ISSN 2220-4245

научно-технический журнал

ИЗВЕСТИЯ Транссиба

№ 1(13)
2013

ИЗВЕСТИЯ Транссиба
научно-технический журнал
№ 1(13) 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, проректор по научной работе и инновациям ОмГУПСа, 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., доцент (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

Кузьмичев Е. Н., Новачук Я. А., Дроздов Е. А. Увеличение жизненного цикла железнодорожных колес при их восстановлении электрошлаковой наплавкой 2
Лукин В. В., Бельский А. О. Расчет боковой рамы и надрессорной балки тележки грузового вагона методом конечных элементов 7
Маслов Г. П., Саля И. Л., Маркелова К. С. Оценка качества токосъема на монорельсовом транспорте 12
Матяш Ю. И., Гателюк О. В., Томилова О. С., Томилов В. В. Моделирование течений жидкости в УФ-стерилизаторе модернизированной системы водоснабжения пассажирского вагона железнодорожного транспорта 18
Руш Е. А., Обуздина М. В. Создание и исследование модифицированных адсорбентов на основе цеолитов Восточного Забайкалья для очистки промышленных сточных вод в локомотивных депо 27
Ражковский А. А., Бунькова Т. Г. Исследование рационального соотношения твердости в системе «колесо – рельс» 34
Харламов В. В., Шкодун П. К., Ахунов Д. А., Хлопцов А. С. Совершенствование процесса диагностирования профиля коллектора тяговых электродвигателей с помощью прибора ПКП-4М 42

Транспортная энергетика

Авилов В. Д., Третьяков Е. А., Краузе А. В. Повышение качества электроэнергии в распределительных сетях нетяговых потребителей 48
Закарюкин В. П., Крюков А. В., Шульгин М. С. Параметрическая идентификация силовых трансформаторов тяговых подстанций 54
Сырецкая А. О., Слептерева Н. К., Зуб К. С. Экспериментальные исследования электромагнитных помех на тяговых подстанциях 64

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

Когут А. Т. Система технического диагностирования изделий подвижного состава на основе приближенных алгоритмов управления вынужденными механическими колебаниями вибростендов 70
Чижма С. Н., Лаврухин А. А. Адаптивный метод контроля симметричных составляющих в трехфазных системах электроснабжения 76

Путь и искусственные сооружения

Атапин В. В. Пример реализации методики оценки условий и резерва поперечной устойчивости в кривых участках бесстыкового пути при отступлениях от норм содержания в плане 83
Кутовой В. П., Шабанов А. П., Шакиртов М. М. Исследование напряженно-деформированного состояния вершины усталостной трещины в головке рельса 89
Смолин Ю. П. Динамическое воздействие поездов на земляное полотно 94
Тихомиров В. М. Исследование усталостной прочности рельса с термомеханическим повреждением 101
Тихомиров В. М., Суровин П. Г. Оценка остаточного ресурса рельса с поперечной трещиной в подошве 106

Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

Гозбенко В. Е., Оленцевич В. А. Повышение безопасности работы железнодорожной транспортной системы на основе автоматизации технологии размещения и крепления груза в вагоне 110
Кашковский В. В. Методика назначения пробега вагонов между деповскими ремонтами 117
Краковский Ю. М., Домбровский И. А. Вероятностный анализ безубыточности грузовых перевозок на основе метода Монте-Карло 125
Медведев В. И. Система безопасности транспортирования опасных отходов на железнодорожном транспорте 130

АННОТАЦИИ 140

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 621.791.75

Е. Н. Кузьмичев, Я. А. Новачук, Е. А. Дроздов

УВЕЛИЧЕНИЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС ПРИ ИХ ВОССТАНОВЛЕНИИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ НАПЛАВКОЙ

Представлены результаты экспериментальных исследований, направленных на повышение ресурса обода колес подвижного состава. Используется способ электрошлаковой наплавки для восстановления поверхности катания и гребня цельнокатаных вагонных колес, а также бандажей локомотивов. Результаты экспериментальных исследований подтверждают перспективность предлагаемого способа восстановления обода железнодорожного колеса.

С первых дней существования железнодорожного транспорта возникла проблема износа колес и рельсов. Первые токарные станки для обточки железнодорожных колес были смонтированы в Царском Селе в 1844 г. На этих станках точили чугунные колеса первых вагонов и паровозов, когда на них возникали повреждения, угрожающие безопасности движения.

В настоящее время на сети железных дорог ОАО «РЖД» повреждения колес подвижного состава приобрели угрожающие масштабы. Основные неисправности колесных пар выражены износом их гребней и температурными раковинами, возникающими на поверхности катания колеса. В этой связи железнодорожные инфраструктуры вынуждены нести незапланированные затраты труда и капитала, связанные с упреждением и устранением повреждений колес, чтобы обеспечить необходимый уровень гарантий безопасности движения поездов.

