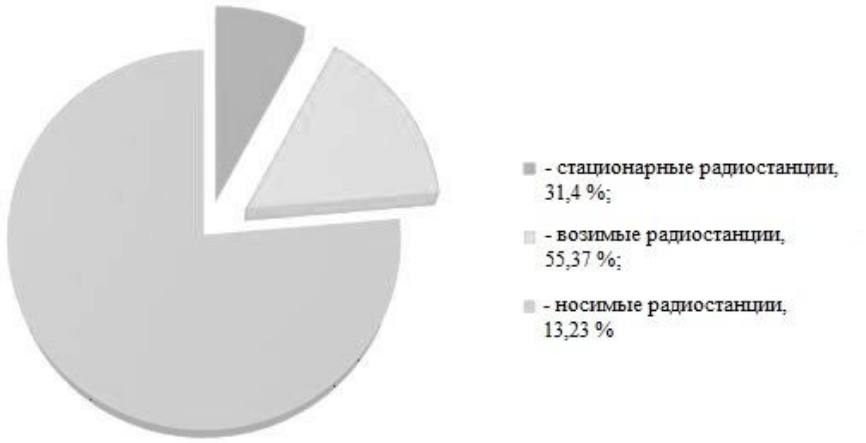


Рисунок 2 – Общее количество радиостанций, обслуживаемых в КРП РЦС-1 ЮУЖД

Диаграмма, демонстрирующая общее количество отказов по видам аппаратуры в РЦС-1 ЮУЖД, представлена на рисунке 3.

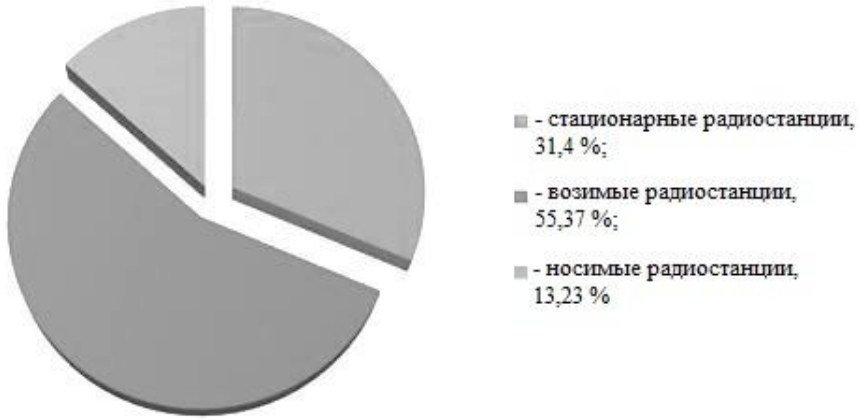


Рисунок 3 – Общее количество отказов по видам аппаратуры

Проанализировав диаграмму на рисунке 3, можно сделать вывод о том, что носимые радиостанции имеют самый высокий уровень надежности, так как в основном все они импортного производства. Самое большое количество отказов у возимых радиостанций, это обусловлено тяжелыми условиями их эксплуатации.

Гистограмма по неисправностям аппаратуры, выявленные при проверке в КРП РЦС-1 ЮУЖД за 2010 и 2011 гг., представлена на рисунке 4.

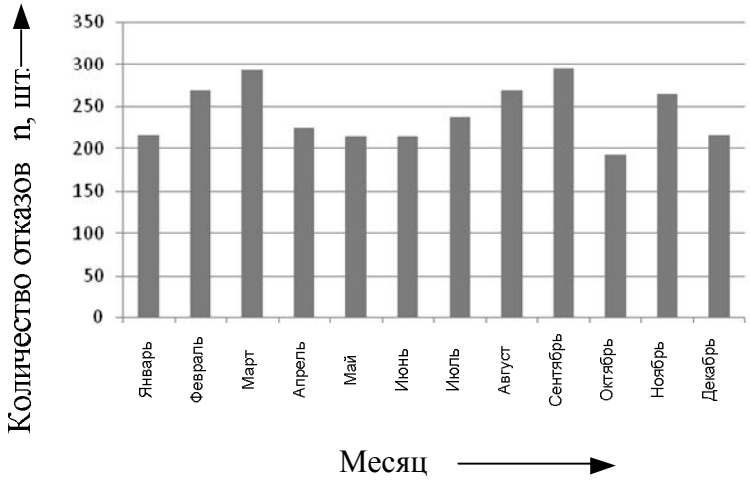


Рисунок 4 – Количество выявленных отказов аппаратуры за 2010 и 2011 г.
в КРП РЦС-1 ЮУЖД

Данные гистограммы на рисунке 3 свидетельствуют о сезонной тенденции отказов радиостанций. Наибольшее количество отказов происходит весной и осенью.

Разделив все радиостанции на стационарные, возимые и носимые, можно выделить три радиостанции, наиболее используемые в РЦС-1 ЮУЖД по каждому из типов, это РВ-1.1М, РС-46МЦ и носимые радиостанции фирмы MOTOROLA серии GP.

Рассмотрим распределение количества отказов радиостанции РВ-1М по составляющим ее блокам: антенно-согласующее устройство (АнСУ), блок автоматики (БА), блок питания локомотивный (БПЛ), блок питания возимый (БПВ), громкоговоритель (ГГ), приемопередатчик коротких волн (ППК), приемопередатчик ультракоротких волн (ППУ), дополнительный пульт управления (ПУ-Д), основной пульт управления (ПУ-ЛП), микротелефонная трубка (МТ), коробка распределительная (КР), гибкий шнур с изоляцией жил из резины в оплетке (ШРО).

Гистограмма отказов по блокам радиостанции РВ-1.1М представлена на рисунке 5.

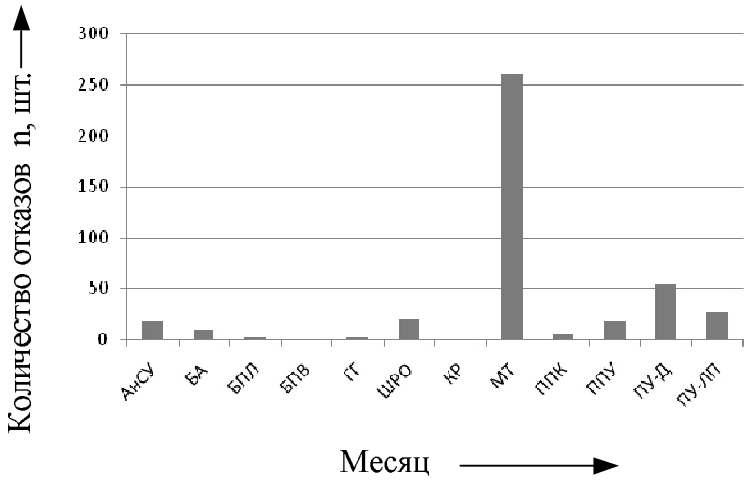


Рисунок 5 – Гистограмма отказов по блокам радиостанции РВ-1.1М

Как видно из приведенной на рисунке 5 гистограммы, наиболее часто отказывает МТ, что связано в первую очередь с механическими повреждениями при эксплуатации.

Рассмотрим распределение количества отказов радиостанции РС-46МЦ по составляющим ее блокам: АнСУ, МТТ, устройство радиопроводного оборудования (РПО), устройство ввода и защиты (УВЗ), ячейка электропитания (ЭП), пульт управления стационарный (ПУС), приемопередатчик (УПП1 и УПП2), цифроаналоговое устройство (ЦАУ), адаптер четырехпроводного канала (АПК-4), шнур МТТ.

Гистограмма отказов по блокам радиостанции РС-46МЦ представлена на рисунке 6.

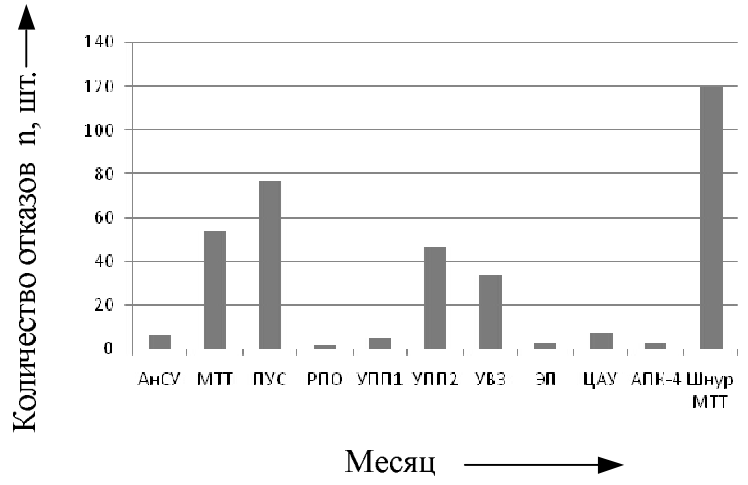


Рисунок 6 – Гистограмма отказов по блокам радиостанции РС-46МЦ

Как видно из приведенной на рисунке 6 гистограммы наиболее, часто отказывают шнуры МТТ, МТТ и ПУС. Наиболее часто эти поломки происходят из-за механических повреждений в ходе работы с радиостанцией.

Носимые радиостанции фирмы MOTOROLA серии GP намного чаще используются в работе, чем отечественные аналоги, это легко объясняется их более высокой надежностью и, как результат, меньшим количеством отказов. Анализ отказов радиостанций данного типа за 2011 г. в РЦС-1 ЮУЖД показал, что наиболее уязвимыми элементами аппаратуры являются антенна и манипулятор. Гистограмма неисправностей для данного типа радиостанций представлена на рисунке 7.

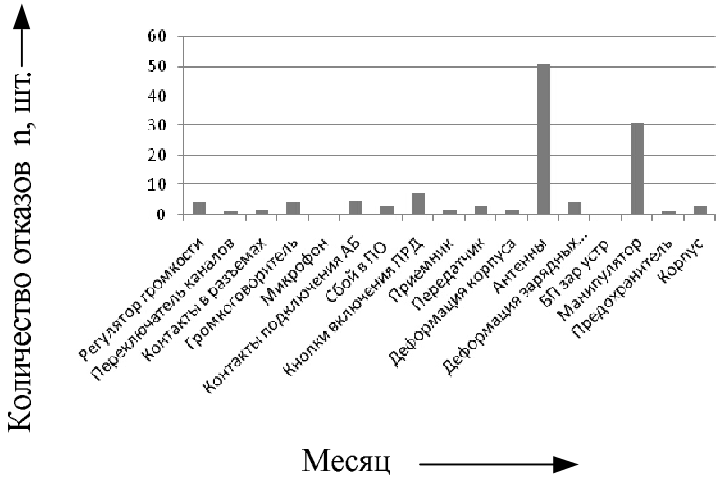


Рисунок 7 – Гистограмма отказов по блокам носимых радиостанций фирмы MOTOROLA

Исходя из данных гистограммы можно сделать вывод о том, что механические повреждения также преобладают для радиостанций указанной марки, наиболее часто выходят из строя антенна и манипулятор.

Таким образом, наибольшее количество отказов всех типов радиостанций обусловлено механическими повреждениями при эксплуатации, в большинстве случаев такие повреждения возникают в результате небрежного обращения персонала с аппаратурой. Нельзя не отметить сезонность отказов, различные погодные условия также негативно влияют на работоспособность радиостанций. Выявленные особенности характера отказов радиостанций должны быть учтены при организации их технического обслуживания (ТО). Поэтому существующие модели оценки периодичности ТО требуют учета человеческого фактора и сезонности отказов средств технологической радиосвязи.

Список литературы

1. Горелов, Г. В. Радиосвязь с подвижными объектами железнодорожного транспорта [Текст] / Г. В. Горелов, Ю. И. Таныгин. – М.: Маршрут, 2006. – 263 с.

2. Воронин, В. Особенности развития технологической радиосвязи ОАО «РЖД» на современном этапе [Текст] / В. Воронин, А. Вериго // Connect! Мир связи. – М.: Connect!, 2009. – № 3.

3. Слюнтяев, А.Н. Технологическая радиосвязь: текущее состояние и перспективы развития [Текст] / А. Н. Слюнтяев // Connect! Мир связи. – М.: Connect!, 2007. – № 3.

4. Климова, Т. В. Особенности построения системы GSM-R ОАО «РЖД» [Текст] / Т. В. Климова // Автоматика, связь, информатика. – М., 2008. – № 12. – С. 25, 26.

5. Воронин, В. Проблемы модернизации технологической радиосвязи [Текст] / В. Воронин // Connect! Мир связи. – М.: Connect!, 2002. – № 7.

6. Радиотехнические системы железнодорожного транспорта: Учебник [Текст] / Ю. В. Ваванов, А. В. Елизаренко и др. – М.: Транспорт, 1991. – 303 с.

7. Любченко, А. А. Алгоритмы автоматизации проектирования регламента планового обслуживания изделий промышленной радиосвязи [Текст] / А. А. Любченко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2012. – № 1 (9). – С. 84 – 92.

8. Любченко, А. А. Анализ процессов технического обслуживания элементов сложных технических систем [Текст] / А. А. Любченко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2011. – № 1 (5). – С. 88 – 94.

9. Лутченко, С. С. Моделирование процессов технического обслуживания радиостанций в среде ANYLOGIC [Текст] / С. С. Лутченко, Е. Ю. Копытов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – № 2 (2). – С. 86 – 92.

УДК 621.396.963

В. С. Марюхненко, Ю. Ф. Мухопад

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТНОЙ ЛОГИСТИКИ ОБРАБОТКОЙ НАВИГАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

В контексте решения задачи формирования и соблюдения транспортных коридоров для подвижного состава и совершенствования технологии перевозок различными видами транспорта рассмотрена минимизация геометрического фактора в позиционной навигации, исследованы особенности определения погрешностей координат подвижных объектов вдоль физически фиксированных траекторий, доказано утверждение об апостериорном восстановлении траектории подвижной точки при измерениях одной координаты.

Транспортная логистика как практика планирования, управления и контроля движением материальных, информационных и финансовых ресурсов предполагает поиск максимума эффективности перевозок. В конкретных условиях применения транспортного средства это является определяющим для структурного синтеза комплексной навигационной системы [1, 2]. Поэтому целесообразен поиск различных алгоритмов повышения точности навигационных определений. Для этого предлагается исследовать особенности линий положения позиционной навигации, навигацию подвижных управляемых объектов с «жесткими» траекториями и особенности навигации с одномерными измерениями.

Целью настоящей статьи является разработка алгоритмов третичной обработки навигационных измерений для решения задач минимизации погрешностей определения координат подвижного объекта.

Свойства и оптимизация сочетаний линий положения второго порядка в позиционной навигации. Позиционная навигация основана на определении координат объекта путем поиска точки пересечения линий (поверхностей) положения (ЛП). Погрешность определения координат при позиционировании объекта на плоскости зависит от коэффициента геометрии [3, 4]:

$$K_{\text{г}} = 1/(\sin\theta), \qquad (1)$$

где $\theta \le \pi/2$ – угол взаимного пересечения ЛП.

Целесообразно рассмотреть сочетания ЛП, минимизирующие коэффициент геометрии (1).

Определение 1. Линия положения на земной поверхности – это геометрическое место точек, в которых навигационный параметр P, *измеренный* по наблюдениям для определения положения наблюдателя, имеет то же значение, что и в точке наблюдений.

В такой формулировке ЛП – результат графических построений, отличающихся относительной простотой, так как следуют непосредственно из навигационных измерений (рисунок 1). Пересечение двух ЛП, проложенных на карте, позволяет определить местоположение наблюдателя [2, 3, 5].

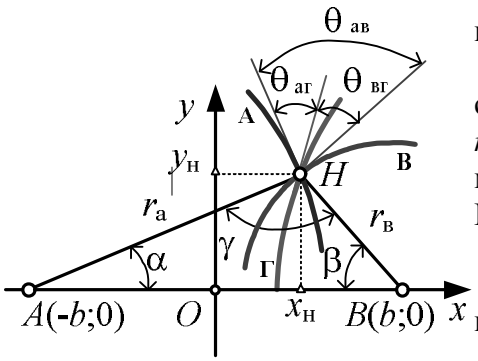


Рисунок 1 – Принцип навигации по измерению расстояний до двух радиомаяков

Предлагается уточнение определения ЛП и дополнение кривых позиционирования.

Определение 2. Линия положения на земной поверхности – это геометрическое место точек, в которых *измеренный* или *вычисленный* по результатам наблюдений параметр P имеет то же значение, что и в точке наблюдений. Из него следует, что ЛП могут служить кривые

$$y_i(x,P_i) = 0, \quad i = 1, 2, 3, \ldots, m, \qquad (2)$$

пересекающиеся в точке навигации $H(x_н,y_н)$.

Из множества (2) образуется q подмножеств (сочетаний) пар линий:

$$q = C^2_m = m!/\, m(m-2)!. \qquad (3)$$

Оптимальной следует считать пару ЛП $y_i(x, P_i)$, $i = 1, 2, 3, \ldots, m$, и $y_k(x,P_k)$, $k = 1, 2, 3, \ldots, m$, $i \neq k$, с углом пересечения касательных к ним в точке навигации $\theta_{ik} \approx \pi/2$.

Исходные данные для вычисления линий положения.

Если радиомаяки, расположенные в точках $A(-b;0)$ и $B(b;0)$, координаты которых известны с высокой точностью (см. рисунок 1), излучают сигналы точного времени, то в точке H для навигации доступны псевдодальности r_A и r_B: $r_A = cT_A$; $r_B = cT_B$, где T_A и T_B – промежутки времени, измеряемые часами на борту подвижного объекта:

$$T_A = t_{Aи} - t_{Aп}\ ; \quad T_B = t_{Bи} - t_{Bп}\ ,$$

где $t_{Aи}$, $t_{Bи}$ и $t_{Aп}$, $t_{Bп}$ соответственно моменты излучения радиосигналов из точек A, B и моменты приема радиосигналов в точке H; $c = 3\cdot10^8$ м/с – скорость света.

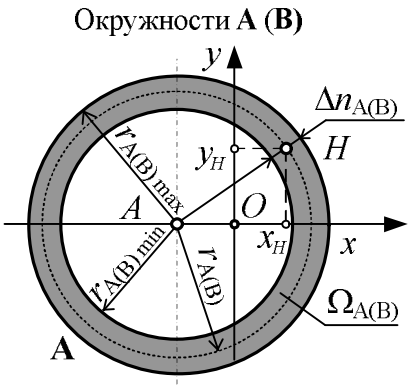


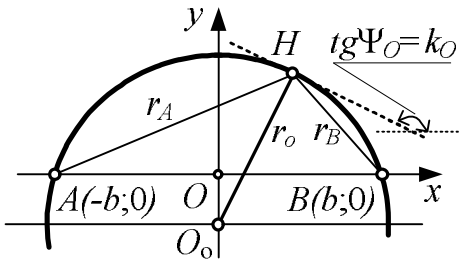
Рисунок 2 – Область неопределенности при позиционировании по окружности А (В)

Согласно *определению 2* число возможных ЛП больше, чем количество ЛП, вытекающее из *определения* 1. К списку кривых, которые принципиально могут быть использованы для позиционирования, добавляются также линии, проходящие через точку H с параметрами математического описания, однозначно определяемыми отрезками r_A, r_B и $2b$.

Конические сечения в качестве линий положения.

Из анализа *определений* 1 и 2 следует, что для позиционной навигации в точке H плоскости могут быть использованы конические сечения: окружности **А**, **В**, окружность с вынесенным центром $\mathbf{O}_o$; эллипс **Э**; гипербола **Г**; парабола **П** (рисунки 2 – 6). Для них на плоскости xOy выведены уравнения кривых и касательных в точке $H(x_н;y_н)$ (таблица 1).

Таблица 1 – Параметры конических сечений, применяемых в качестве линий положения (фрагмент)

Наименование линии положения и уравнения	График конического сечения
Окружность с вынесенным центром в т. O_0 (окружность $\mathbf{O}_0$)	
Уравнение линии положения: $x^2+(y-y_0)^2 = r_0^2$;	
Уравнения касательных к ЛП, проходящих через точку $H(x_н; y_н)$: $y_0 = b\cdot\mathrm{tg}(\theta-\alpha-\beta)/2$; $r_0=r_B/\{2\cos(\theta+\alpha-\beta)/2\}$	
Уравнения для угловых коэффициентов касательных к ЛП в точке $H(x_н; y_н)$: $y = [(r_0^2 + y_н y_0) - x_н x]/(y_н + y_0)$	

Области неопределенности при позиционировании по вычисленным ЛП являются следствием конечной точности измерения расстояний r_A и r_B. Погрешности измерений дальностей $\Delta r_A = \Delta r_B = \Delta r$ подчиняются гауссовскому распределению с нулевым математическим ожиданием и дисперсией $D = \sigma_r^2$, где σ_r – радиальная средняя квадратическая погрешность (СКП). С вероятностью $P_{зад} \geq 0{,}9973$ результаты измерений укладываются в пределах $\pm 3\sigma$ [3, 6]. Толщина $\Delta n_i(x_н, y_н)$ области $\mathbf{\Omega}_i$ определяет с вероятностью, не меньшей $P_{зад}$, точность позиционирования по i-й ЛП при $K_г = 1$

$$\Delta n_i(x_н, y_н) = \sqrt{(x_{\max i} - x_{\min i})^2 + (y_{\max i} - y_{\min i})^2},$$

где $x_{\min i}, y_{\min i}, x_{\max i}, y_{\max i}$ есть соответственно решение систем уравнений:

$$\begin{cases} F_{\min i}(x, y) = 0; \\ n_i(x, y, x_н, y_н) = 0; \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} F_{\max i}(x, y) = 0; \\ n_i(x, y, x_н, y_н) = 0, \end{cases} \quad (5)$$

где $F_{\min i}(x,y) = 0$ и $F_{\max i}(x,y) = 0$ – уравнения границ области $\mathbf{\Omega}_i$; $n_i(x,y,x_н,y_н) = 0$ – уравнение нормали к математическому ожиданию ЛП в точке $H(x_н,y_н)$.

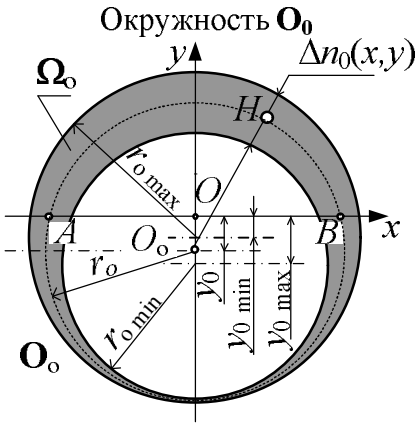


Рисунок 3 – Область неопределенности при позиционировании по окружности $\mathbf{O}_0$

Форма области неопределенности навигации существенно зависит от применяемой ЛП. Для рассматриваемых конических сечений выведены уравнения нормали в точке $H(x_н,y_н)$, области неопределенности и границ области неопределенности.

1. Позиционирование по окружности **А** (**В**) (см. рисунок 2):

а) $$n_{A(B)}(x, y, x_н, y_н) = y - y_н(x \pm b) / (x_н \pm b) = 0; \quad (6)$$

б) $$\mathbf{\Omega}_{A(B)} = \overline{\mathbf{\Omega}}_{A(B)\min} \bigcap \mathbf{\Omega}_{A(B)\max}, \quad (7)$$

где $\mathbf{\Omega}_{A(B)\min}$ и $\mathbf{\Omega}_{A(B)\max}$ – области на плоскости, ограниченные концентрическими кругами с радиусами $r_{A(B)\min} = r_{A(B)} - \Delta r$ и $r_{A(B)\max} = r_{A(B)} + \Delta r$;

в) $$F_{A(B)\min} = (x \pm b)^2 + y^2 - (r_{A(B)} - \Delta r)^2 = 0; \quad (8)$$

г) $$F_{A(B)макс} = (x \pm b)^2 + y^2 - (r_{A(B)} + \Delta r)^2 = 0. \quad (9)$$

2. Позиционирование по окружности $\mathbf{O}_0$ (см. рисунок 3):

а) $$n_0(x, y, x_н, y_н) = (y - y_0) - x[(y_н + y_0)/x_н] = 0; \quad (10)$$

б) $$\mathbf{\Omega}_0 = \mathbf{\Omega}_{0\min} \bigcap \mathbf{\Omega}_{0\max}, \quad (11)$$

где $\mathbf{\Omega}_{0\min}$ и $\mathbf{\Omega}_{0\max}$ – области, ограниченные концентрическими кругами с радиусами $r_{0\min} = (r_0 - \Delta r_0)$ и $r_{0\max} = (r_0 + \Delta r_0)$, $\Delta r_0 = r_{0\max} - r_{0\min}$;

в) $$F_{0\max}(x,y) = x^2 + (y - y_{0\,\max})^2 - r_{0\,\max}^2 = 0; \quad (12)$$

г) $$F_{0\min}(x,y) = x^2 + (y - y_{0\min})^2 - r_{0\min}^2 = 0; \quad (13)$$

$\Delta y_0 = y_{0\max} - y_{0\min}$, $\Delta r_0 < \Delta y_0$.

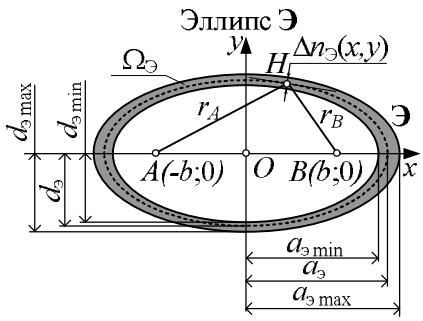


Рисунок 4 – Область неопределенности при позиционировании по эллипсу Э

3. Позиционирование по эллипсу Э (см. рисунок 4):

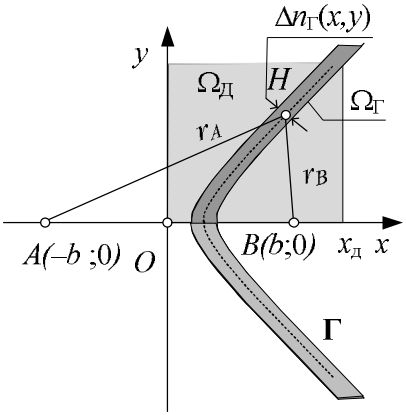


Рисунок 5 – Область неопределенности при позиционировании по гиперболе **Г**

а) $$n_э(x, y, x_н, y_н) = (y - y_н) - \frac{a_э y_н}{d_э x_н}(x - x_н) = 0; \quad (14)$$

б) $$\mathbf{\Omega}_э = \mathbf{\Omega}_{э\min} \bigcap \mathbf{\Omega}_{э\max}, \quad (15)$$

где $\mathbf{\Omega}_{э\min}$ и $\mathbf{\Omega}_{э\max}$ – области эллипсами с параметрами соответственно $a_{э\min}=[(r_A + r_B)/2] - \Delta r$, $d_{э\min} = \sqrt{a_{э\min}^2 - b^2}$, $a_{э\max}=[(r_A+r_B)/2]+\Delta r$, $d_{э\max} = \sqrt{a_{э\max}^2 - b^2}$.

в) $$\begin{aligned} F_{э\max}(x,y) &= x^2/a_{э\max} + x^2/d_{э\max} - 1 = 0; \\ F_{э\min}(x,y) &= x^2/a_{э\min} + x^2/d_{э\min} - 1 = 0. \end{aligned} \quad (16)$$

4. Позиционирование по гиперболе **Г** (см. рисунок 5):

а) $$n_г(x, y, x_н, y_н) = (y - y_н) + (a_г y_н / d_г x_н)(x - x_н); \quad (17)$$

б) $$\mathbf{\Omega}_г = (\mathbf{\Omega}_{г\min} \bigcap \mathbf{\Omega}_д) \bigcup (\mathbf{\Omega}_{г\max} \bigcap \mathbf{\Omega}_д), \quad (18)$$

где $\mathbf{\Omega}_{г\min}$ и $\mathbf{\Omega}_{г\max}$ – области, границами которых являются положительная ось Ox и гиперболы с параметрами: $a_{г\min} = (r_A - r_B)/2 - \Delta r$; $a_{г\max} = (r_A - r_B)/2 + \Delta r$; $d_{г\min} = \sqrt{b^2 - a_{г\min}^2}$; $d_{г\max} = \sqrt{b^2 - a_{г\max}^2}$.

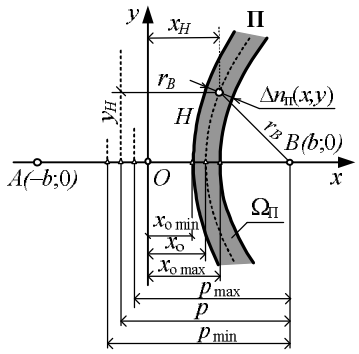


Рисунок 6 – Область неопределенности при позиционировании по вычисленной параболе **П**

в) $$F_{г\max}(x,y) = x^2/a_{г\max} - x^2/d_{г\max} - 1 = 0; \quad (19)$$

г) $$F_{г\min}(x,y) = x^2/a_{г\min} - x^2/d_{г\min} - 1 = 0. \quad (20)$$

5. Позиционирование по параболе **П** (см. рисунок 6):

а) $$n_п(x, y, x_Н, y_Н) = (y - y_Н) - x_Н/[p(x - x_Н)] = 0; \quad (21)$$

б) $$\mathbf{\Omega}_п = (\overline{\mathbf{\Omega}}_{п\min} \bigcap \mathbf{\Omega}_д) \bigcup (\mathbf{\Omega}_{п\max} \bigcap \mathbf{\Omega}_д), \quad (22)$$

где $\mathbf{\Omega}_{п\ \min}$ и $\mathbf{\Omega}_{п\ \max}$ – области, границами которых является ось *Ox* и параболы с параметрами соответственно $p_{\max}$, $x_{0\max}$ и $p_{\min}$, $x_{0\min}$;

в) $$y^2 = 2p_{\max}(x - x_{0\max}); \quad (23)$$

г) $$y^2 = 2p_{\min}(x - x_{0\min}). \quad (24)$$

Области неопределенности $\mathbf{\Omega}_г$ и $\mathbf{\Omega}_п$ – открытые, поэтому необходимы дополнительные ограничения по оси *Ox*.

Радиальная толщина областей неопределенности, образованных вокруг окружностей, эллипса, гиперболы и параболы, является функцией координат. Следовательно, функцией координат является и погрешность позиционирования по этим линиям, которая минимизируется для пары кривых с углом пересечения $\theta = \pi/2$.

Алгоритм поиска оптимального сочетания линий положения. В общем случае линиями положения на плоскости (согласно *определению 2*) могут служить биномиальные, тригонометрические, показательные, логарифмические, циклоидальные и трансцендентные кривые.

Если эти кривые в точке навигации дифференцируемы, то им можно поставить в соответствие вектор $\mathbf{Z}(x_H)^T = [z_i(x_H, P_i)]_{(1\times m)}$, где $z_i(x_н, P_i) = \operatorname{arctg}\left\{\frac{d[y_i(x, P_i)]}{dx}\right\}$ при $x = x_н$.

Анализ наддиагональной матрицы

$$\mathbf{\Theta}(x_{\text{н}}) = \begin{bmatrix} 0 & \theta_{12}(x_{\text{н}}) & \dots & \theta_{1m}(x_{\text{н}}) \\ 0 & 0 & \dots & \theta_{2m}(x_{\text{н}}) \\ 0 & 0 & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}, \qquad (25)$$

ненулевые элементы которой – углы пересечения возможных ЛП в точке H с координатой $x_{\text{н}}$

$$\theta_{ik}(x_{\text{н}}) = \begin{cases} \left\{ \begin{matrix} g_{ik}(x_{\text{н}}) & \text{при} \le \pi/2; \\ g_{ik}(x_{\text{н}}) - \pi & \text{при } g_{ik}(x_{\text{н}}) > \pi/2; \end{matrix} \right\}, & \text{если} \quad i < k; \\ 0, \quad \text{если } i > k, \end{cases} \qquad (26)$$

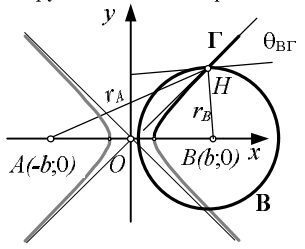
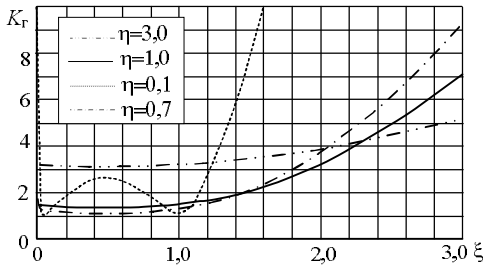
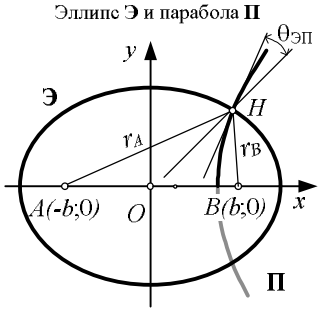
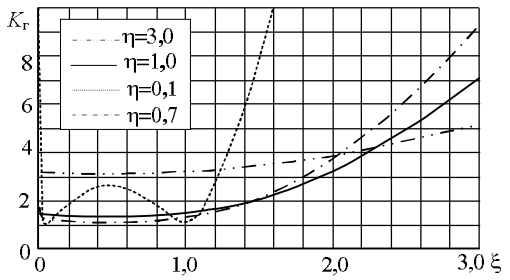
$i = [1, 2, \dots, m]$; $k = [1, 2, \dots, m]$; $i \neq k$; $g_{ik}(x_{\text{н}}) = \left| z_i(x_{\text{н}}, P_i) - z_k(x_{\text{н}}, P_k) \right| = 0$

позволяет алгоритмизировать на координате $x = x_{\text{н}}$ выбор двух ЛП с $\theta \sim \pi/2$:

$$\max_i \left\{ \max_k [\theta_{ik}(x_{\text{н}}) \right\} = \theta_{\max}(x_{\text{н}}) \approx \pi / 2.$$

Расчеты параметров попарного пересечения конических сечений (таблица 2) показали возможность расширения перечня кривых для минимизации коэффициента геометрии.

Таблица 2 – Результаты расчетов коэффициентов геометрии при использовании конических сечений (фрагмент)

Пересечение линий положения	Угол θ_{ij} между касательными (в точке $H(x_{\text{н}}, y_{\text{н}})$) к линиям положения с угловыми коэффициентами k_i, k_j: $\theta_{ij} = \text{arctg}(k_j - k_j)/(1 + k_j k_j)$	Графики коэффициентов геометрии $k_{\text{г}}(\xi,\eta) = \text{tg}\theta_{ij}$, где ξ и η – нормированные величины: $\xi = x_{\text{н}}/b$ и $\eta = y_{\text{н}}/b$ при $b = \text{const}$
Окружность **В** и гипербола **Г** 	$\theta_{\text{ВГ}} = \text{arctg}\{[y_{\text{н}}[x_{\text{н}}(a_{\text{г}}^2 + d_{\text{г}}^2) - ba_{\text{г}}^2]]/[a_{\text{г}}^2 y_{\text{н}}^2 - d_{\text{г}}^2 x_{\text{н}}(x_{\text{н}} - b)]\}$	
Эллипс **Э** и парабола **П** 	$\theta_{\text{ЭП}} = \text{arctg}\{[a_{\text{э}}^2[\sqrt{y_H^2 + (b - x_H)^2} + (b - x_H)]y_H + d_{\text{э}}^2 x_H]/[a_{\text{э}}^2 y_H^2 - d_{\text{э}}^2 x_H[\sqrt{y_H^2 + (b - x_H)^2} + (b - x_H)]]\}$	

Оценка точности определения координат объектов с известной траекторией движения. К подвижным управляемым объектам (УО), которые имеют известную и в определенной мере наперед заданную траекторию движения, относятся, например, автомобили на автодорогах, мотор-вагонный подвижной состав на железнодорожных путях, речные и морские суда соответственно на реках и в проливах, самолеты на взлетно-посадочной полосе или на рулежных дорожках. Корреляция между собой координатных составляющих ошибок позиционирования и привязка УО к определенной траектории являются исходными предпосылками к уточнению положения объекта при ограничении степеней свободы.