Упреждающие износ гребней способы достаточно стереотипны и выражаются только лубрикацией их поверхностей.

Устраняют износ гребней колес и поверхностей катания традиционным способом точения на колесотокарных позициях. В процессе обточки колес значения параметров снятого металла (глубина резания) с поверхности катания и гребня имеют хорошую сходимость с эмпирическим выражением (рисунок 1), построенным по многолетним эксплуатационным данным.

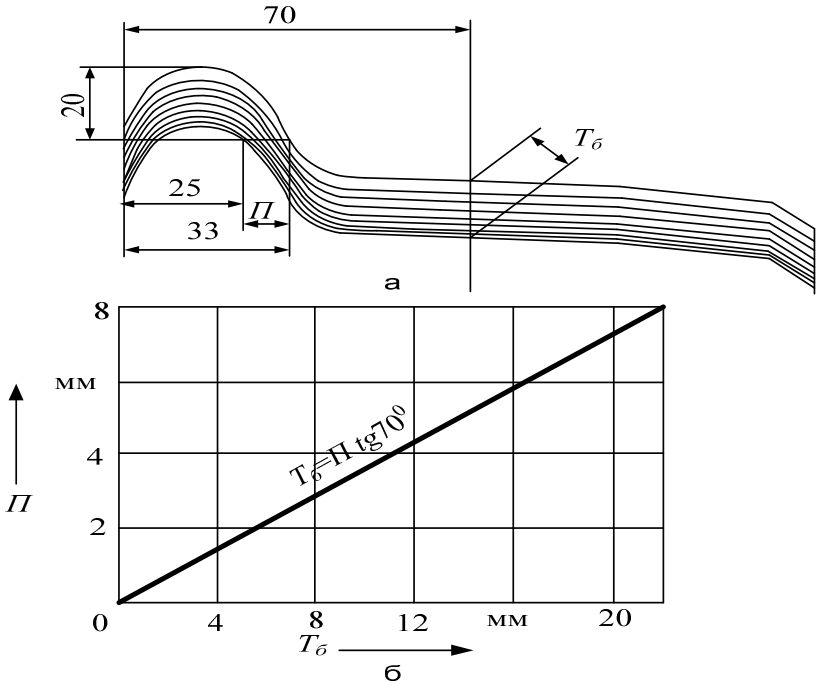


Рисунок 1 – Профиль бандажа с углом наклона гребня 70° (а) и зависимость глубины резания по поверхности круга катания от величины износа гребня колесной пары (б)

Способ восстановления профиля обода колеса (гребня и поверхности катания) путем обточки уменьшает его толщину, сокращая срок службы колеса. К примеру, количество обточек колесных пар локомотивов на ДВЖД за 2011 г. составило в среднем 2,13 обточки на одну колесную пару (таблица 1). Таким образом, срок службы бандажей локомотива составляет в среднем три года.

Таблица 1 – Количество обточек колесных пар локомотивов на ДВЖД за 10 месяцев 2011 г.

Серия локомотива	Количество колесных пар (КП)	Общее кол-во обточек бандажей КП	Общее кол-во обточек одного бандажа КП
По электровозам			
ВЛ $80^{С}$	526	2068	3,68
ВЛ $60^{К}$ и $ВЛ60^{ПК}$	126	193	1,53
3ЭС5К	1548	2655	1,72
2ЭС5К	664	1153	1,74
По тепловозам			
3ТЭ10	2610	5085	1,95
2ТЭ10	912	1959	2,15
ТЭП70	84	387	4,61
Маневровые	1638	532	0,32

Известны способы восстановления обода колеса путем электродуговой [1] или электрошлаковой наплавки металла на изношенную поверхность [2].

Электродуговая наплавка предназначена для восстановления преимущественно малогабаритных деталей. Использование электродуговой наплавки, например, для восстановления обода колеса железнодорожного вагона до нормативных размеров приводит к увеличению срока службы колеса. Однако такая технология восстановления не исключает образования термических трещин в ободе колеса из-за неравномерности температурных полей. Недостатком этого способа восстановления обода колеса рельсовых транспортных средств является повышенная хрупкость металла восстановленной поверхности, которая приводит к ее разрушению в процессе эксплуатации. Поэтому такой способ восстановления в настоящее время на сети дорог не применяется.

Способ электрошлаковой наплавки предназначен для восстановления деталей больших размеров. Использование его для восстановления обода колеса железнодорожного вагона до нормативных или необходимых размеров обеспечивает увеличение срока службы колесных пар. Восстановление гребня обода колеса осуществляют при его износе по толщине до предельно допустимого значения.