Пусть в прямоугольной системе координат $Oxyz$ задана ограниченная точками $A(x_A, y_A,$

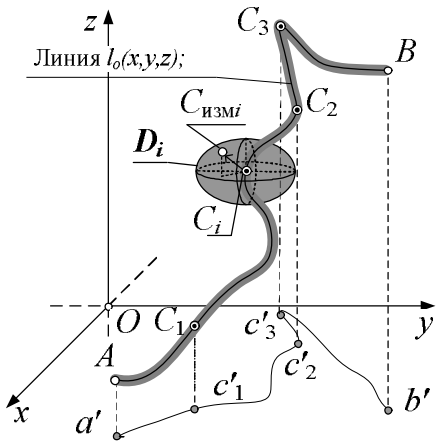


Рисунок 7 – Произвольная жесткая траектория движения объекта

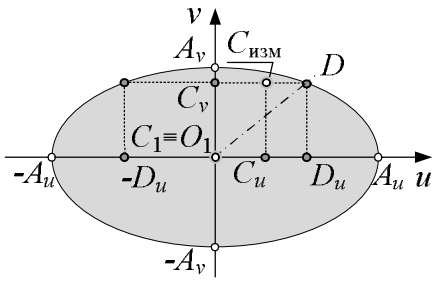


Рисунок 8 – Определение координат подвижного объекта по прямолинейной траектории

z_A) и $B(x_B, y_B, z_B)$ линия $l_0(x,y,z)$, которая состоит из таких участков: 1) прямолинейного $l_{пр}(x,y,z)$; 2) криволинейного $l_{кр}(x,y,z)$; 3) излома $l_{изл}(x,y,z)$ (рисунок 7).

Движение УО с *одной* степенью свободы – только вдоль линии $l_0(x,y,z)$ – достоверное событие. Траектория движения УО с *тремя* степенями свободы с вероятностью $P_{зад}$ укладывается в криволинейный цилиндр с эллиптическим основанием, осью которого служит линия $l_0(x,y,z)$, а основанием – эллипс, оси которого определяются точностью работы систем навигации и управления. В этом кроется избыточность навигационных измерений для УО с фиксированной в пространстве траекторией движения. Далее исследуются только особенности движения УО, связанные с навигационными определениями. Возможны различные положения УО (т. C_i) на траектории $l_0(x,y,z)$ (см. рисунок 7).

1) *Прямолинейный* участок траектории: $C_1 \in l_{пр}(x,y,z)$ (рисунок 8). Результатом навигационных определений в т. C_1 в системе координат Oxy являются измеренные координаты подвижного объекта $x_{C\ изм}$ и $y_{C\ изм}$. В общем случае они не совпадают с координатами истинного положения объекта $x_{C\ ист}$ и $y_{C\ ист}$. Дополнительная система координат O_1uv, начало которой т. O_1 – совпадает с точкой положения объекта C_1, ось O_1u совпадает с прямолинейным участком траектории и направлена вправо, а ось O_1v образует с осью O_1u правую декартовую систему координат, повернута относительно системы Oxy на некоторый угол α. В системе O_1uv координаты т. $C_1(0; 0)$ являются истинными координатами положения объекта на плоскости. Измеренные координаты: $u_{C\ изм} = O_1C_u = \Delta_u$; $v_{C\ изм} = O_1C_v = \Delta_v$ – случайные погрешности навигационных определений. Они характеризуются двумерной плотностью вероятностей $p_\Delta(\Delta_u, \Delta_v)$. Можно принять погрешности Δ_u и Δ_v независимыми случайными величинами, что характерно для радионавигационных систем, с плотностями вероятностей соответственно $p_u(\Delta_u)$ и $p_v(\Delta_v)$. Случайные величины Δ_u и Δ_v соответственно находятся в пределах интервалов $[A_u, -A_u]$ и $[A_v, -A_v]$ с вероятностями

$$P_{u\,м}(r_u) = \int_{-r_u}^{r_u} p_u(\Delta_u)d\Delta_u \geq P_{зад\,u}; \tag{27}$$

$$P_{v\,м}(r_v) = \int_{-r_v}^{r_v} p_v(\Delta_v)d\Delta_v \geq P_{зад\,v}, \tag{28}$$

где $r_u = |O_1A_u|$, $r_v = |O_1A_v|$; $P_{зад\,u} = P_{зад\,v} = P_{зад}$ – заданное значение вероятностей.

Пределы r_u и r_v, т. е. интервалы $[A_u, -A_u]$ и $[A_v, -A_v]$, – суть решения интегральных уравнений (28).

Т. $C_{изм}$ (см. рисунок 8) с вероятностью не меньше $P_{зад}$ находится в пределах площади, ограниченной кривой второго порядка, которая заменяется эллипсом допустимых погрешностей [3, 4]

$$(u/r_u)^2 + (v/r_v)^2 = 1. \tag{29}$$

Из исходного условия о движении подвижного объекта только вдоль известной прямой следует вывод о том, что после навигационных определений величина $\Delta_v = r_v = |O_1C_v| = \Delta_{v.ps}$ является измеренным (неслучайным) значением погрешности вдоль оси O_1v (см. рисунок 8). При известном значении апостериорной погрешности $\Delta_{v.ps}$ апостериорная погрешность $\Delta_{u.ps}$

вдоль оси O_1u с вероятностью не менее $P_{зад}$ укладывается на интервале $[-D_u, D_u]$. Ее максимальное значение $2\Delta_{u.ps.м}$, равное величине интервала $[-D_u\ D_u]$, определяется подстановкой в формулу (29) $v = \Delta_{v\,ps}$ с учетом выражений (27), (28):

$$\Delta_{црм} = r_u\sqrt{1-(\Delta_{v\,ps}/r_v)^2}\,. \qquad (30)$$

2) *Криволинейный* участок траектории: $C_2 \in l_{кр}(x,y,z)$ (рисунок 9). Пусть функция $l_{кр}(x,y)$ в пределах интервала рассмотрения дифференцируема. Введем дополнительную правую декартовую систему координат O_2uv таким образом, что ось O_2u совпадает с касательной к траектории в точке C_2 и направлена вправо, а начало координат O_2 совпадает с точкой C_2 (см. рисунок 9). В целом система координат O_2uv повернута относительно системы Oxy на угол β: $\beta = \text{arctg}\,\{d[l_{кр}(x,y)/d\,x]$ при $x = x_{C2}$, где x_{C2} – координата x точки C_2 в системе Oxy.

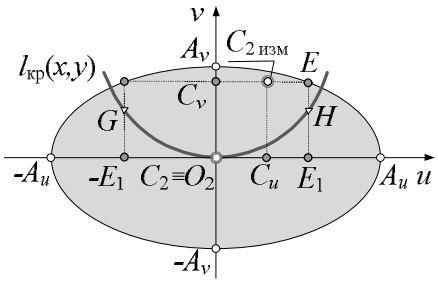


Рисунок 9 – Определение координат подвижного объекта при движении по плоской кривой

В системе O_2uv координаты точки $C_{2изм}$ – это апостериорные погрешности измерений $\Delta_{u.ps} = |O_2C_u|$ и $\Delta_{v.ps} = |O_2C_v|$. В отличие от случая прямолинейного движения максимальную погрешность следует искать вдоль траектории $l_{кр}(x,y)$.

Если реальную кривую $l_{кр}(x,y)$ заменить аппроксимирующей функцией – окружностью

$$|v(u)| = \sqrt{\Delta_{vps}^2 - u^2} - \Delta_{vps}\,, \qquad (31)$$

то максимальная погрешность $\Delta l_{Gн.м}$ с вероятностью $P_{зад}$ ограничивается на кривой $v(u)$ точками $G(u_G,\ v_G)$ и $H(u_н\ v_н)$, где координаты v_G и $v_н$ определяются подстановкой в выражение (31) значений $u_н = -v_G = \Delta_{u.ps.м}$, а максимальная погрешность $\Delta_{u.ps.м}$ по формуле (30). В системе Oxy погрешность позиционирования вдоль линии $l_{кр}(x,y)$

$$\Delta l_{Gн.м} = \int_{l_{GH}} l_{кр}(x,y)dl. \qquad (32)$$

Используя явную запись кривой (31), получаем погрешность определения положения объекта на траектории [формула (32)] в системе координат O_2uv:

$$\Delta l_{Gн.м} = \int_{-\Delta_{ups.м}}^{+\Delta_{ups.м}} v\ (u, \Delta_{\ v.ps})\sqrt{1+\frac{d\ [v\ (u,\Delta_{\ v.ps})]}{du}}du\,. \qquad (33)$$

3) *Излом* траектории $C_3 \in l_{изл}(x,y,z)$. Погрешность определения координат при движении объекта вблизи точки *излома траектории* (рисунок 10) рассмотрим на примере, когда траектория образуется двумя лучами – $l_{п1}$ и $l_{п2}$, выходящими из точки излома (см. рисунок 10). Вдоль лучей $l_{п1}$ и $l_{п2}$ введем дополнительные системы координат $O_3u_1v_1$ и $O_3u_2v_2$ с общим началом, оси которых повернуты относительно системы Oxy соответственно на углы α_1 и α_2. В каждой системе координат согласно выражению (30) определяются погрешности положения объекта по измеренному положению $E_{изм}$ с учетом того, что погрешность следует определять только в сторону положительного направления осей O_uu_1 и O_uu_3. На практике излом траектории представляет собой сопряжение осей O_uu_1 и O_uu_3 окружностью.

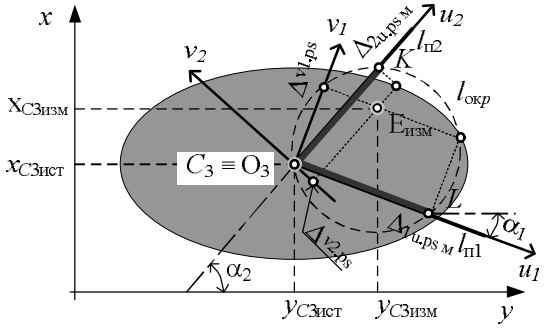


Рисунок 10 – Определение погрешностей координат подвижного объекта при движении в районе точки излома траектории

Из геометрических построений (см. рисунок 10) следует, что вблизи точки излома неопределенность сужается до сопрягающей окружности $l_{окр}$, которая проходит через три точки: $E_{ист}$, K и L. Таким образом, погрешность определения местоположения УО уменьшается до радиуса излома.

Восстановление траектории движения объекта на плоскости при одномерных навигационных измерениях. Анализ источников показывает, что одномерные измерения координат интересуют исследователей как приложение для решения частных задач: трансформация погрешностей измерений при пересчете координат в различные системы отсчета [6]; поиск альтернативного способа определения координат радиолокационной цели [7]; распознавание рукописных текстов [8]; измерение параметров треков элементарных частиц [9]. Для оценки возможности использования одномерных измерений для целей навигации докажем теорему о восстановлении плоской траектории.

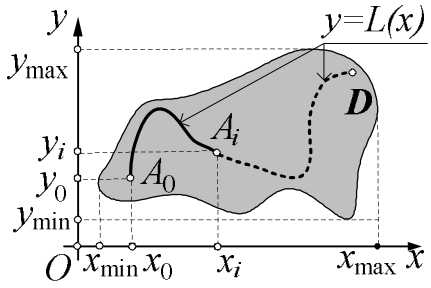


Рисунок 11 – Область восстановления траектории

Для восстановления траектории точки на плоскости, если вынужденно или преднамеренно выполнены измерения только одной ее координаты (однокоординатные измерения), вторую координату следует определить независимым способом.

Утверждение. Необходимым и достаточным условием восстановления на плоскости xOy (см. рисунок 11) траектории движения точки A

$$y = L(x), \tag{34}$$

проходящей через точку с известными координатами $A_0(x_0,y_0)$, при невозможности непосредственного измерения одной ее координаты, является задание базовой функции:

$$\pi(x, y, \xi, t) = 0, \tag{35}$$

где

$$\xi = \xi(x, y, t), \text{ или } \xi = \xi(y, t) \tag{36}$$

независимо измеряемый параметр движения точки A в области **D**, содержащей искомую траекторию.

Доказательство. При доступности измерения на плоскости только одной координаты подвижной точки (объекта навигации), например $x(t)$,

$$t \in [t_0; t_k], \tag{37}$$

где t_0 и t_k – моменты границы интервала наблюдения.

Определение второй координаты $y(t)$ возможно либо по известной прямой зависимости $y(t) = y(x, t)$, либо, при известной базовой функции (35), по однозначной связи в момент t базовой функции с неизмеряемой координатой $y(t)$. Поэтому априорное знание функциональной зависимости (35) необходимо для определения недостающей координаты $y(t)$.

Достаточность утверждения обусловлена тем, что в произвольный фиксированный момент времени $t = t_i$, удовлетворяющему уравнению (37), на траектории $L(x) \in \mathbf{D}$ движения точки A, как и для всей области **D**, в соответствии с формулой (35) справедливо равенство:

$$\pi(x_i, y_i, \xi_i, t_i) = 0, \tag{38}$$

где $x_i = x(t_i)$; $y_i = y(t_i)$; $\xi_i = \xi(t_i)$.

В явном виде или численным методом из выражения (38) вычисляется неизмеряемая координата y_i

$$y_i = \pi_y(x_i, \xi_i, t_i), \tag{39}$$

где $\pi_y(x_i, \xi_i, t_i)$ – функция зависимости координаты y от указанных аргументов.

Учитывая то, что функция (36) зависит от координаты $y(t)$, функция (35) обладает избыточностью. Достаточно иметь базовую функцию трех переменных $\pi(y,\xi, t) = 0$, поэтому выражение (39) принимает вид:

$$y_i = \pi_y(\xi_i, t_i). \tag{40}$$

Множество значений непрерывно измеряемой координаты $x_i = x(t_i)$ и соответствующих значений вычисляемой координаты $y_i = y(t_i)$ при непрерывно изменяющемся параметре $t_i \in [t_0;t_k]$ представляется соответственно в виде непрерывных зависимостей $x = l_x(t)$; $y = l_y(t)$. Решение системы уравнений

$$\begin{cases} x = l_x(t); \\ y = l_y(t) \end{cases} \tag{41}$$

путем исключения переменной t позволяет получить для траектории движения рассматриваемой точки вычисленную аналитическую зависимость:

$$y = L_{\text{выч}}(x). \tag{42}$$

Если вычисления согласно формулам (39) – (42) выполняются мгновенно и погрешности измерений координаты $x(t)$ и независимо измеряемого параметра $\xi(x,y,t)$ или $\xi(y,t)$ отсутствуют, то в соответствии с выражением (34)

$$L_{\text{выч}}(\text{x}) \equiv L(x). \tag{43}$$

Утверждение доказано.

Примечание. Базовой функцией (35) может служить уравнение траектории на плоскости, а независимо измеряемыми параметрами (36) могут быть приняты линейные или угловые скорости или ускорения подвижной точки A на плоскости xOy относительно точки с известными координатами.

Особенности восстановления траектории. При определении координат объекта навигации $A(x_i,y_i)$ в реальных условиях вычисления согласно формулам (39) – (42) производятся в течение *конечного промежутка времени* $\Delta t_{\text{в}}$, а измерения координаты $x(t)$ и независимого параметра $\xi(t)$ *выполняются с погрешностями*. Это приводит к тому, что тождество (43) не выполняется.

Влияние конечного времени вычисления. Координата x_i и независимый параметр ξ_i подвижной точки определяются в момент времени t_i, а значение координаты y_i – только к моменту времени $t_{i\Delta} = (t_{\text{i}} + \Delta t_{\text{в}})$ после завершения вычислений по формулам (40) и (41). В результате такой обработки формируется функция дискретного аргумента $y_n = L_{\text{выч}}(x_n)$, $x_n \in [x_{min}; x_{mAx}]$, $i \in N$, где N – целое положительное число.

Следовательно: а) измерения координаты $x(t)$ целесообразно выполнять в дискретные моменты времени $_n = n\Delta t_{\text{и}}$; $i \in N$; $\Delta t_{\text{и}} \geq \Delta t_{\text{в}}$; б) для совмещения по времени измеренного x_n и рассчитанного y_n значений координат подвижной точки A необходимо выполнить временную задержку измеренной координаты x_i на время $\Delta t_{\text{и}}$ и вычисленной координаты y_i на время $(\Delta t_{\text{и}} - \Delta t_{\text{в}})$. Это приведет к временному смещению отсчетов траектории на время $\Delta t_{\text{и}}$.

Результатом перечисленных особенностей является следующее:

а) шаг дискретизации измерения координаты $x(t)$ должен соответствовать требованиям теоремы Котельникова:

$$\Delta t_{\text{и}} < 1/2f_{\max}, \tag{44}$$

где $f_{\max}$ – максимальная частота спектра параметрической функции $x(t)$;

б) значения координат, рассчитанных для момента времени t_n, но полученные в момент t_{n+1}, устаревают.

Шаг дискретизации определяется на основе априорных сведений о возможной динамике

движения (34). Минимальный радиус $R_{\min}$ изгиба траектории определяется исходя из допустимой перегрузки объекта. На минимальной скорости $V_{\min}$ радиус $R_{\min}=V^2_{\min}/a_{\max}$, где $a_{\max}$ – допустимое нормальное ускорение материальной точки.

Отсюда максимальная частота спектра, вычисляемая по формуле (44), определяется временем оборота точки A при радиусе $R_{\min}$: $f_{\max} = a_{\max}/2\pi V_{\min}$.

Старение информации между измерениями рассмотрим как уменьшение ее ценности за время задержки $\Delta t_и = t_{n+1} - t_n$.

Считаем, что на момент времени t_0 нет априорных сведений о движении т. A, а координаты измерены с предельной точностью $\Delta x = \Delta y$. Пусть т. A при $t > t_0$ продолжает движение с неизвестной скоростью $V(t)$. По истечении промежутка времени $\Delta t_и$ т. A из круга $\mathbf{S_0} \in \mathbf{S}(\Delta t_и)$ с центром в т. $A_0(x_0, y_0)$ и радиусом $r_0 = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ переместится и с вероятностью не меньше заданной может занять любое положение в пределах области $\mathbf{S}(\Delta t_и)$, ограниченной окружностью с радиусом $r(\Delta t_u) = \int_0^{\Delta t_u} V(t)dt$.