Способ восстановления заключается в следующем. Изношенный гребень удаляют газовой резкой и нагревают обод вращающегося колеса до температуры 200 – 250 °С, с последующей электрошлаковой наплавкой легированного металла на поверхность гребня обода колеса сварочной проволокой с одновременным отпуском наплавленного металла.

Для проведения электрошлаковой наплавки используют полый разборный кристаллизатор, имеющий в поперечном сечении профиль гребня обода колеса. Кристаллизатор устанавливают на части обода колеса в месте срезанного гребня, охватывая сектор колеса. При этом кристаллизатор располагают так, что его поперечное сечение находится в горизонтальной плоскости и перпендикулярно поверхности катания обода колеса, а его открытая сторона примыкает к месту среза гребня. Затем на поверхности катания обода колеса под кристаллизатором закрепляют стартовую пластину.

Для получения легированного металла подбирают сварочную проволоку с высоким содержанием углерода и легирующих элементов, например, сварочную проволоку Нп–30ХГСА, которая содержит 0,3 % углерода и до 1 % хрома, марганца и кремния. Используемый при наплавке флюс АН-8 содержит SiO_2 в пределах 33,0 – 39,0 %, MnO – 21,0 – 26,0 %, CaF_2 – 3,5 – 8,4 %, CaO – 4,0 – 7,0 %, MgO – 5,0 – 7,5 %, Al_2O_3 – 11,0 – 15,0 %, CaF_2 – 13,0 – 19,0 %, Fe_2O_3 – 1,5 – 3,5 % и является низколегирующим. Флюс в известном способе восстановления гребня обода колеса выполняет функцию защиты наплавленного металла от внешних воздействий.

В процессе наплавки вращение колеса осуществляют вокруг горизонтальной оси при неподвижном кристаллизаторе. Наплавку гребня обода колеса производят в направлении, перпендикулярном оси колеса. Расплавленный металл проволоки и поверхности основного металла обода заполняет кристаллизатор, принимая в процессе кристаллизации профиль

гребня. В процессе вращения колеса вокруг своей оси происходит постепенное образование восстановленного гребня по окружности обода. За полный оборот колеса гребень формируется по всему ободу. Наплавленный слой представляет собой углеродистую среднелегированную сталь, в которой насыщение легирующими элементами происходит из сварочной проволоки.

Завершают восстановление обточкой поверхности катания и наплавленной поверхности гребня колеса для устранения на ней шлаковых включений и неровностей, возникающих в результате наплавки.

В результате восстановления получают колесо с профилем гребня, соответствующим стандартному профилю гребня колеса, и толщиной обода в пределах допустимого размера, но меньше толщины нового колеса.

Механические свойства металла восстановленного гребня колеса превышают механические свойства основного металла поверхности катания колеса, повышая износостойкость гребня, работающего в условиях трения скольжения и значительных удельных контактных давлений при движении в кривых участках пути и по стрелочным переводам.

Условия работы поверхности катания обода колеса отличаются от условий работы гребня. Поверхность катания требует иных механических свойств металла (высокой твердости и ударной вязкости), которые в условиях трения качения и при постоянных динамических нагрузках на рельсовых стыках, стрелочных переводах и неровностях пути способны исключить образование трещин и выщербин на поверхности катания.

В связи с этим была поставлена задача разработать способ восстановления обода колеса рельсовых транспортных средств с заданными свойствами при сохранении его нормативных параметров после многократных обточек, чтобы увеличить срок службы колесных пар.

Для решения поставленной задачи разработан способ восстановления обода колеса рельсовых транспортных средств электрошлаковой наплавкой легированным металлом поверхности катания и гребня колеса. Цель достигается средствами в виде полого разборного кристаллизатора, внутреннюю поверхность которого выполняют в поперечном сечении с профилем и параметрами стандартного обода колеса; низкоуглеродистой сварочной проволоки и высоколегирующего флюса на основе вольфрама.

Колесо устанавливают в кристаллизатор, располагая внутреннюю грань обода колеса на дно кристаллизатора с обеспечением параллельности профилей обода колеса и кристаллизатора, а также с обеспечением их соосности по вертикали. Наплавку производят параллельно оси колеса в направлении от гребня при одновременном вращении колеса и кристаллизатора.

Предлагаемый способ восстановления обода колеса позволяет восстанавливать его до геометрических параметров нового колеса. Восстановление происходит при равномерном нагреве по всей поверхности колеса, что исключает образование термических напряжений и появление поверхностных трещин. Использование высоколегирующих флюсов позволяет получать необходимые физико-механические свойства наплавленного металла гребня и поверхности катания.

На рисунке 2 представлен разрез кристаллизатора для осуществления способа восстановления обода колеса рельсовых транспортных средств с установленным в кристаллизаторе колесом, иллюстрирующий и подтверждающий работоспособность и промышленную применимость рассмотренного способа.

Восстановление бандажа или обода цельнокатаного колеса 1 осуществляют только при уменьшении его толщины до предельно допустимого значения, например, для грузовых вагонов эта величина составляет 22 мм, для локомотивов – 25 мм [3, 4].

Для электрошлаковой наплавки используют высоколегирующий флюс на основе оксидов кремния, марганца, вольфрама и циркония, являющихся легирующими компонентами. В качестве экспериментальных флюсов использовались разработанные авторами керамические легирующие флюсы [5 – 7], содержащие графит, фторид кальция, бадделеитовый концентрат и шеелитовый концентрат с содержанием оксида вольфрама 45 – 72 %, оксида железа

10 – 25 %, оксида марганца 2 – 10 % и оксида кремния 3 – 8 %, оксид циркония 0,5 – 3 % , а также нелегированную электродную проволоку Св-10ГА с содержанием углерода в пределах 0,08 – 0,1 %.

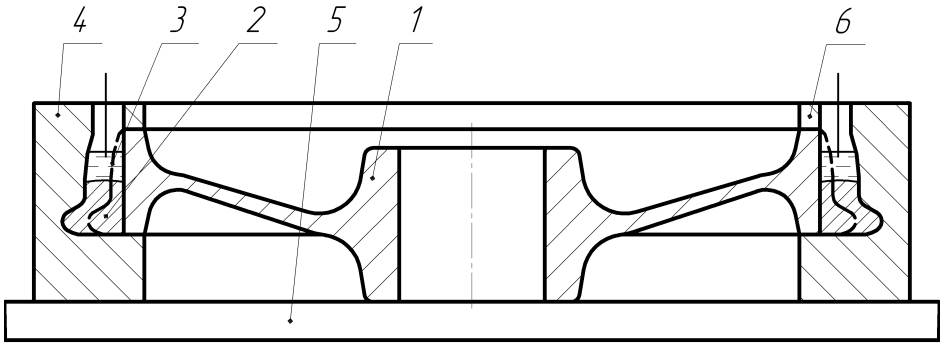


Рисунок 2 – Схема восстановления гребня и поверхности катания колеса электрошлаковым переплавом:
1 – колесо; 2 – гребень; 3 – поверхность катания; 4 – кристаллизатор;
5 – поворотная платформа; 6 – выводная втулка

Для начала процесса электрошлаковой наплавки предварительно собранный кристаллизатор 4 устанавливают дном на поворотную платформу 5 механизма вращения (на рисунке 2 не показан) с совмещением вертикальной оси кристаллизатора 4, оси вращения поворотной платформы 5 и оси колеса.

Колесо 1 с предварительно удаленным гребнем 2 устанавливают в кристаллизаторе 4, располагая внутреннюю грань обода колеса 1 с удаленным гребнем 2 на дно кристаллизатора 4, совмещая их оси и обеспечивая параллельность профилей обода колеса 1 и кристаллизатора 4.

На наружную грань обода колеса 1 устанавливают выводную втулку 6 для поддержания заданного уровня шлаковой ванны при полностью наплавленном ободе колеса 1.

Далее производят нагрев обода колеса 1 рельсовых транспортных средств до температуры 200 – 250 °С.

В полость между стенкой кристаллизатора 4 и ободом колеса 1 засыпают высоколегирующий флюс и вводят равномерно по окружности не менее восьми электродных проволок.

Для расплавления флюса используют электродуговую сварку. После расплавления всего флюса и образования шлаковой ванны колесо 1 с кристаллизатором 4 приводят во вращение вокруг своей оси со скоростью, достаточной для поддержания шлаковой ванны в жидком состоянии в течение всего процесса наплавки (не менее 1 об/мин). В процессе наплавки производится отпуск наплавленного металла путем постоянного подогрева обода колеса 1 индукционными нагревателями.

Процесс наплавки начинается от внутренней грани обода колеса 1 с нерабочей поверхности гребня 2, идет в сторону поверхности катания 3 и заканчивается у наружной грани обода колеса 1 благодаря расположению колеса 1 внутренней гранью обода на дне кристаллизатора 4.

В первоначальный момент расплавленный металл электродной проволоки проходит в кристаллизаторе 4 через расплавленный шлак. Легирующие элементы в шлаке еще находятся в оксидной форме и не поступают в расплавленный металл. Низкоуглеродистая нелегированная сталь электродной проволоки не получает из шлака легирующие элементы и после кристаллизации сохраняет свои первоначальные свойства. В результате нерабочая поверхность гребня 2 обода колеса 1, с которой начинается процесс наплавки, наплавляется нелегированным металлом.