Увеличение неопределенности (энтропии) положения точки A за время $\Delta t_и$

$$\Delta H = log_2\{S(\Delta t_и)/S_0\}, \tag{45}$$

где S_0 и $S(\Delta t_и)$ – площади областей $\mathbf{S_0}$ и $\mathbf{S}(\Delta t_и)$.

Ценность информации, поставленной через время $\Delta t_и$ после ее получения, уменьшается с ростом энтропии, поэтому в качестве показателя старения принимаем функцию

$$W(\Delta t_и) = \Delta H/\Delta t_и \tag{46}$$

или с учетом формулы (45):

$$\mathrm{W}(\Delta \mathrm{t_и}) = (2/\Delta t_u)\log_2\left[r\ (\Delta t_u)/r_0\right]. \tag{47}$$

Анализ формулы (47) показывает, что скорость старения информации снижается с течением времени и увеличением скорости движения. Это есть косвенное подтверждение относительного возрастания ценности априорной информации для восстановления траектории т. А.

Влияние погрешностей измерений рассмотрим на примере независимого измерения скорости т. А. Пусть имеется счисленная неизмеряемая координата

$$y_{сч}(t) = y_0 + \int_0^t [V_y(t) + \Delta V_y(t)]dt = y_{сч0}(t) + \Delta y_{сч}, \tag{48}$$

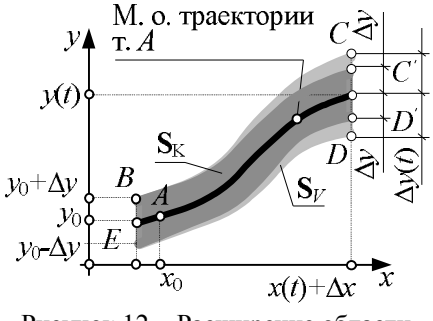


Рисунок 12 – Расширение области неопределенности положения траектории с течением времени

где $y_{сч0}(t)$ – м.о. счисленной координаты $y(t)$; $\Delta y_{сч}(t)$ – предельная погрешность счисленной координаты $y(t)$, которая с течением времени возрастает (рисунок 12).

Т. А с известной вероятностью находится в пределах области SV (фигура BCDE). При восстановлении второй координаты площадь неопределенности области SK определяется «замороженными» погрешностями $\Delta y_{сч}(0)$. Согласно выражению (48) площадь SV(t) фигуры BCDE больше площади SK(t) фигуры BC′D′E. Восстановление траектории тем точнее, чем меньше погрешности координат до их выпадения.

Следовательно, использование для устранения неоднозначности однокоординатных измерений такого независимого параметра ξ(t), при помощи которого вторая координата образуется методом счисления, приводит к увеличению энтропии навигационных измерений по сравнению с двухкоординатными измерениями на величину $\Delta H(t) = \log2[SV(t)/SK(t)]$, где площади

$$S_V(t) = \iint\limits_{S_V} ds = \int\limits_{y(x)-\Delta y(x)}^{y(x)+\Delta y(x)} dy \int\limits_{x_0}^{x(t)+\Delta x} F_V(x,y)dx; \qquad S_K(t) = \iint\limits_{S_K} ds = \int\limits_{y(x)-\Delta y}^{y(x)+\Delta y} dy \int\limits_{x_0}^{x(t)+\Delta x} F_K(x,y)dx;$$

в определении которых функции $y(x)$ и $\Delta y(x)$, $F_V(x, y)$ и $F_K(x, y)$ – соответственно явные и неявные функции, описывающие зависимости координаты $y(t)$ и погрешности $\Delta y(t)$ от координаты x, и границы областей S_V и S_K.

Использование доказанного утверждения позволяет выполнить расчет восстанавливаемой траектории в условиях априорной навигационной неопределенности, обусловленной неполными координатными измерениями.

Эффективное решение одной из задач транспортной логистики, а именно повышение точности навигации подвижного состава, достижимо применением алгоритмов третичной обработки навигационных данных. Для позиционной навигации управляемых объектов в качестве линий положения наряду с окружностью и гиперболой возможно использование окружностей с вынесенными центрами, эллипса и параболы. Перебор различных сочетаний конических сечений позволяет минимизировать коэффициент геометрии.

Алгоритм повышения точности определения координат объектов с известной траекторией движения является резервом для повышения точности и эффективности навигации.

Априорное накопление координат множества точек траектории движения кправляемого объекта двумерными независимыми измерениями позволяет в случае пропадания измерений по одной из координат осуществить апостериорное восстановление траектории с известной точностью.

Список литературы

1. Сетевые спутниковые радионавигационные системы [Текст]/ Под ред. В. С. Шебшаевича. – М.: Радио и связь, 1993. – 408 с.

2. Оценка эффективности типовой комплексной системы навигации [Текст] / В. С. Марюхненко, Ю. Ф. Мухопад и др. // Полет. – 2012. – № 2. – С. 25 – 35.

3. Ярлыков, М. С. Статистическая теория радионавигации [Текст] / М. С. Ярлыков. – М.: Радио и связь, 1985. – 344 с.

4. Марюхненко, В. С. Оценка влияния геометрического фактора на точность и информативность позиционирования объекта в спутниковой радионавигационной системе [Текст] / В. С. Марюхненко // Успехи современной радиоэлектроники. – 2008. – № 2. – С. 30 – 40.

5. Лавский, В. М. Карманный справочник авиационного штурмана [Текст] / В. М. Лавский. – М.: Воениздат, 1952. – 342 с.

6. Марюхненко, В. С. Системы отсчета в навигационных измерениях [Текст] / В. С. Марюхненко // Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте /Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2005. – Вып. 12. – С. 85 – 91.

7. Определение координат и параметров движения источников радиоизлучений по угломерным данным в однопозиционных бортовых радиолокационных системах [Текст] / В. С.Чернов, В. В. Дрогалин и др. // Зарубежная радиоэлектроника. – 2002. – № 3. – С. 64 – 94.

8. Поцепаев, Р. В. Восстановление траекторий написания символов по их изображениям / Р. В. Поцепаев [Электронный ресурс]. – [2003]. – Электронный журнал «Исследовано в России». – Режим доступа: http://zhurnal.ape.rel-arn.ru/articles/2003/120.pdf.

9. Кинчаков, В. С. Оптимизация характеристик стационарного глубоководного амплитудного черенковского детектора мюонов [Текст] / В. С. Кинчаков // Журнал технической физики. – 2001. – Т. 71. – С. 101 – 105.

УДК 658.5

В. А. Аксенов, А. М. Завьялов

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОДЕРЖАНИЯ ОБЪЕКТОВ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Статья посвящена поиску путей повышения эффективности содержания объектов инфраструктуры. Сформулирована и обоснована целесообразность доработки инструментов, используемых методологией УРРАН, позволяющей при оценке рисков существенным образом учесть несовершенство технологических процессов эксплуатации объектов инфраструктуры, связанное с влиянием «человеческого фактора».

Эффективность содержания объектов инфраструктуры железных дорог напрямую зависит от надежности их функционирования, которая различается на этапах жизненного цикла объектов. В идеальных условиях, при соблюдении всех необходимых требований к организации процесса эксплуатации, интенсивность отказов на этапе эксплуатации является минимальной. При этом в реальных условиях эксплуатации из-за влияния «человеческого фактора», имеющего случайный характер проявления, вероятность возникновения отказа возрастает равновероятно на всем интервале этапа эксплуатации.

В настоящее время в ОАО «РЖД» активно внедряется методология управления ресурсами, рисками на всех этапах жизненного цикла объектов и техники на основе анализа надежности (УРРАН) [1] (СТО РЖД 02.037-2011, 02.041-2011, 02.043-2011 и 02.044-2011), одной из задач которой является управление рисками объектов и техники железнодорожной инфраструктуры, при этом основным критерием оценки безопасности функционирования технических средств является уровень риска. Методология УРРАН позволяет анализировать эффективность функционирования объектов инфраструктуры в целом, но при этом как аппарат для управления рисками не полон,так как не имеет достаточного набора инструментов для глубокого исследования причин их возникновения.

Поскольку рассматриваемые объекты являются составляющими сложной системы, непосредственно взаимодействующей с человеком (человеко-машинная система), то для полной оценки и в дальнейшем повышения эффективности содержания объектов на всех этапах жизненного цикла необходимо, в том числе, учитывать «человеческий фактор», влияние которого на этапе эксплуатации является максимальным. Увеличивать надежность объектов только за счет технических решений (дублирование ответственных узлов, контрольно-диагностические функции, безобслуживаемые технологии) можно только до определенного предела, так как человека невозможно исключить из данной системы. В результате квалификация, опыт и личностные характеристики обслуживающего персонала будут иметь превалирующую роль в обеспечении надежности функционирования объектов, что подтверждается соответствующими исследованиями, показывающими, что основными причинами инцидентов (нежелательных событий) являются нарушения технологического (производственного) процесса, неудовлетворительная организация и контроль за производством работ, недостатки в обучении безопасным приемам труда и т. п.

По нашему мнению, здесь следует использовать существующий подход, который позволяет детально исследовать обозначенные выше причины инцидентов, т. е. негативное влияние «человеческого фактора» на технологический процесс. Этот подход реализуется через методологию профессионального риск-менеджмента, которая предназначена для анализа, оценки профессиональных рисков и последующего формирования корректирующих мероприятий, направленных на их снижение. Управление профессиональными рисками через анализ технологического процесса, как связующего звена в человеко-машинной системе, позволит напрямую влиять не только на профессиональные риски, но и использовать их при определении технических рисков (рисунок 1).

Реализация данного подхода представляет собой совокупность экспертных методов, позволяющих, с одной стороны, привлечь обслуживающий персонал к процессу определения, анализа и управления рисками, а, с другой стороны, использовать компетентную экспертную оценку.

Глубокий анализ технологических процессов с использованием как уже существующих методик в рамках государственных нормативных требований охраны труда, например, аттестации рабочих мест по условиям труда, так и других позволит выявить причинно-следственные связи влияния «человеческого фактора» на надежность функционирования объектов железнодорожной инфраструктуры. Подробнее рассмотрим методологическую основу обозначенного подхода.

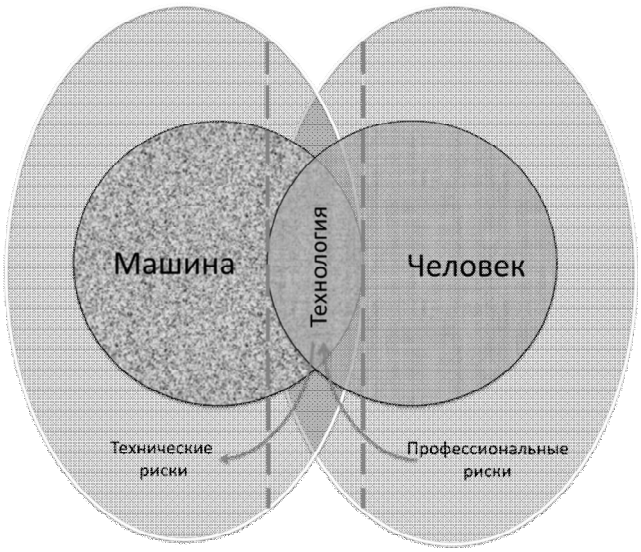


Рисунок 1 – Риски в системе «человек – машина»

На первом этапе следует провести анализ статистических данных по отказам технических средств. Необходимую информацию можно получить из комплексной автоматизированной системы учета, контроля устранения отказов технических средств ОАО «РЖД» и анализа их надежности (КАСАНТ), автоматизированной системы Центра управления содержанием инфраструктуры (ЦУСИ). Также производится анализ протоколов аттестации рабочих мест. Результаты анализа сводятся в таблицу 1. Оценивается уровень потенциальной опасности технических устройств (оборудования) на основе результатов, сведенных в таблицу 2 (для хозяйства пути и сооружений) [2].

Таблица 1 – Сведения об аттестации рабочих мест

№ п/п	Структурное подразделение	Общее количество работающих (человек) $N_{общ_S}$	В том числе работающих на							Всего работающих на РМ 3 и 4 класса условий труда (человек) $N^{общ}_{3,4_S}$	Рейтинг по результатам идентификации опасных и вредных факторов $B_{3,4_S}$
			РМ 1 и 2 класса условий труда (оптимальные и допустимые)	РМ 3.1 класса условий труда (вредные) $N_{3.1_S}$	РМ 3.2 класса условий труда (вредные) $N_{3.2_S}$	РМ 3.3 класса условий труда (вредные) $N_{3.3_S}$	РМ 3.4 класса условий труда (вредные) $N_{3.4_S}$	РМ 4 класса условий труда (опасные) N_{4_S}	РМ 3.0 класса условий труда (травмоопасные)		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Данный этап является предварительным. Впоследствии на основе этих данных будет оцениваться эффективность проведения корректирующих мероприятий. Результаты первого этапа оценки рисков используются и для второго, углубленного этапа оценки.

Таблица 2 – Оценка уровня опасности технических устройств (оборудования)

№ п/п	Технические устройства (оборудование)		Количество ТУ со сроком экспл.		Наличие опасных и вредных производственных факторов					Балл опасности	Суммарный балл опасности
			донормативным	сверхнормативным	движущиеся машины, подвижные части	сход, падение технических устройств	…	опасность возгорания, пожара	повышенная температура поверхности оборудования		
1	Грузоподъемные	автомобили									
2		краны на ж.-д. ходу									
3		автокран									
4		козловой кран									
5		МПТ									
6		электроталь									
7		кран мостовой									
8		укладочный кран									
9	Электрооборудование	сварочные приставки									
10		сварочный агрегат									
11		генератор сварочный									
12		трансформатор сварочный									
13		дрель электрическая									
14		лобзик электрический									
15		генератор трехфазный									
16	Станки	токарные									
17		рельсосверлильный									
18		вертикальный сверлильный									
…		…									

На втором этапе осуществляется более глубокая и детальная оценка рисков на основе экспертного анализа, который подразумевает выявление потенциальных опасностей и определение действующего значения риска. Составляющими экспертного анализа являются анкетирование работников и протокол наблюдения рабочей группы. Первое позволяет учесть мнения и особенности личностных характеристик работников, вовлеченных в процесс эксплуатации рассматриваемых технических средств (таблица 3).

Таблица 3 –Опросный лист мониторинга безопасности труда

№ п/п	Согласны ли вы со следующим утверждением?	Варианты ответа		
		да	не всегда, не в полном объеме	нет
1	Распределение обязанностей в моем подразделении соответствует способностям и квалификации работников			
2	Отношения между работниками в моем подразделении нормальные и способствуют эффективной и безопасной работе (отсутствуют: работа в одиночестве, неприятное поведение коллег, неприятный надзор руководителя)			
3	Меня устраивают условия и объем общения с работниками других подразделений по производственным делам			
4	Я ознакомлен со своими правами, в том числе на охрану труда в соответствии с трудовым законодательством			
5	…			

Окончание таблицы 3

3. Организация трудового процесса, психологические условия. Отметьте характерные для Вашего труда факторы							
№ п/п		Постоянное воздействие	Около 75 % рабочего времени	Около 50 % рабочего времени	Около 25 % рабочего времени	Никогда	Не знаю
1	Как часто за последние 12 месяцев вам приходилось трудиться сверхурочно						
2	Периодически повторяющаяся (однотипная) работа						
3	Перенос и перемещение тяжестей						
4	Недостаточный контроль выполняемой операции из-за несовершенства оборудования и технологии						
	…						
…							

6. Обучение							
№ п/п		Не было вообще	Менее 1 дня	От 1 до 2 дней	От 2 до 5 дней	От 5 до 10 дней	От 10 и более дней
1	Какой продолжительностью были Ваше обучение, семинары и тренинги по охране и безопасности труда за последние 12 месяцев						
2	Какой продолжительностью были Ваше обучение, семинары и тренинги, касающиеся не только охраны труда						
Итоговый балл							

Протокол наблюдения рабочей группы предусматривает выявление на основе экспертных заключений (работа рабочей группы) несоответствия фактического состояния процесса технической эксплуатации объектов инфраструктуры заданным нормативным требованиям. На основе полученных результатов работы группа экспертов формирует реестр рисков, которые ранжируются по уровню. Для рисков, являющихся недопустимыми, разрабатываются корректирующие и предупреждающие мероприятия [3] (пример – таблица 4).

Данный подход позволяет глубже и детальнее изучить причины нежелательных событий (отказы и аварии технических средств, травматизм), связанные, в том числе, с «человеческим фактором» и опасными внешними воздействиями в процессе технической эксплуатации объектов инфраструктуры, что в конечном итоге приведет к повышению эффективности их содержания за счет более целенаправленного (адресного) планирования корректирующих и предупреждающих мероприятий и, следовательно, к снижению уровней выявленных рисков.

Реализация подобного подхода осуществлена авторами в рамках пилотного проекта по внедрению менеджмента рисков на полигоне Октябрьской дирекции по ремонту пути в 2012 г. [4]. Разработан пакет нормативно-методических документов, включающий в себя методику сбора и анализа данных по травматизму, распорядительный документ по учету микротравм, методику анализа и оценки рисков, методику разработки корректирующих действий и другие; названный пакет документов позволил сформировать программу корректирующих мероприятий на 2013 г. с учетом анализа и оценки профессиональных рисков.

Рассмотренный подход риск-менеджмента является универсальным и может быть адаптирован для использования в различных хозяйствах инфраструктуры железных дорог.

В целом же необходимо отметить, что для решения основной задачи по минимизации рисков, реализуемой на базе методологии УРРАН, рассмотренный выше подход позволяет увязать используемые в нем инструменты, адекватно описывающие человеко-машинную сущность процессов эксплуатации, в единый технологический и управленческий комплекс.

Приведенные выше примеры реализации такого подхода не являются единственно верными. Они могут дополняться и развиваться на базе теории и практики экспертных методов.