С повышением температуры расплавленного флюса в нем происходят восстановительные реакции освобождения легирующих элементов из их оксидов. Расплавленный металл электродной проволоки, проходя через такой шлак, максимально обогащается легирующими элементами: марганцем, кремнием, вольфрамом и цирконием. Легирующие элементы, попадая в металл проволоки, образуют интерметаллические соединения, карбиды и растворы в

железе и после кристаллизации металла улучшают его механические свойства. В результате рабочая поверхность гребня 2 обода колеса 1 наплавляется высоколегированным металлом.

В дальнейшем при увеличении высоты наплавленного металла концентрация легирующих элементов в шлаке уменьшается и каждая следующая порция расплавленного металла проволоки извлекает все меньшее количество легирующих элементов. Уменьшение содержания легирующих элементов, попавших в металл проволоки после кристаллизации расплава, вызывает соответствующее ухудшение механических свойств металла. В результате процесс наплавки поверхности катания 3 обода колеса 1 осуществляется уже низколегированным металлом.

После завершения наплавки и охлаждения металла кристаллизатор 4 разбирают, убирают выводную втулку 6 и получают восстановленное колесо с габаритами, несколько превышающими параметры стандартного колеса. Затем колесо очищают и обтачивают для получения обода с гладкой поверхностью и параметрами стандартного колеса.

Рабочая поверхность гребня 2 обода колеса из высоколегированного металла характеризуется твердостью и износостойкостью, необходимыми для работы в условиях трения скольжения и больших удельных давлений в контакте.

Поверхность катания 3 обода колеса из низколегированного металла обладает высокой ударной вязкостью и упругостью, что необходимо для работы в условиях трения качения при высоких ударных нагрузках.

Таким образом, срок службы обода колеса увеличивается за счет восстановления размеров обода колеса до первоначальных размеров, что позволяет приблизить его к сроку службы оси колесной пары.

В Дальневосточном государственном университете путей сообщения проведены опыты по наплавке части обода вагонного цельнокатаного колеса предлагаемым способом.

Металлографический анализ наплавленного металла проводился с помощью микроскопов Лабомет-2 и агрегатного ЕС МЕТАМ РВ-21 при увеличении до 1000Х. Микротвердость определялась на приборе ПМТ-3М. Дифференциально-термический анализ осуществлялся на дериватографе Q-1000. Фазовый состав полученных материалов изучался на рентгеновском дифрактометре «ДРОН-7». Исследование элементного состава полученных сплавов проводилось на рентгеновском флуоресцентном кристалл-дифракционном сканирующем спектрометре «Спектроскан МАКС-JV» и растровом электронно-зондовом микроскопе ISM-35C (JEOL, Япония) с приставкой электронно-зондового микроанализатора – рентгеновского спектрометра 35-SDS с волновой дисперсией.

Для анализа физико-механических и эксплуатационных свойств наплавленного металла использовались следующие приборы: для измерения твердости – ТШ-2М, ТК-14, ТП-2; для исследования износостойкости – машина ИИ-5018 в условиях трения без смазки при нагрузке 50 кгс/мм^2 и контртелом из стали 40ХН, закаленной в масле до HRC 60 – 62. Результаты механических испытаний приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Физико-механические показатели металла ободьев колес

Механические свойства наплавленного металла	Колесо восстановленное ЭШП				Новое колесо	
	флюс пат. № 2207388		флюс пат. № 2424091			
	поверхность гребня	поверхность катания	поверхность гребня	поверхность катания	поверхность гребня	поверхность катания
НВ	228 – 245	227 – 234	246 – 262	236 – 253	235	235
$\sigma_в$, кгс/мм^2	46	44	47	45	42	42
$\alpha_н$, кгс·м/см^2	18,5	18,3	18,7	18,4	18,3	18,3
$\alpha_{н45}$, кгс·м/см^2 T= -60°C	5,5	5,2	5,7	5,3	4,2	4,2
Коэффициент износостойкости	0,93	0,93	1,1	1,1	0,87	0,87

Результаты испытаний показывают, что механические показатели металла обода колеса,

восстановленного предложенным способом, значительно превосходят свойства металла колес, восстановленных другими способами, а также показатели металла стандартного колеса.

Получение металла на различных поверхностях обода колеса с необходимыми свойствами для работы в соответствующих условиях приводит к повышению срока службы колесных пар. Результаты исследований показали применимость такого способа восстановления обода колеса в условиях специализированных ремонтных подразделений.

Использование разработанного способа восстановления обода колеса транспортного средства позволяет получить восстановленное колесо с габаритами стандартного колеса, улучшенными показателями металла рабочих поверхностей обода колеса как для рабочей поверхности гребня, так и для поверхности катания колеса, что значительно снижает затраты на приобретение колесных пар.

Список литературы

1. Пат. 2113325 Российская Федерация, МПК В 23 К 9/04, В 23 Р 6/00. Способ восстановления поверхности катания вагонных колес [Текст] / И. Д. Козубенко, Н. Г. Скосырский и др. (Россия). – № 97101271/02; Заявлено 24.01.1997; Опубл. 20.06.1998. Бюл. № 17.

2. Пат. 2095211 Российская Федерация, МПК В 23 К 9/04, В 23 Р 6/00. Способ восстановления изношенных гребней колес рельсовых транспортных средств [Текст] / Г. В. Кожевин, В. А. Канищев и др. (Россия) – № 95105268/02; Заявлено 06.04.1995; Опубл. 10.11.1997. Бюл. № 32.

3. Инструкция по осмотру, освидетельствованию, ремонту и формированию вагонных колесных пар ЦВ-944 [Текст]. М.: Транспорт, 2006.

4. Инструкция по формированию, ремонту и содержанию колесных пар тягового подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм. ЦТ-329[Текст]. М.: Техинформ, 2000.

5. Пат. 2207388 РФ, МПК С22В9/18, В23Р6/00. Способ электрошлакового переплава [Текст] / Э. Г. Бабенко, Е. Н. Кузьмичев, А. Д. Верхотуров – № 95105268/02; Заявлено 06.04.95; Опубл. 10.11.97. Бюл. № 18.

6. Пат. 2424091 Российская Федерация, МПК В 23 К 9/04, В 23 К 35/36, С 22 В 9/18. Флюс для электрошлаковой сварки или наплавки при восстановлении деталей или электрошлакового переплава [Текст] / Э. Г. Бабенко, Е. Н. Кузьмичев, Е. А. Дроздов, М. А. Колесников (Россия). – № 2009125939/02; Заявлено 06.07.2009; Опубл. 20.07.2011. Бюл. № 20.

7. Бабенко, Э. Г. К вопросу применения керамических флюсов на основе минеральных концентратов для восстановления деталей подвижного состава [Текст] / Э. Г. Бабенко, Е. Н. Кузьмичев, Я. А Новачук// Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2012. – 3 (11). – С. 2 – 7.

УДК 629.46:629.4.027.23

В. В. Лукин, А. О. Бельский

РАСЧЕТ БОКОВОЙ РАМЫ И НАДРЕССОРНОЙ БАЛКИ ТЕЛЕЖКИ ГРУЗОВОГО ВАГОНА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Одной из многих тем, над которыми работал В. В. Лукин в последние годы своей жизни, являлось совершенствование литых деталей тележек грузовых вагонов с помощью метода конечных элементов.

В статье показана возможность применения метода конечных элементов для анализа напряженно-деформированного состояния двух наиболее ответственных деталей трехэлементной тележки грузового вагона с целью дальнейшего совершенствования их конструкции.

Анализ браков и схода вагонов, допущенных на сети железных дорог России за девять месяцев 2012 г., показывает, что 19 случаев произошли из-за излома боковой рамы тележки грузового вагона модели 18-578. Подробный анализ состояния безопасности и основных недостатков тележек грузовых вагонов выполнен в работах [1, 2]. Для предотвращения и недопущения подобных случаев необходимо произвести уточненный прочностный расчет боковой рамы тележки с применением современных методов расчетов для выявления мест концентрации максимальных напряжений.

В настоящее время метод конечных элементов (МКЭ) занимает лидирующее положение благодаря возможности моделировать широкий круг объектов и явлений. В основе этого метода лежит дискретизация объекта с целью решения уравнений механики сплошной среды в предположении, что эти соотношения выполняются в пределах каждой из элементарных областей. В пределах конечного элемента назначаются свойства ограничиваемого им участка объекта (это могут быть, например, характеристики жесткости и прочности материала, плотность и т. д.) и описываются поля интересующих величин (применительно к механике твердого тела – это перемещения, деформации, напряжения и т. д.).

Параметры из второй группы назначаются в узлах элемента, а затем вводятся интерполирующие функции, посредством которых соответствующие значения можно вычислить в любой точке внутри элемента или на его границе. Задача математического описания элемента сводится к тому, чтобы связать действующие в узлах факторы. В механике сплошной среды это, как правило, перемещения и усилия. МКЭ позволяет, зная силу, приложенную к конечному элементу, найти его перемещение, затем – деформацию и напряжение.

В программном комплексе SolidWorks методом твердотельного моделирования были разработаны объемные геометрические модели боковой рамы (рисунок 1) и надрессорной балки (рисунок 2) тележки 18-578 грузового вагона на основе чертежей ОАО «НПК «Уралвагонзавод».