Таблица 4 – Пример реестра недопустимых рисков

Профессия	Опасность	Действующий риск	Корректирующие мероприятия	Планируемый риск
Монтер пути	Наезд подвижного состава	25	Приобретение и оборудование фронта работ на двухпутных и многопутных участках системами оповещения (типа Минимел) и новейшими системами ограждения (ЭЛОД-160). Приобретение защитных касок со встроенными в наушники переговорными радиостанциями. Приобретение мегафонов, радиостанций, автоматических оповестительных сигнализаций (в соответствии с технологией производства работ) Оборудование фронта работ на двухпутных и многопутных участках временными ограждениями и автоматическими предупредительными устройствами Увеличение количества сигналистов в штатном расписании. Обучение сигналистов	16
	Пожар в разъездном (жилом) вагоне	20	Ремонт вагонов. Включение в инвестиционную программу приобретения новых вагонов для проживания и сопровождения машин. Полная замена парка жилых вагонов и вагонов, предназначенных для «турной езды» (1973 – 1974 годы постройки). Приобретение газоанализаторов. Обработка противопожарным раствором. Оснащение вагонов системами объемного тушения	12
	Придавливание рук или ног при выполнении погрузочно-разгрузочных работ	16	Приобретение необходимого объема грузозахватных приспособлений (траверсы, челночные приспособления, стропы и т. п.) для путеукладочных кранов в соответствии с требованиями к устройству и безопасной эксплуатации (РД 10-231-98) Проведение совместных практических занятий (машинист УК, машинист козлового крана, монтер пути-стропальщик) по применению знаковой сигализации	10
	…			

Список литературы

1. Гапанович, В. А. Универсальный инструмент поддержки принятия решений [Текст] / В. А. Гапанович // Железнодорожный транспорт. – 2012. – № 10.

2. Методика анализа и оценки профессиональных рисков в ОАО «РЖД». Утв. распоряжением ОАО «РЖД» № 2144 от 19.12.2005 г.

3. Аксенов, В. А. Проблемы управления профессиональными рисками в хозяйствах инфраструктуры железных дорог [Текст] / В. А. Аксенов, А. М. Завьялов // Техносферная и экологическая безопасность на транспорте: Материалы междунар. науч.-практ. конф./ Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – СПб, 2012. – С. 204 – 207.

4. Аксенов, В. А. Ход реализации пилотного проекта по внедрению менеджмента рисков на полигоне Октябрьской дирекции по ремонту пути [Текст] / В. А. Аксенов, Д. Л. Раенок, А. М. Завьялов // Техносферная и экологическая безопасность на транспорте: Материалы междунар. науч.-практ. конф. / Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – СПб, 2012. – С. 208 – 212.

УДК 629.4.083

В. А. Смирнов

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРЕДПРИЯТИЙ ПО РЕМОНТУ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

В статье рассматриваются вопросы проектирования предприятий по ремонту подвижного состава железнодорожного транспорта, анализируется современный опыт, приводятся основные критерии оценки качества проектных решений и предлагается методика их оптимизации с использованием средств математического моделирования.

Качественный ремонт подвижного состава является важнейшим фактором обеспечения надежности и безопасности перевозочного процесса на железнодорожном транспорте. Основные технологические требования, инженерная и научная база проектирования предприятий по ремонту подвижного состава сформировались в 60-е – 70-е гг. минувшего века. Разработанные в этот период конструкторские и технологические решения для механизированных комплексов и поточных линий в значительной мере определили облик ремонтного производства до настоящего времени.

В последние годы железнодорожный транспорт переживает этап масштабной модернизации и реконструкции производства, что связано с наметившимися изменениями как в организации и технологии работы системы, так и с появлением новых внешнеэкономических и правовых условий. В их числе отметим следующие:

формирование конкурентного сегмента рынка ремонта подвижного состава;

интенсивное обновление вагонного и локомотивного парка, появление принципиально новых узлов и агрегатов в конструкции вагонов и локомотивов;

сокращение объемов ремонта по причине увеличения межремонтных пробегов и, как следствие, недозагрузка производственных мощностей депо в целом;

ужесточение требований к качеству ремонта и нормам простоя со стороны операторов подвижного состава;

активное внедрение новых технологий в ремонтное производство, повышение квалификационных требований к персоналу на фоне ухудшения ситуации на кадровом рынке квалифицированных рабочих и технических специалистов в целом;

появление новых участников процесса в лице заводов изготовителей железнодорожной техники, возрастание роли фирменного обслуживания в системе ремонта;

более жесткие внешнеэкономические и правовые условия, усиление государственного контроля и надзора в области экологии, охраны труда и безопасности на транспорте.

Успешное решение задач модернизации и реконструкции ремонтного производства предполагает создание эффективных инструментов разработки проектных решений и в первую очередь оценки и оптимизации вариантов технологического проекта как центрального элемента проектируемой технологической системы и основы архитектурно-строительной и специальных частей проекта.

Технологическое проектирование – сложный творческий процесс, выполняется, как правило, в несколько этапов, на каждом из которых возможно существование многих вариантов решения одной проектной задачи. Благодаря сложной взаимосвязи отдельных компонентов технологического проекта, таких как оборудование, транспорт, кадровое обеспечение, топливно-энергетические ресурсы, предпочтение того или иного варианта в большинстве случаев не является очевидным, а принятие решения требует тщательного анализа по комплексу показателей.

Многоитерационность процесса проектирования предполагает постоянное решение локальных оптимизационных задач на уровне отдельных технологических позиций, выбора мощности и производительности оборудования, размеров накопителей и т. д., что неизбежно

оказывает влияние на состояние производственной системы в целом, на ее параметры и показатели.

Основными задачами при технологическом проектировании предприятий по ремонту подвижного состава являются следующие:

расчет количества основного и вспомогательного технологического оборудования для выполнения заданной производственной программы;

разработка компоновочных решений, выбор наиболее рационального варианта;

расчет количества и показателей эксплуатационной загрузки оборудования;

определение емкости накопителей, выбор мест их размещения;

разработка логистической концепции производства;

выбор оптимальной производственной программы и режима работы предприятия;

динамический анализ потребностей в топливно-энергетических, материальных и трудовых ресурсах в течение рабочей смены, суток, месяца;

оценка технологических рисков, связанных с работой оборудования;

комплексное сравнение нескольких вариантов проекта.

Функциональная структура технологического проектирования (рисунок 1) основывается на реализации следующих этапов: структурного анализа объектов ремонта (ОР) и технологических процессов, анализа и синтеза элементов технологической системы (ТС), пространственных структур, процессов функционирования и управления.

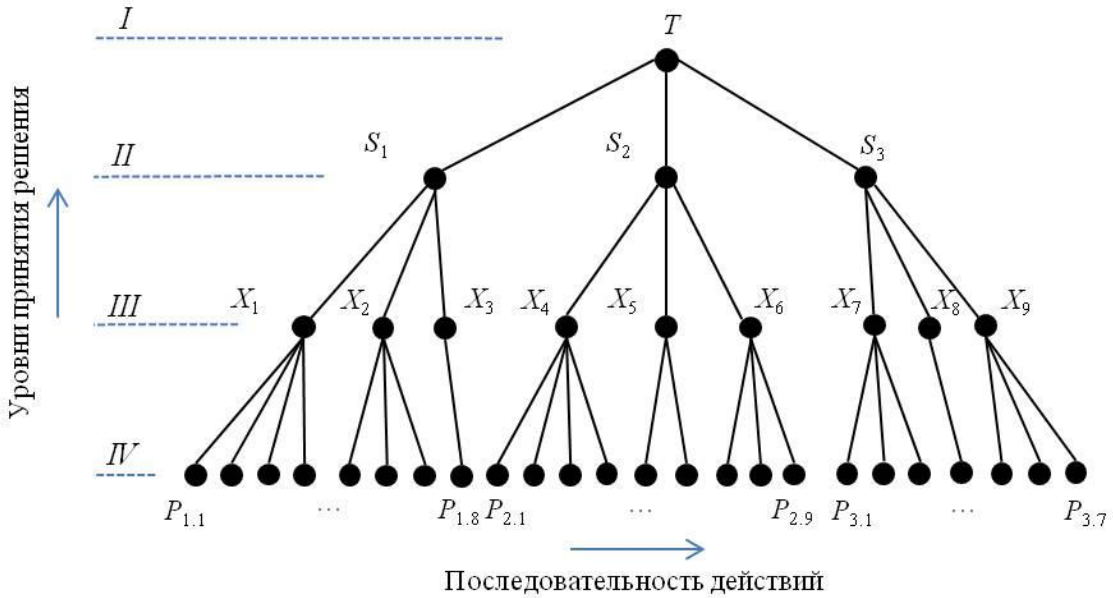


Рисунок 1 – Функциональная структура технологического проектирования предприятий по ремонту подвижного состава: T – техническое задание; S_1 – S_3 – этапы проектирования: анализ технологических процессов ремонта, определение размерных параметров, структурирование и конфигурирование ТС; X_1, …, X_9 – проектные процедуры: анализ и синтез ремонтного задания; разработка функциональной схемы ТС; формирование производственной концепции; разработка спецификации оборудования; формирование требований к системе снабжения и к производственной инфраструктуре; разработка масштабной компоновочно-логистической схемы ТС, планов размещения оборудования, генерального плана застройки; $P_{1.1}$, …, $P_{3.7}$ – операции проектных процедур: $P_{1.1}$, …, $P_{1.8}$ – определение состава ОР; выбор способов организации ремонта; классификация ОР; формирование параметров технологических операций; формирование элементов; определение функциональных взаимосвязей; формирование сети материальных потоков; выбор форм организации производства; $P_{2.1}$, …, $P_{2.8}$ – выбор оборудования, разработка технического задания (ТЗ) на нестандартное оборудование и оснастку; определение потребностей в персонале; расчет параметров производительности ТС; расчет переходного запаса объектов ремонта; расчет потребностей в материалах и комплектующих; расчет потребностей площадей; расчет энергоемкости производства; расчет железнодорожного путевого развития; $P_{3.1}$, …, $P_{3.7}$ – размещение технологических структур, выбор вариантов построения транспортной системы; расчет транспортных потоков; разработка планов цехов и участков; определение зон территории предприятия; разработка схем путевого развития; размещение объектов технологической инфраструктуры

На первом этапе осуществляется выбор способов и средств транспортирования ремонтируемых узлов и агрегатов, составление схем маршрутов и расчет объемов грузопотоков, определение структуры и основных параметров складов и накопителей. Успешное решение поставленных задач позволяет на втором этапе осуществить расчет параметров и показателей технологической системы, определить состав оборудования и средств доставки, оценить размеры складов, накопителей, размер оборотного фонда материалов и комплектующих, разработать варианты производственного графика с учетом производительности цехов и участков. Завершающим этапом проектирования является разработка компоновочных и планировочных решений производственных помещений, объектов инженерной, энергетической, социально-бытовой и транспортной инфраструктуры.

На каждом из этапов предполагается оптимизация проектных решений по локальным критериям. В качестве последних используются коэффициенты загрузки технологического оборудования, транспортно-накопительных и складских средств, размер производственных и вспомогательных площадей технологических участков, коэффициенты технологической замкнутости и т. д. [1].

При проектировании производственных систем существует довольно жесткая связь между этими компонентами. Так, например, структура и характеристики ремонтного фонда узлов и агрегатов подвижного состава, технологические требования к ремонту определяют состав технологического оборудования и его характеристики, выбор способа производства, специализацию технологических участков, показатели системы транспортного обслуживания. Последние в свою очередь влияют на компоновочные и планировочные решения, инженерное обеспечение, организацию процессов функционирования производственной системы в целом.

По этой причине после предварительной оптимизации проектных решений на уровне отдельных рабочих мест производится комплексный анализ основных функциональных элементов технологической системы предприятия по группе критериев, отражающих ключевые технические и финансово-экономические показатели инвестиционного проекта.

1. Производственные площади. Стоимость одного квадратного метра промышленного строительства колеблется от 5 до 12.5 тыс. р. Статья «здания и сооружения» находится на первом месте в смете расходов и составляет более 40 % совокупных финансовых затрат.

На этапе предварительной проработки технологических решений потребная производственная площадь рассчитывается по суммарной площади оборудования с учетом дополнительного пространства для зон управления, обслуживания, складирования материалов и комплектующих на рабочих местах, промежуточного складирования ремонтного фонда, путей для транспортировки узлов и деталей, контрольно-испытательных станций, устройств энергоснабжения. Дополнительные площади учитываются в виде соответствующих коэффициентов запаса $k_i^{(\text{тх})}$ ($k_i^{(\text{тх})} > 1$), рекомендуемые значения которых приведены в соответствующей справочной и методической литературе [например, см. 2]:

$$S_{\text{тх}} = \sum_{i=1}^{K} S_i \cdot \prod_{i=1}^{n} k_i^{(\text{тх})} \to \min, \qquad (1)$$

где S_i – площадь оборудования с учетом зон управления и обслуживания, м^2;

K – количество единиц оборудования в цехе в соответствии с принятым вариантом технологических решений.

Задача проектирования может сводиться не только к разработке проектных решений, обеспечивающих выполнение заданной программы ремонта с минимальными затратами, но и к выбору оптимальных масштаба и плана производства, которые должны обеспечить максимальную доходность в сложившихся внешних условиях. Например, соотношения между проектными мощностями для выполнения текущего, деповского и капитального ремонта грузовых вагонов, текущего и среднего ремонта локомотивов, собственного или стороннего ремонта колесных пар и др. В этом случае технологическая система предприятии рассматри-

вается и анализируется с учетом факторов внешнеэкономического окружения и исследуется с применением методов теории игр [3].

Сравнение проектных решений выполняется с точки зрения полезности производственных площадей. Критерий оценки – коэффициент доходности, тыс. р./м^2:

$$K_S = \frac{R(t)}{S_{\text{тх}}} \to \max, \tag{2}$$

где R – расчетная величина прибыли, которая может быть получена при оказании услуг по ремонту подвижного состава на производственной площади $S_{\text{тх}}$, тыс. р.

Снижение потребных объемов производственных площадей является комплексной задачей, затрагивающей технологию ремонта, материально-техническое снабжение, производственную логистику, методы организации труда. Задача оптимизации сводится к выбору варианта, обеспечивающего максимальное значение коэффициента K_s, с учетом возможных маркетинговых, технологических и экономических ограничений на параметры реализации проекта.

2. Энергоемкость производства. Затраты топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) составляют до 10 – 12 % себестоимости ремонта подвижного состава. При анализе энергопотребления необходимо выделять переменную составляющую – технологические затраты и условно-постоянную – затраты на энергообеспечение производственной инфраструктуры. Оценка энергетической эффективности вариантов технологических решений производится по показателю удельной энергоемкости ремонта, т.у.т. или р.:

$$c_j^{(\text{P})} = \frac{\sum_{i=1}^{N_j} C_i^{(\text{TX})} + C^{(\text{OXP})} \cdot \alpha_j}{N_j(t)} \to \min, \tag{3}$$

где $C_i^{(\text{TX})}$ – технологические затраты топливно-энергетических ресурсов (ТЭР);

$C^{(\text{OXP})}$ – затраты на отопление, освещение, вентиляцию зданий;

$N(T)$ – программа ремонта за период t (единиц);

α_i – распределение инфраструктурных затрат по видам ремонта – может быть принято пропорциональным затратам на технологические операции при условии нормировки $\sum_{j=1}^{n} \alpha_j = 1$ или найдено расчетно-аналитическим путем по результатам энергетического обследования предприятия.

Расчет затрат ТЭР на технологические операции ремонта подвижного состава производится по удельным нормам, приведенным в технических характеристиках на оборудование с учетом показателей его использования [4]. Оценка непроизводительных затрат на устранение брака в работе по причине низкого качества ремонта выполняется приближенно с учетом доли дополнительных технологических затрат ТЭР на повторный ремонт в процентном соотношении от плановых затрат.

Суммарная технологическая энергоемкость рассчитывается так:

$$C^{(\text{TX})} = \sum_{k=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} C_{ij}^{(\text{TX})} \cdot N_{ij}, \tag{4}$$

где N_{ij} – объем j-го вида ремонта k-го типа подвижного состава за год.

Снижение технологической энергоемкости достигается за счет использования энергосберегающего технологического оборудования, прогрессивных методов ремонта, повышения коэффициента полезного использования площади зданий и сооружений, оптимизации логистики, сокращения брака и возврата на повторный ремонт узлов и агрегатов подвижного состава [5].

3. Производственная логистика. Сравнение нескольких вариантов размещения технологического оборудования, накопителей, складов, компоновки производственных цехов и участков выполняется по критерию минимума мощности технологического грузопотока, т·м [2]:

$$F = \sum_{i=1}^{z} \sum_{ab=1}^{h} m_i \cdot l_{abi} \to \min, \quad (5)$$

где z – число перемещаемых узлов и деталей подвижного состава;

h – число операций в производственном процессе ремонта i-го узла или детали;

m_i – масса узла или детали і-го наименования, т;

l_{abi} – расстояние между a-й и b-й рабочими позициями, на которое происходит перемещение і-го наименования изделия, м.

Показатель является условным, так как не учитывает характеристики транспортной системы, наибольшее распространение он получил на этапе предварительной оценки компоновочных и планировочных решений.

4. Запасы незавершенного производства. Удельная потребность в материальных запасах m на единицу ремонта определяется объемом неснижаемого резервного фонда технически исправных узлов и агрегатов $m^{(РЗ)}$ и непосредственно объемами незавершенного производства продукции $m^{(ТХ)}$, обусловленными собственной технологической емкостью цехов и участков в случае, когда время полного цикла технологических операций ремонта оборудования превышает норму простоя подвижного состава на ремонте:

$$m_j = \frac{m^{(РЗ)} + m^{(ТХ)}}{N_j(t)} \to \min. \quad (6)$$

Объем незавершенного производства зависит не только от производственной программы предприятия и времени ремонта, но и в существенной мере от системы организации производства, эффективности производственной логистики и материально-технического снабжения. Эффективным способом сокращения запасов при ремонте подвижного состава является внедрение технологий «бережливого» производства.