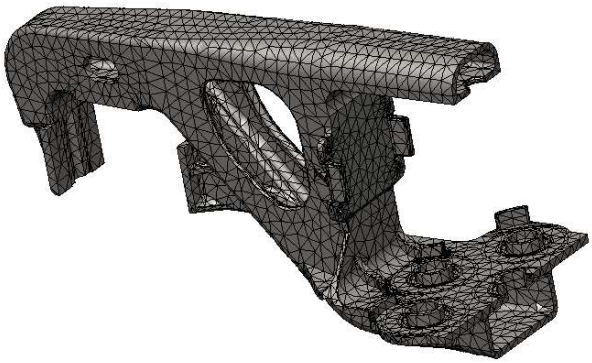


Рисунок 1 – Конечно-элементная модель части боковой рамы

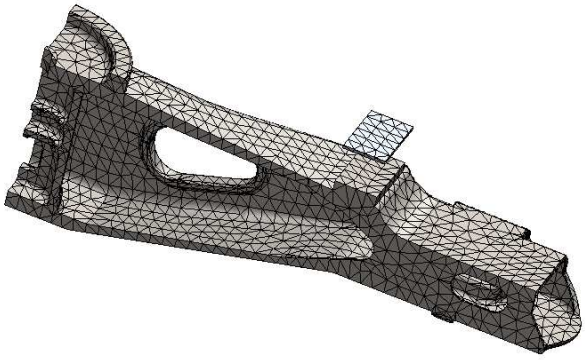


Рисунок 2 – Конечно-элементная модель части надрессорной балки

В разработанной модели боковой рамы учтены следующие особенности:

несимметрия скруглений верхний части боковой рамы относительно продольной плоскости;

основные элементы боковой рамы (опорная поверхность; направляющие, ограничивающие смещение фрикционных клиньев; технологические отверстия; ребра жесткости, соединяющие поддон и боковую стенку боковой рамы);

вертикальная нагрузка от рессорного комплекта передается на боковую раму через кольцеобразные выработки (с учетом действия внутренней и наружной пружин);

действующие силы считаются приложенными мгновенно и равномерно распределенными;

отсутствуют кронштейны для крепления подвесок тормозных башмаков.

При разработке модели надрессорной балки были учтены все основные особенности конструкции балки, включая устройство катковых подпружиненных скользунов, выполненных в виде упругих элементов с жесткостью c_x = 2,3 МН/м. Причем учтено, что упруго-

катковые скользуны воспринимают часть нагрузки от кузова как в прямом участке пути, так и в кривом. Основание упругокаткового скользуна считается жестко закрепленным на надрессорной балке.

Расчет прочности боковой рамы и надрессорной балки выполнен с использованием модуля COSMOSWorks, входящего в состав программы SolidWorks. Использование этого модуля связано в первую очередь с тем, что не требуется делать никаких дополнительных преобразований объемных геометрических моделей этих деталей, а можно непосредственно приступать к их анализу[3, 4].

Расчет деталей производился в соответствии с Нормами [4] для I и III расчетных режимов по допускаемым напряжениям. Величина расчетных нагрузок для боковой рамы приведена в таблице 1, для надрессорной балки – в таблице 2.

Таблица 1 – Значение нагрузок боковой рамы для I и III расчетных режимов

Направление действующей силы	Значение нагрузки, Н	
	I режим	III режим
Вертикальная нагрузка *P*	528400	398800
Продольная нагрузка *T*	154700	44200

Таблица 2 – Значение нагрузок надрессорной балки для I и III расчетных режимов

Наименование силы	Значение нагрузки, Н	
	I режим	III режим
Вертикальная нагрузка *P*	878600	634800
Продольная нагрузка *T*	295400	84400
Боковая нагрузка *H*	0	39300

Ввиду того, что боковая рама симметрична относительно поперечной оси, для уменьшения времени решения напряженно-деформируемого состояния, она была разбита на две части. Каждая геометрическая модель частей боковой рамы была разбита на 20917 конечных элементов с уплотнением сетки в местах с наибольшей вероятностью возникновения трещин и изломов (рисунок 3). Для построения сетки использовался 10-узловой объемный нелинейный тетраэдр. Результаты расчетов напряженно-деформируемого состояния боковой рамы представлены на рисунках 4 – 7.