5. Производственная мощность и производительность труда. Реализуемая проектная мощность и производительность труда являются наиболее важными интегральными показателями, характеризующими эффективность предложенных вариантов технологических проектных решений. Ввиду чрезвычайной сложности точной оценки данных показателей аналитическим способом на практике ограничиваются расчетом производственной мощности по производительности лимитирующей группы технологического оборудования (или участка). Вычисления производятся по средним нормам трудоемкости для типовых технологических процессов с учетом поправочных коэффициентов. Общее решение для расчета производительности труда с учетом показателей надежности оборудования может быть представлено в виде выражения [6]:

$$p = \prod_{i=1}^{n} k_i \frac{R \cdot T \cdot e^{(-t\lambda)}}{F} \to \max, \quad (7)$$

где k_i – коэффициенты, учитывающие показатели прогрессивности оснащения, механизации, автоматизации, гибкости технологического оборудования и другие особенности производства;

R – потребная численность персонала;

F – годовой фонд рабочего времени, ч;

T – средняя трудоемкость ремонта единицы подвижного состава, чел.·ч;

t – время работы технологического оборудования, ч.;

λ – приведенная интенсивность отказов машин и механизмов, 1/ч.

Обобщая изложенное, можно констатировать, что традиционные экспертные и расчетно-аналитические методики оценки качества технологических проектных решений являются весьма приближенными, не учитывают ряд принципиально важных вопросов, связанных с работой системы транспортного обслуживания, материально-технического снабжения, взаимодействия технологических позиций и участков, неравномерной загрузки оборудования в течение рабочей смены и ряд других, играющих важную роль в работе предприятия.

Как показывает современная отечественная и зарубежная практика, одним из наиболее эффективных методов оценки проектных решений является имитационное математическое моделирование. Проведение серии вычислительных экспериментов позволяет не только с более высокой точностью рассчитать рассмотренные выше параметры и показатели работы предприятия, но и получить максимально полную информацию о динамическом поведении технологической системы еще до фактического ее запуска в эксплуатацию.

Для задач имитационного моделирования технологических процессов ремонта подвижного состава предлагается использование моделей, созданных на основе ориентированных паттерновых сетей [7, 8]. Основным понятием теории паттернов является понятие абстрактной образующей (паттернового модуля) и неотделимых от нее связей. Паттерновые сети строятся из образующих путем попарного объединения связей различных образующих в связки. Множество всех образующих называется составом сети, а множество всех связок – структурой.

Множество G образующих сети конечно и образующие пронумерованы. Каждая образующая $g \in G$ полностью определяется вектором своих признаков:

$$a(g) = a\left(i, \gamma_{i1}, ..., \gamma_{il_i}, \beta_{i1}^{in}, ..., \beta_{im_i}^{in}, \beta_{i1}^{out}, ..., \beta_{ir_i}^{out}\right), \quad (8)$$

где i – порядковый номер образующей;

$y_{ik}, k = 1, ..., l_i$ – атрибуты образующей;

m_i и r_i – количество входящих и исходящих связей;

$\beta_{ik}^{in}, k = 1, ..., m_i$ и $\beta_{ik}^{out}, k = 1, ..., r_i$ – показатели входных и выходных связей образующей.

Атрибуты и показатели связей образующих являются переменными величинами. Множества D_{ik}, D_{ik}^{in} и D_{ik}^{out} допустимых значений переменных γ_{ik}, β_{ik}^{in} и β_{ik}^{out} определяют информационное содержимое образующей и называются доменами соответствующих переменных. Для дискретных паттерновых сетей домены всех переменных являются конечными или счетными множествами. Состав, структура и содержание определяют структурный скелет сети.

На каждой связке паттерновой сети устанавливается бинарное отношение между двумя переменными β^{out} и β^{in}, называемое отношением связей, принимающим значение «истина» (соединенное состояние) либо «ложь» (разъединенное). Структурные связи паттерновых сетей всегда являются истинными, а каждая связка ассоциированной паттерновой сети может находиться в двух состояниях – истинном или ложном. Состояние связки зависит от значений соответствующих показателей связей.

Образующая может быть визуально представлена в виде графической схемы. Изобраенные на схемах входные и выходные связи ориентированных образующих наглядно представляют входы и выходы технологических операций с номером k (рисунок 2).

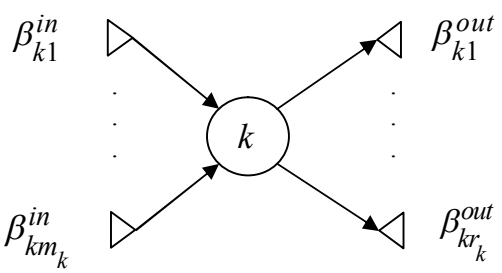


Рисунок 2 – Представление образующей в виде графической схемы

Для технологической сети образующие являются технологическими операциями. Количество входящих и исходящих связей образующей определяется типом и взаимосвязями технологической операции. Домены атрибутов образующих содержат возможные значения параметров технологических операций, условия их выполнения и другую необходимую информацию.

Технологические позиции и участки представляют собой стандартные фрагменты общей сети – регулярные конфигурации, составленные из комбинаций паттерновых модулей, связи между которыми полностью определяются технологическим процессом ремонта.

Паттерновая сеть является средой для дискретного динамического моделирования технологических процессов ремонта подвижного состава. Работа модели основывается на прин-

ципе моделирования особых состояний системы – характерных событий, наступающих в момент возникновения заявки на транспортное обслуживание при завершении технологической операции. Событие служит условием соединения связок паттерновой сети.

В качестве исходных данных при разработке имитационной модели использованы спецификация, характеристики оборудования и план его размещения, стандартное описание технологических процессов, ожидаемые проектные показатели согласно требованиям технического задания. Итоговым результатом вычислительных экспериментов является фактический график работы по каждой единице технологического оборудования с учетом перечисленных выше условий и ограничений.

По результатам имитационного моделирования оцениваются следующие параметры и показатели, характеризующие качество проектных технологических решений:

фактическая производительность предприятия (цеха, участка), ед./день –

$$\frac{1}{m}\cdot\sum_{k=1}^{m}N_k, \tag{9}$$

где m – количество рабочих дней в интервале моделирования;

коэффициенты загруженности оборудования по времени –

$$\frac{T_{\text{раб}}}{T_{\text{мод}}}, \tag{10}$$

где $T_{\text{раб}}$ – общее время работы в интервале моделирования;

$T_{\text{мод}}$ – длина интервала моделирования;

среднее время ожидания средства доставки, мин, –

$$\frac{1}{d}\sum_{k=1}^{d}\left(t_{\text{нв}}(k)-t_{\text{п}}(k)\right), \tag{11}$$

где d – общее количество заявок на перемещение ремонтируемых узлов и агрегатов;

$t_{\text{нв}}(k)$– время начала выполнения заявки;

$t_{\text{п}}(k)$ – время поступления заявки;

средняя длина очереди заявок на перемещение ремонтируемых узлов и деталей, шт., –

$$\frac{1}{T_{\text{мод}}}\sum_{k=1}^{T_{\text{мод}}}N_k, \tag{12}$$

где N_k – количество заявок на перемещение на k-й минуте моделирования;

средняя дальность единичного перемещения, м, –

$$\frac{1}{d}\sum_{k=1}^{d}l(k), \tag{13}$$

где l – протяженность маршрута перемещения при выполнении заявки;

грузовая работа подъемно-транспортных механизмов за цикл ремонта одной единицы оборудования подвижного состава, т·м, –

$$\sum_{k=1}^{g}m_k\cdot l_k, \tag{14}$$

где g – общее количество заявок на перемещение за цикл ремонта.

Полученные результаты являются основой для локальной оптимизации проектных решений отдельных технологических участков и цехов по ремонту подвижного состава: уточнения компоновочных и планировочных схем, выбора параметров технологического оборудования, состава и количества средств доставки, размеров и мест размещения промежуточных накопителей, режима и графика работы [9].

Алгоритм оптимизации проектных решений с использованием результатов имитационного моделирования может быть представлен в виде схемы, приведенной на рисунке 3.

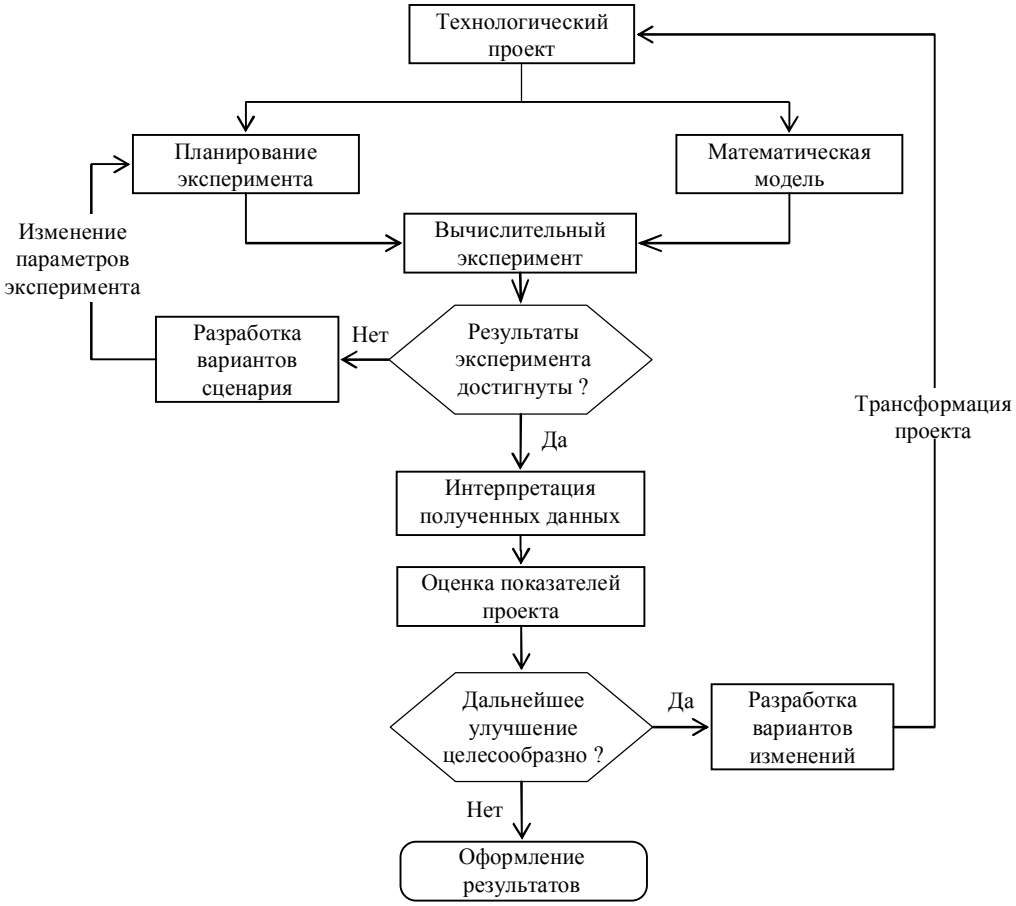


Рисунок 3 – Алгоритм оптимизации проектных решений методами имитационного моделирования

Оптимизация технологических решений методами имитационного моделирования представляет собой многоитерационный процесс и производится в несколько этапов. На первом этапе формируется и реализуется в компьютерном виде собственно имитационная модель, разрабатываются план и сценарии вычислительных экспериментов, готовятся массивы данных структурных параметров и переменных модели.

После проведения эксперимента (одного или заданной серии) делается вывод о достижении поставленных целей, соответствии полученных результатов плану эксперимента, полноте и достаточности данных для оценки проекта. В случае необходимости производятся корректировка исходных данных и дополнительные итерации.

Далее производится интерпретация полученных данных и оценка проекта по комплексу показателей, рассмотренных выше, принимается решение о целесообразности улучшений или завершении работ и оформлении результатов.

Но основании изложенного можно сделать выводы.

1. Технологическое проектирование предприятий по ремонту подвижного состава представляет собой сложный многошаговый итерационный процесс, отдельные элементы функциональной структуры которого тесно взаимосвязаны между собой.

2. Оптимизация проектных решений производится на нескольких уровнях агрегирования при формировании технологической системы от отдельного рабочего места до участка, цеха и предприятия в целом по группе критериев, отражающих ключевые технические и финансово-экономические показатели инвестиционного проекта: производственные площади, энергоемкость, запасы незавершенного производства, производственную мощность и производительность труда.

3. Наиболее достоверная оценка качества технологических решений возможна путем динамического имитационного моделирования технологических процессов ремонта подвижного состава, позволяющего провести анализ работы предприятия и взаимодействия ключевых

подсистем ремонтного производства, таких как оборудование, транспорт, материально-техническое снабжение, планирование и управление.

4. В качестве способа реализации предлагается использование методики моделирования на основе модульного принципа паттерновых сетей, позволяющей обеспечить высокую степень детализации представления объекта исследования при приемлемых трудозатратах и сроках создания имитационной модели.

Список литературы

1. Проектирование автоматизированных участков и цехов [Текст] / В. П. Вороненко, В. А. Егоров, М. Г. Косов и др.; под ред. Ю. М. Соломенцева. – М.: Высшая школа, 2003. – 272 с.

2. Грундиг, К. Г. Проектирование промышленных предприятий: Принципы. Методы. Практика [Текст]: Пер. с нем. / К. Г. Грундиг.– М.: Альпина Бизнес Букс, 2007. – 340 с.

3. Кини, Р. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения [Текст]: Пер. с англ. / Р. Кини, Х. Райфа.– М.: Радио и связь, 1981. – 560 с.

4. 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.

5. Смирнов, В. А. Энергосбережение при ремонте и техническом обслуживании локомотивов [Текст] / В. А. Смирнов, А. С. Талызин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2011. – № 4. – С. 41 – 49.

6. Болотин, М. М. Математические модели инженерного анализа вагонных депо [Текст] / М.М. Болотин // Мир транспорта. – 2005. – № 3. – С. 4 – 15.

7. Grenander, U. General Pattern Theory / U. Grenander. – Oxford University Press, 1993. – 904 p.

8. Смирнов, В. А. Имитационное моделирование технологических процессов ремонта подвижного состава [Текст] / В. А. Смирнов, А. М. Семенов // Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Современные направления теоретических и прикладных исследований – 2012». – Одесса: Куприенко, 2012. – Вып. 1. – Т. 1. – С 74 – 77.

9. Смирнов, В. А. Модульный принцип моделирования технологических процессов ремонта подвижного состава [Текст] / В. А. Смирнов, А. М. Семенов // Мир транспорта. – 2012, № 4.

УДК 629.423.31

ПРИМЕНЕНИЕ ИННОВАЦИОННОГО МЕТОДА ОБРАБОТКИ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА КОЛЛЕКТОРОВ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Белан Дмитрий Юрьевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-18-11.

В данной статье рассматривается вопрос об использовании инновационной технологии – науглероживании медных пластин коллектора и устройства для формирования углеродистого слоя на рабочей поверхности коллектора тяговых электродвигателей. Для улучшения коммутационных характеристик и повышения надежности работы электрических машин постоянного тока предлагается использовать электроэрозионный метод обработки.

Ключевые слова: *тяговый электродвигатель, коллектор, генератор импульсов, углерод.*

THE USE OF AN INNOVATIVE METHOD OF TREATMENT FOR THE IMPROVEMENT OF TECHNOLOGY OF REPAIR SEWERS TRACTION MOTORS

Belan Dmitry Urevich
Omsk State Transport Univirsity (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., the senior lecturer of the departament «Technology of transport machine-building and repair of rolling stock», OSTU.
Phone: (3812) 31-18-11.

This article discusses the use of innovative technology-carburizing copper collector plates and apparatus for forming a carbon layer on the working surface of the collector traction motors. To improve switching performance and improve the reliability of electric vehicles are encouraged to use the DC electroerosion processing method.

Keywords: *drive motor, collector, pulse generator, carbon*.

УДК 629.46:629.4.027.23

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ ЛИТОЙ И СВАРНОЙ БОКОВЫХ РАМ ТРЕХЭЛЕМЕНТНЫХ ТЕЛЕЖЕК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

Бельский Александр Олегович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Аспирант кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ОмГУПС.
Тел.: 8 (923) 677-19-47.
E-mail: mail-n@bk.ru

В статье выполнен анализ конструкции литой и сварной боковых рам трехэлеметных тележек. Рассмотрены направления дальнейшего совершенствования конструкции боковой

рамы тележки.

Ключевые слова: *грузовой вагон, тележка, боковая рама, литая, сварная, прочностной анализ, метод конечных элементов.*

DESIGN ANALYSIS CASTING AND WELDING SIDE FRAMES THREE-PIECE BOGIES FREIGHT CARS

Belsky Alexandr Olegovich
Omsk State Transport Univirsity (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Post-graduate student of the of the department «Wagons and wagon farm», OSTU.
Phone: 8 (923) 677-19-47.
E-mail: mail-n@bk.ru

In this paper analyzed the design of cast and weld side frames three-piece bogies. The directions of further improvement design side of a bogie frame.

Keywords: *freight car, bogie, side frame, cast, weld, strength analysis, finite element method.*

УДК 629.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРОИЗОЛИРУЮЩЕЙ ПОДВЕСКИ С НЕЛИНЕЙНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ КОМПЕНСАТОРОМ ЖЕСТКОСТИ И С ЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМОЙ ПЕРЕСТРОЙКИ

Гурова Елена Геннадьевна
Новосибирский государственный технический университет (НГТУ).
630092, г. Новосибирск, пр. Маркса, 20.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехнические комплексы», НГТУ.
Тел.: +7 (383) 346-17-91.
E-mail: lena319@mail.ru

Курбатов Владимир Сергеевич
Производственное объединение «Север» (ФГУП ПО «Север»).
630020, г. Новосибирск, ул. Объединения, 3.
Ведущий инженер отдела оборонки, «Север».
Тел.: +7 (383) 346-17-91.
E-mail: vol8@mail.ru

Воробьева Алена Константиновна
Новосибирский государственный технический университет (НГТУ).
630092, г. Новосибирск, пр. Маркса, 20.
Магистрант кафедры «Электротехнические комплексы», НГТУ.
Тел.: +7 (383) 346-17-91.
E-mail: akvo_91@mail.ru

В статье выполнено математическое описание, позволяющее оценить свойства системы на стадии ее теоретической разработки. Рассмотрена модель виброизолирующей подвески с линейной системой перестройки, которая позволяет исследовать динамические характеристики виброизолирующей системы с электромагнитным компенсатором жесткости. Приведены результаты моделирования в программе Matlab.

Ключевые слова: *вибрация, виброизолятор, компенсатор жесткости, моделирование.*

MODELING VIBRATION ISOLATION WITH NONLINEAR ELEKTROMAGNETIC RIGIDITY KOMPENSATOR LINEAR CONTROL SYSTEM

Gurova Elena Gennadievna
Novosibirsk State Technical University (NSTU).
20, Marx av., Novosibirsk, 630092, Russia.
Ph. D., the senior lecturer of the department «Electrical complexes», NSTU.
Tel.: +7 (383) 346-17-91.
E-mail: lena319@mail.ru

Kurbatov Vladimir Sergeevich
Production Association «North» (FSUE «North»).
3, Unification av., Novosibirsk, 630020, Russia.
Leading engineer in the defense industry, «North».
Tel.: +7 (383) 346-17-91.
E-mail: vol8@mail.ru

Vorobyova Alain Konstantinovna
Novosibirsk State Technical University (NSTU).
20, Marx av., Novosibirsk, 630092, Russia.
Post-graduate student of the department «Electrotechnical complexes», NSTU.
Tel.: +7 (383) 346-17-91.
E-mail: akvo_91@mail.ru

The paper is mathematical description, which allows to evaluate the properties of the system at the stage of theoretical development. A model of the anti-vibration suspension system with linear adjustment, which allows to study the dynamic characteristics of vibration isolation system threads compensation rigidity. The results of simulation program Matlab.

Keywords: *vibration, vibration isolators, rigidity compensator, modeling.*

УДК 629.4.015: 629.42: 625.1.03

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМА ЗАГРУЖЕННОСТИ ПО СЦЕПЛЕНИЮ ЛОКОМОТИВОВ С АСИНХРОННЫМИ ТЯГОВЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Ламкин Андрей Геннадьевич
Проектно-конструкторское бюро локомотивного хозяйства ОАО «РЖД».
105066, г. Москва, Ольховский переулок, 205.
Заместитель директора по тяговому подвижному составу ПКБ ЦТ ОАО «РЖД».
Тел.: (499) 262-28-00.
E-mail: Lamkin@pkbct.ru

Олешко Сергей Борисович
Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС).
344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского стрелкового полка народного ополчения, 2.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая механика», РГУПС.
Тел.: (863) 245-37-47.
E-mail: centrkte@rgups.ru

Пустоветов Михаил Юрьевич
Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС).
344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского стрелкового полка народного ополчения, 2.
Кандидат технических наук, доцент, директор НИИЦа «Криотрансэнерго», РГУПС.
Тел.: (863) 245-37-47.
E-mail: mgsn2006@rambler.ru

Разработан метод определения режима загруженности локомотивов по сцеплению на основе статистического критерия Фишера. Представлены результаты применения метода к данным опытных поездок с электровозом 2ЭС10 на Свердловской железной дороге.

Ключевые слова: *расчетный коэффициент сцепления, коэффициент тяги, грузовой локомотив, асинхронный тяговый двигатель, критерий Фишера, тренд.*

WHEELS AND RAILS ADHESION MODE DETERMINATION FOR LOCOMOTIVES WITH INDUCTION TRACTION MOTORS

Lamkin Andrey Gennadievich
Locomotive drafting bureau of Locomotive department JSC «Russian Railways».
Deputy Director for locomotives of Locomotive drafting bureau of Locomotive department – Filial of JSC «Russian Railways».
205, Moscow, Olkhovsky by-street, 105066, Russia.
Phone: (499) 262-28-00.
E-mail: Lamkin@pkbct.ru

Oleshko Sergey Borisovich
Rostov State Transport University (RSTU).
2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, 344038, Russia.
Ph. D., associate professor of the department «Theoretical Mechanics», RSTU.
Phone: (863) 245-37-47.
E-mail: centrkte@rgups.ru

Pustovetov Michail Yurievich
Rostov State Transport University (RSTU).
2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, 344038, Russia.
Ph. D., associate professor, director in Science-Investigation and Test Center «Cryotransenergo», RSTU.
Phone: (863) 245-37-47.
E-mail: mgsn2006@rambler.ru

The method of wheels and rails adhesion mode determination for locomotives based on Fisher statistical criteria is designed. Freight DC electric locomotive 2ES10 experimental trips on Sverdlovsk railway data processing results are presented.

Keywords: *design adhesion coefficient, traction coefficient, freight locomotive, induction traction motor, Fisher criteria, trend.*

УДК 629.4.027.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ БАНДАЖЕЙ КОЛЕСНЫХ ПАР

Терехов Павел Михайлович
Петербургский государственный университет путей сообщения (ПГУПС).

190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9.
Ассистент кафедры «Технология металлов», ПГУПС.
Тел.: 8-921-306-46-99.
E-mail: t89213064699@gmail.com

Бургонова Оксана Юрьевна
Омский государственный технический университет (ОмГТУ).
644050, г. Омск, пр. Мира, 11.
Доцент кафедры «Материаловедение и технология конструкционных материалов», ОмГТУ.
E-mail: oksbourg@mail.ru

Воробьев Александр Алфеевич
Петербургский государственный университет путей сообщения (ПГУПС).
190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология металлов», ПГУПС.
E-mail: vorobev_alex@mail.ru

В статье отмечена необходимость совершенствования технологии ремонта колесных пар локомотивов. Предложена модель описания процесса обработки бандажей на фрезерных станках на основе термомеханического подхода к восстановлению поверхности катания бандажей. На основе модели приведен метод аналитического определения сил фрезерования, температуры передней и задней поверхностей твердосплавных пластин. Представлены результаты сопоставления экспериментальных данных и данных, полученных аналитически.

Ключевые слова: *бандаж, колесная пара, восстановление поверхности катания, фрезерование, силы резания при фрезеровании.*

SIMULATION OF THE RESURFACING OF RAILWAYS WHEELS TREAD

Terekhov Pavel Mihailovich
St. Petersburg State Transport University (PSTU)
9, Moskovski av., St. Petersburg., 190031, Russia.
Assitstent of the department «Metal Technology» PSTU.
Phone: +7-921-306-46-99.
E-mail: t89213064699@gmail.com

Burgonova Oksana Urevna
Omsk State Technical University (OSTU).
11, Mira av., 644050, Omsk, Russia.
Lecturer of the department «Mechanical Engineering and Constructional Materials», OSTU.
E-mail: oksbourg@mail.ru

Vorobyov Alexander Alfeevich
St. Petersburg State Transport University (PSTU)
9, Moskovski av., St. Petersburg., 190031, Russia.
Ph. D., associate professor of the department «Metal Technology», PSTU.
E-mail: vorobev_alex@mail.ru

The article noted the need to improve the technology of repair locomotive wheelsets. We propose a model describing the process of machining tread on milling machines based on thermo-

mechanical approach to cutting metal. On the basis of the model is a method for analytical determination of the forces of milling, the temperature front and rear surfaces of the carbides. Presented results of the comparison of experimental data and data obtained analytically.

Keywords: *wheel tread, wheelset, rework of roll surface, milling cut, cutting force of milling.*

УДК 62-836

МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ЧАСТОТНОГО ПРИВОДА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ВЗАИМНОЙ НАГРУЗКИ

Чегодаев Федор Васильевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-05-89.
E-mail: karagez@yandex.ru

Чижма Сергей Николаевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-05-89.
E-mail: chisn@yandex.ru

Спиридонов Владимир Андреевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и системы управления, ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-05-89.

Рассматривается кинематическая схема стенда для экспериментальных исследований частотного асинхронного привода. Приводятся описание кинематической схемы и математической модели при взаимной нагрузке, пример построения семейства механических характеристик на основе экспериментальных данных с учетом внутренних потерь в машине. Приведены динамическая модель асинхронного двигателя и результаты моделирования в приложении Simulink.

Ключевые слова: *асинхронный двигатель, частотный преобразователь, механическая характеристика, математическая модель, структурная схема.*

MODELING ASYNCHRONOUS FREQUENCY DRIVE THROUGH MUTUAL LOAD METHOD

Chegodaev Feodor Vasilevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., associate professor of the department «Automation and control system», OSTU.
Phone: (3812) 31-05-89.
E-mail: karagez@yandex.ru

Chizhma Sergey Nikolaevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., associate professor of the department «Automation and control system», OSTU.
Phone: (3812) 31-05-89.
E-mail: chisn@yandex.ru

Spiridonov Vladimir Andreevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., associate professor of the department «Automation and control system», OSTU.
Phone: (3812) 31-05-89.

A kinematical system of the test bench for experimental investigations of the frequency asynchronous driving gear is consider. Description of the kinematical system and mathematical model on the assumption of back-to-back is produces. As well as example of construction of the mechanical data family on basis of experimental data taking into account of the inner loss in the system is produces. Dynamical model of the asynchronous motor and results of the modeling in matlab simulink is produces.

Keywords: *asynchronous motor, frequency reformer, mechanical data, mathematical model, block diagram.*

УДК 629.488

НАРАБОТКА ЛОКОМОТИВОВ В ЕДИНОМ ВРЕМЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Четвергов Виталий Алексеевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-17.

Мишин Анатолий Иванович
Производственное конструкторско-технологическое предприятие «Транспорт» (ООО «ПКТП «Транспорт»).
644023, г. Омск, ул. Баранова, 2, а.
Кандидат технических наук, начальник отдела ПКТП «Транспорт».
E-mail: ai_mishin@mail.ru

Сиряк Павел Анатольевич
Научно-исследовательский институт технологии, контроля и диагностики железнодорожного транспорта (ОАО «НИИТКД»).
644005, г. Омск, ул. Избышева, 3, корп. 2.
Ведущий инженер-конструктор ОАО «НИИТКД».
E-mail: alkid1984@gmail.com

На основе исследования статистической информации банка данных, сформированного с использованием аппаратно-программного комплекса «Борт», предложена методика для отображения времени измерения параметров дизель-генераторной установки маневровых тепловозов ТЭМ2 в едином временном пространстве.

Ключевые слова: *статистическая информация, банк данных, параметры дизель-генераторной установки, наработка локомотивов, множества, отображение в едином временном пространстве.*

RUNNING HOURS LOCOMOTIVES AT THE INTEGRATED TIME SPACE

Chetvergov Vitaliy Alekseevich
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Omsk State Transport University (OSTU).
Dr. Sci. Tech., professor of the department « Locomotives », OSTU.
Phone: (3812) 31-34-17.

Mishin Anatoliy Ivanovich
Co Ltd «Manufacturing engineering and design enterprise «Transport».
2, a, Baranova st., Omsk, 644023, Russia.
Ph. D., head of department «Manufacturing engineering and design enterprise «Transport».
E-mail: ai_mishin@mail.ru

Siryak Pavel Anatolievich
Public Joint Stock Company «Scientific-Research Institute of technology, monitoring and diagnosis».
3, Bldg. 2, Omsk, Izbysheva st.,644005, Russia.
Principal design engineer of the company «Scientific-Research Institute of technology, monitoring and diagnosis».
E-mail: alkid1984@gmail.com

As a result of work statistical data bank of hardware and software complex «Bort» was researched. Methodology for TEM2 locomotive deiesel-generator plant parameters indicating while running hours transformation in integrated time space is suggested.

Keywords: *statistical information, data bank, parameters diesel-generator plant, running hours locomotives, set, transformation at the integrated time space.*

УДК 629.4.027.432: 629.4.027.352

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ УПРУГОЙ ПРОКЛАДКИ ОБОДА КОЛЕСНОЙ ПАРЫ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ

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», ОмГУПС.
E-mail: shiler_val@inbox.ru

Шилер Александр Валерьевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и системы управления», заместитель декана по учебной работе Института автоматики, телекоммуникаций и информационных технологий, ОмГУПС.

Выполнена оценка напряженного состояния упругой прокладки обода колесной пары новой конструкции и разработана и обоснована методика ее расчета.

Ключевые слова: *колесная пара, подрессоренный обод, напряженное состояние, резиновая прокладка.*

THE STRESS STATE OF THE ELASTIC LINING THE RIM OF THE NEW DESIGN, THE WHEEL SET

Shiler Valeriy Viktorovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., assistant professor of the department «Rolling the same electricsion of roads», OSTU.
E-mail: shiler_vai@inbox.ru

Shiler Alexandr Valerievich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., assistant professor of the department «Automation and Control Systems ", associate dean for academic affairs of the Institute of Automation, Telecommunications and Information Technology, OSTU.

The evaluation of the stress state of the elastic pad rim wheel set new design and the substantiation method of its calculation.

Keywords: *wheel set, shock-mounted hoop, stress, rubber.*

УДК 621.331:621.311

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ С ПРИМЕНЕНИЕМ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

Москалев Юрий Владимирович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-18-27.
E-mail: yuriyvm@mail.ru

Карабанов Максим Александрович
Дорожная электротехническая лаборатория Западно-Сибирской железной дороги (ДЭЛ ЗСЖД).
644020, г. Омск, ул. Леконта, 20.
Кандидат технических наук, электромеханик ДЭЛ ЗСЖД.
Тел.: (3812) 44-27-61.
E-mail: zmax04@mail.ru

На участках железных дорог, электрифицированных на постоянном токе, существует проблема неполной реализации существующего потенциала рекуперативного торможения, что в ряде случаев связано с отсутствием приемников энергии рекуперации. Предложена методика определения оптимальных параметров стационарного накопителя электроэнер-

гии и оптимального закона регулирования его режимов заряда и разряда, которая может быть использована при проектировании и технико-экономическом обосновании эффективности внедрения стационарных накопителей энергии на тяговых подстанциях постоянного тока.

Ключевые слова*: накопитель энергии, тяга поездов, рекуперация, электроэнергия.*

INCREASING EFFICIENCY OF TRACTION NETWORK DC RAILWAY USING ENERGY STORAGE DEVICES

Moskalev Yuriy Vladimirovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., the senior lecturer of the dapartament «Electric machines and electrical engineering», OSTU.
Phone: (3812) 31-18-27.
E-mail: yuriyvm@mail.ru

Karabanov Maxim Alexandrovich
Electrotechnical laboratory of Western Siberian railway.
20, Lekonta st., Omsk, 644020, Russia.
Ph. D., electrician of electrotechnical laboratory of Western Siberian railway.
Phone: (3812) 44-27-61.
E-mail: zmax04@mail.ru

There is a trouble that electrical energy of trains which have a recuperative braking uses partly for DC railway, because there are not different consumers of the electrical energy in this time. The method was offered, it allows to find optimal parameters of a stationary energy storage, which locates on a traction substation. This method can be used for designing and determination efficiency of an energy storage.

Keywords: *energy storage, traction trains, recovery, electrical energy.*

УДК 621.436

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СМЕСЕВЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ ТЕПЛОВОЗОВ

Сковородников Евгений Иванович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-17, (3812) 68-45-08.
E-mail: skov1945@mail.ru

Анисимов Александр Сергеевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-17.

Гришина Юлия Борисовна
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Преподаватель кафедры «Безопасность жизнедеятельности и экология», ОмГУПС.
E-mail: gubuly@mail.ru

Глухова Мария Викторовна
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-06-23.
E-mail: Marta_omgups@mail.ru

В статье представлена методика для оценки эффективности использования смесевых углеводородных видов топлива в энергетических установках тепловозов. Модельные расчеты выполнены с учетом изменения физико-химических и теплофизических характеристик топливных смесей и условий эксплуатации тепловозов

Ключевые слова: *характеристики смесевых видов топлива, параметры работы цикла дизеля, эффективность использования*

THE TECHNIQUE FOR THE ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF THE APPLICATION OF THE MIXED HYDROCARBONIC KINDS OF FUEL IN THE POWER INSTALLATIONS OF DIESEL LOCOMOTIVES

Skovorodnikov Evgenie Ivanovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr. Sci. Tech., professor of the departament «Locomotives», OSTU.
Phone: (3812) 31-34-17, (3812) 68-45-08.
E-mail: skov1945@mail.ru

Anisimov Alexander Sergeevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., the senior lecturer of the chair «Locomotives», OSTU.
Phone: (3812) 31-34-17.

Grishina Julia Borisovna
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
The tutor of the departament «Safety of vital activity and ecology», OSTU.
E-mail: gubuly@mail.ru

Glukhova Maria Viktorovna
Omsk State University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., the senior lecturer of the departament «Power system», OSTU.
Phone: (3812) 31-06-23.
E-mail: Marta_omgups@mail.ru

It is offered the technique for the assessment of the efficiency of the application of the mixed

hydrocarbonic kinds of fuel in the power installations of diesel locomotives. The model calculations have been executed with a glance of the changing of the physicochemical and thermalphysic characteristics of the fuel mixtures and the service conditions of diesel locomotives.

Keywords: *Characteristics of mixed hydrocarbonic kinds of fuel; parameters of work of a cycle of the diesel locomotives; efficiency of use.*

УДК 331.33

ПОГЛОЩЕНИЕ ИЗБЫТОЧНОЙ ЗАРЯДНОЙ МОЩНОСТИ В ПРОТЯЖЕННЫХ МАЛОНАГРУЖЕННЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ 110 кВ

Третьяков Евгений Александрович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-18-27.
E-mail: TretyakovEA@omgups.ru

Краузе Андрей Викторович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-18-27.
E-mail: KrauseAV@omgups.ru

Ткач Вадим Александрович
Филиал ОАО «МРСК Сибири» – «Омскэнерго».
644047, г. Омск, ул. 5-я Северная, 193.
Начальник службы электрических режимов производственного отделения «Центр управления сетями» (СЭР ПО ЦУС).
Тел.: (3812) 355-559.
E-mail: Tkach_VA@om.mrsks.ru

В данной работе рассмотрена возможность применения управляемых шунтирующих реакторов (УШР) для поглощения избыточной зарядной мощности в протяженных малонагруженных линиях электропередач 110 кВ северных электрических сетей филиала ОАО «МРСК Сибири» – «Омскэнерго». Возникновение избытков реактивной мощности приводит к возрастанию напряжения в узлах энергосистемы и появлению значительных потерь мощности. Обосновано применение УШР, выполнен расчет их необходимой мощности, определено место установки, произведена предварительная технико-экономическая оценка УШР.

Ключевые слова: *качество электроэнергии, малозагруженные линии электропередач, оптимизация параметров режима, управляемый шунтирующий реактор.*

QUALITY ELECTRICITY DISTRIBUTION NETWORKS NOT CONSUMERS TRACTION

Tretyakov Eugene Alexandrovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., associate professor of the department «Electrical machinery and general electrical», OSTU.
Phone: (3812) 31-18-27.
E-mail: TretyakovEA@omgups.ru

Krause Anrdey Viktoroich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Post-graduate student of the department «Electrical machinery and general electrical», OSTU.
Phone: (3812) 31-18-27.
E-mail: KrauseAV@omgups.ru

Tkach Vadim Alexandrovich
The branch of JSC «IDGC of Siberia» – «Omskenergo».
193, 5th North st., Omsk, 644047, Russia.
Head of department.
Phone: (3812) 35-55-59.
E-mail: Tkach_VA@om.mrsks.ru

In this paper, the possibility of controlled shunt reactor (CSR) to absorb excess charging capacity in long lightly loaded transmission lines of 110 kV electric networks Nordic branch of JSC "IDGC of Siberia" - "Omskenergo." The emergence of excess reactive power leads to an increase in the voltage at the nodes of the power system and the emergence of significant power loss. The application of CSR, The calculation of the required power, the place of installation, pre-feasibility study.

Keywords: *power quality, malozagruzhennye power lines, parameter optimization mode, controlled shunt reactor*

УДК 621.331:621.311

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Черемисин Василий Титович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-13-44.
E-mail: nauka@omgups.ru

Никифоров Михаил Михайлович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, начальник научно-производственной лаборатории «Энергосберегающие технологии и электромагнитная совместимость», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 44-39-23.

В статье изложен порядок составления программ энергосбережения в хозяйстве электрификации и электроснабжения. Приведен перечень основных мероприятий, направленных на снижение потерь электроэнергии в тяговой сети и оборудовании тяговых подстанций, а

также на повышение пропускной способности участков железных дорог. Представлены результаты исследований по оценке потенциала повышения энергоэффективности системы тягового электроснабжения железных дорог.

Ключевые слова: *электрическая энергия, система тягового электроснабжения, энергосбережение.*

EVALUATING THE POTENTIAL OF ENERGY EFFICIENCY OF THE SYSTEM OF TRACTION ELECTRIC SUPPLY

Cheremisin Vasily Titovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr. Sci. Tech., professor, head of the departament «Rolling stock of electric railways», OSTU.
Phone: (3812) 31-13-44.
E-mail: nauka@omgups.ru

Nikiforov Michael Michajlovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., the chief of research-and-production laboratory «Power-saving up technologies and electromagnetic compatibility», OSTU.
Phone: (3812) 44-39-23.

The article sets forth the procedure for preparation of energy saving programmes for the system of traction electric supply. List of key measures aimed at reduction of losses of electric power in traction network and equipment of traction substations, and also on increase of carrying capacity of railway sections. Presents the results of studies evaluating the potential of energy efficiency of the system of traction electric supply of Railways.

Keywords: *electric power, the system of traction electric supply, energy saving.*

УДК 519.72

АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ КВАНТОВАНИЯ СИГНАЛОВ ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Зачатейский Евгений Дмитриевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Аспирант кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.
E-mail: zed@hotmail.ru

Лаврухин Андрей Александрович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.
E-mail: lavruhinaa@gmail.com

В статье приведен сравнительный анализ различных оптимальных методов квантования непрерывных сигналов, в том числе с минимальной среднеквадратичной ошибкой, с мак-

симальной энтропией и субоптимального по энтропии, при различных параметрах вероятностного распределения сигнала.

Ключевые слова: *квантование, неравномерное квантование, ошибка квантования, энтропия, минимум среднеквадратичного отклонения, нормальное распределение.*

ANALYSIS AND SIMULATION OF AN OPTIMIZATION ALGORITHM FOR SIGNALS QUANTIZATION

Zachateyskiy Evgeniy Dmitrievch
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Post-graduate student of the department «Automation and control systems», OSTU.
E-mail: zed@hotmail.ru

Lavruhin Andrey Alexandrovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., associate professor of the department «Automation and control systems», OSTU.
E-mail: lavruhinaa@gmail.com

The paper presents a comparative analysis of different methods of quantization of continuous signals, including optimal with the maximum entropy and the entropy – suboptimal, with various parameters of signal distribution.

Keywords: *quantization, uneven quantization, quantization noise, entropy, mean square error, normal distribution.*

УДК 004.942

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ОПТИМАЛЬНОЙ ИНТЕРПОЛЯЦИИ ВЕКТОРОМ, НЕЙТРАЛЬНЫМ ПО СВЕРТКЕ В ПРИЕМНОМ ТРАКТЕ КОММУНИКАЦИОННОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Королёва Ксения Андреевна
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Аспирант, инженер отдела «Нанотехнологии», ОмГУПС.
E-mail: jokie-ksu@mail.ru

В статье исследуется задача интерполяции сигналов нейтральным по свертке вектором. Предложен метод интерполяции, имеющий оптимальный результат в смысле равномерного распределения ошибки интерполяции в спектральной области. Представлены результаты численного эксперимента. Показана эффективность предложенного метода в смысле повышения точности восстановления дискретного сигнала в приемном тракте коммуникационного железнодорожного оборудования.

Ключевые слова: *оптимальная интерполяция, окно Чебышева, теорема Котельникова, спектр.*

APPLICATION OF OPTIMUM VECTOR INTERPOLATION, ARE NEUTRAL IN CONVOLUTIONS IN THE RECEIVING PATH ZHELEZHNODOROZHNOGO COMMUNICATION EQUIPMENT

Koroleva Ksenia Andreevna
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Post-graduate student, engineer of the «Nanotechnology», OSTU.
E-mail: jokie-ksu@mail.ru

In this paper we study the problem of interpolation signals neutral convolution vector. We propose an interpolation method, which has the best result in terms of even distribution of interpolation errors in the spectral region. Presents the results of a numerical experiment. The effectiveness of the proposed method in the sense of improving the accuracy of a discrete signal recovery in the receive path of the communication of railway equipment.

Keywords: *optimal interpolation, Chebyshev window, Nyquist theorem, the spectrum.*

УДК 621.3+517

АНАЛИЗ ОТКАЗОВ ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ РАДИОСВЯЗИ

Любченко Александр Александрович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, преподаватель кафедры «Системы передачи информации», ОмГУПС.
E-mail: lyubchenko@mail.ru

Разумный Станислав Григорьевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Студент Института автоматики, телекоммуникаций и информационных технологий, ОмГУПС.
E-mail: razumnyj.stanislav@mail.ru

Никитин Иван Михайлович
Контрольно-ремонтный пункт Челябинского регионального центра связи Южно-Уральской железной дороги.
Старший электромеханик контрольно-ремонтного пункта Челябинского регионального центра связи ЮУЖД.

В статье проанализировано текущее состояние систем технологической радиосвязи, приведены перспективы их развития, обоснована необходимость дальнейшего использования аналоговых каналов радиосвязи. Выполнен анализ статистических данных об отказах оборудования радиосвязи, используемого на Южно-Уральской железной дороге.

Ключевые слова: *технологическая радиосвязь, техническое обслуживание, отказ, радиостанция.*

FAILURE ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL RADIOCOMMUNICATION SYSTEM EQUIPMENT

Lyubchenko Alexander Alexandrovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., teacher of the department «Information transmission systems», OSTU.
E-mail: lyubchenko@mail.ru

Razumnyi Stanislav Grigorevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Student of the institute of automatics, telecommunication and information technologies, OSTU.
E-mail: razumnyi.stanislav@mail.ru

Nikitin Ivan Mihaylovich
Control maintenance points of Chelyabinsk regional communications center of the South Urals Railroad
The main electrical mechanic of control maintenance points of Chelyabinsk regional communications center of the South Urals Railroad.

The current state of technological radiocommunication systems was analyzed, prospects of their development were shown in the article, and the necessity of further use of analogue radio communication channels was substantiated. Statistical data analysis of radiocommunication equipment failures used on the South Urals Railway is fulfilled.

Keywords: *technological radiocommunication, preventive maintenance, failure, radio facility.*

УДК 621.396.963

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТНОЙ ЛОГИСТИКИ ОБРАБОТКОЙ НАВИГАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Марюхненко Виктор Сергеевич
Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика», ИрГУПС.
E-mail: maryuhnenko_v@irgups.ru

Мухопад Юрий Федорович
Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Управление техническими системами», ИрГУПС.

В контексте решения задачи формирования и соблюдения транспортных коридоров для подвижного состава и совершенствования технологии перевозок различными видами транспорта рассмотрена минимизация геометрического фактора в позиционной навигации, исследованы особенности определения погрешностей координат подвижных объектов вдоль физически фиксированных траекторий, доказано утверждение об апостериорном восстановлении траектории подвижной точки при измерениях одной координаты.

Ключевые слова: *транспортные коридоры, подвижной состав, технологии перевозок, конические сечения, линии положения, позиционная навигация, геометрический фактор, траектория.*

IMPROVING TRANSPORT LOGISTICS SOLUTIONS FOR TREATMENT NAVIGATION MEASUREMENTS OF MOVING OBJECTS

Maryukhnenko Victor Sergeevich
Irkutsk State Transport University (ISTU).
15, Chernyshevskogo st., Irkutsk, 664074, Russia.
Doc. Sci. Tech., the professor of the department «Automation and remote control», ISTU.
E-mail: maryuhnenko_v@irgups.ru

Mukhopad Yurij Fedorowich
Irkutsk State Transport University (ISTU).
15, Chernyshevskogo st., Irkutsk, 664074, Russia.
Doc. Sci. Tech., the professor of the department «Management of technical systems», ISTU.

In the context of the objectives of and compliance with transportation of corridors for rolling stock and improving the technology of transportation of different modes of transport considered minimization of the geometric factor in positioning navigation, peculiarities of determination of errors of coordinate of the moving objects along physically fixed trajectories on the plane, it is proved the statement about the possibility of recovery of the trajectory of the mobile point on the plane with continuous or discrete measurements of one coordinate.

Keywords: *transport corridors, rolling stock, transportation technologies, conic sections, line status, way navigation, the geometric factor, the trajectory.*

УДК 658.5

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОДЕРЖАНИЯ ОБЪЕКТОВ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Аксенов Владимир Алексеевич
Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ).
127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, строение 9.
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техносферная безопасность», МИИТ.

Завьялов Антон Михайлович
Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ).
125993, г. Москва ул. Часовая, д. 22, корп. 2.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Железнодорожная автоматика, телемеханика и связь», заместитель начальника отдела информатизации Российской открытой академии транспорта, МИИТ.
Тел.: +7 (495) 799-95-17.
E-mail: zavant@gmail.com

Статья посвящена поиску путей повышения эффективности содержания объектов инфраструктуры. Сформулирована и обоснована целесообразность доработки инструментов, используемых методологией УРРАН, позволяющей при оценке рисков существенным образом учесть несовершенство технологических процессов эксплуатации объектов инфра-

структуры, связанное с влиянием «человеческого фактора».

Ключевые слова: *риски, риск-менеджмент, УРРАН, экспертные методы, человеческий фактор.*

WAYS TO IMPROVE THE PERFORMANCE OF RAILWAY INFRASTRUCTURE

Aksenov Vladimir Alekseevich
Moscow State Transport University (MSURE).
9-9, Obraztsova Str., 127994, Moscow, Russia.
Dr. Sci. Tech., professor, head of the departament «Technosphere Safety», MSURE.

Zavyalov Anton Mikhailovich
Moscow State Transport University (MSURE).
22-2, Chasovaya str., 127993, Moscow, Russia.
Ph. D., associate professor of the department «Railway automation, telemechanics nickname and communication», the deputy head of the department of information ROAP MSURE.
Phone: +7 (495) 799-95-17.
E-mail: zavant@gmail.com

The article is devoted to finding ways to improve the maintenance of infrastructure. And suggested the expediency of refinement tools used methodology Urra, allowing significantly taken into account in the risk assessment process imperfect operation of the infrastructure associated with the influence of the «human factor».

Keywords: *risk, risk management, Urra, expert methods, the human factor.*

УДК 629.4.083

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРЕДПРИЯТИЙ ПО РЕМОНТУ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

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», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-19.

В статье рассматриваются вопросы проектирования предприятий по ремонту подвижного состава железнодорожного транспорта, анализируется современный опыт, приводятся основные критерии оценки качества проектных решений и предлагается методика их оптимизации с использованием средств математического моделирования.

Ключевые слова: *ремонт и техническое обслуживание локомотивов, топливно-энергетические затраты, энергосбережение.*

TECHNOLOGICAL DESIGN OF RENOVATION COMPANY OF ROLLING-STOCK

Smirnov Victor Aleksandrovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av.m Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., the senior lecturer of the departament «Rolling stock of electric railways», OSTU.
Phone: (3812) 31-34-19.

The paper discusses the design enterprises for repair in dvizhnogo of railway vehicles, analyzes contemporary experience, are reproduced the main criteria for assessing the quality of design solutions and provides a methodology to optimize them with the use of mathematical modeling.

Keywords: *repair and preventive maintenance of locomotives, fuel and energy resources, power saving.*

Уважаемые коллеги!

Редакция научно-технического журнала «Известия Транссиба» приглашает Вас публиковать результаты научных исследований по тематическим направлениям журнала:

– подвижной состав железных дорог;
– транспортная энергетика;
– информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации;
– путь и искусственные сооружения;
– управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов;
– организация производства на транспорте.

Материалы просим высылать ответственному секретарю редакционной коллегии журнала Захаренко Елене Игоревне по электронной почте: izvestia_transsiba@mail.ru

Правила представления рукописей научных статей
в научно-технический журнал «Известия Транссиба»

В редакцию 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»

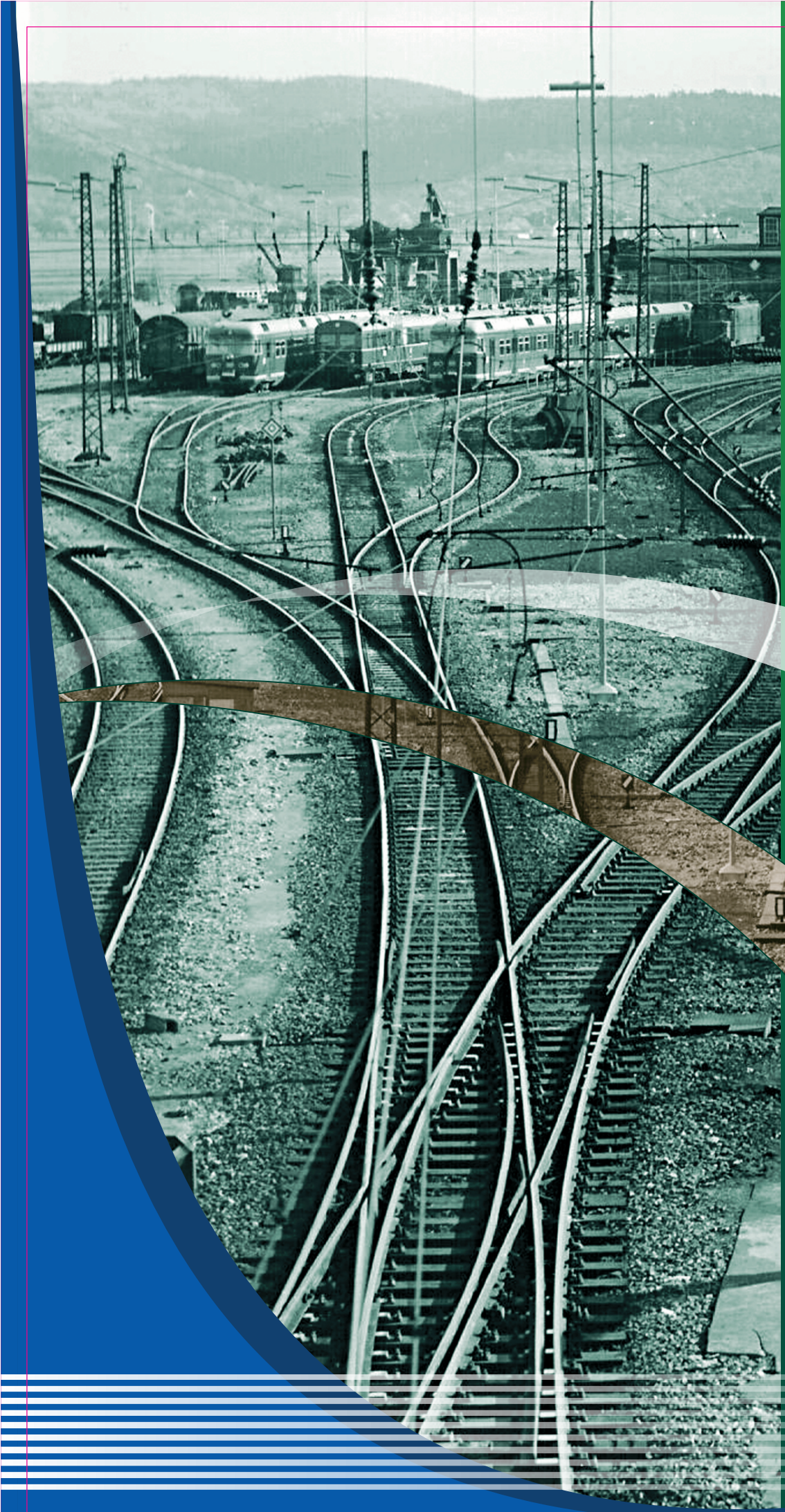
РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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);
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);
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);
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 – Захаренко Е. И.

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 20.06.2013.
Тираж 500 экз.