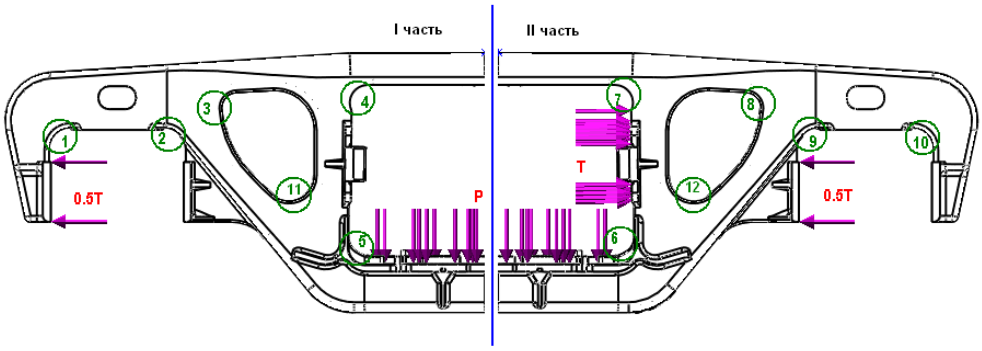
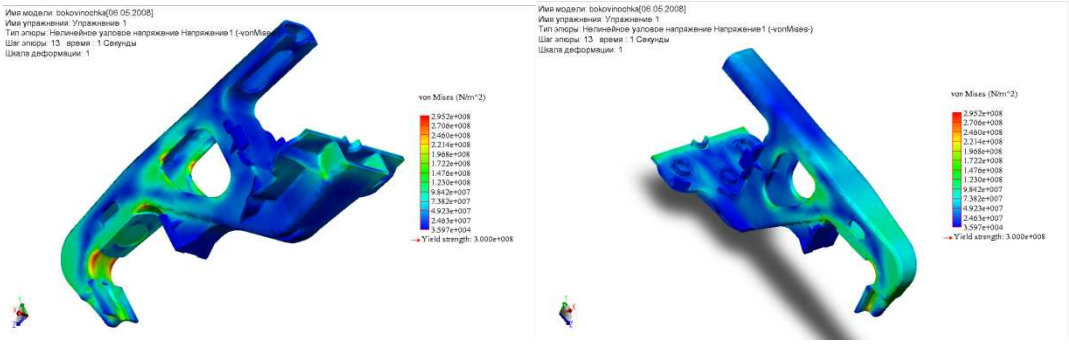
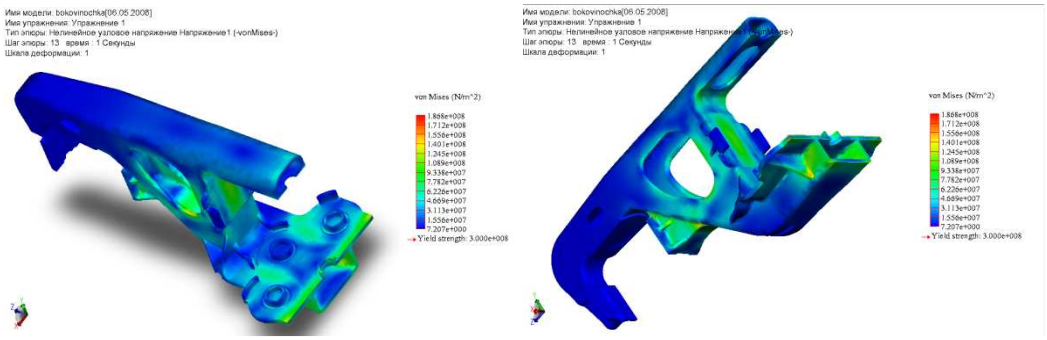


Рисунок 3 – Расчетная схема боковой рамы



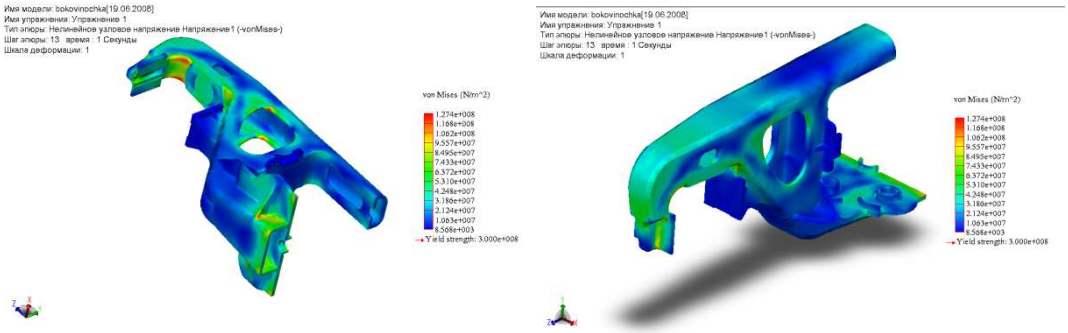
а б

Рисунок 4 – Изополя распределения напряжений в боковой раме (I режим, 1 часть)



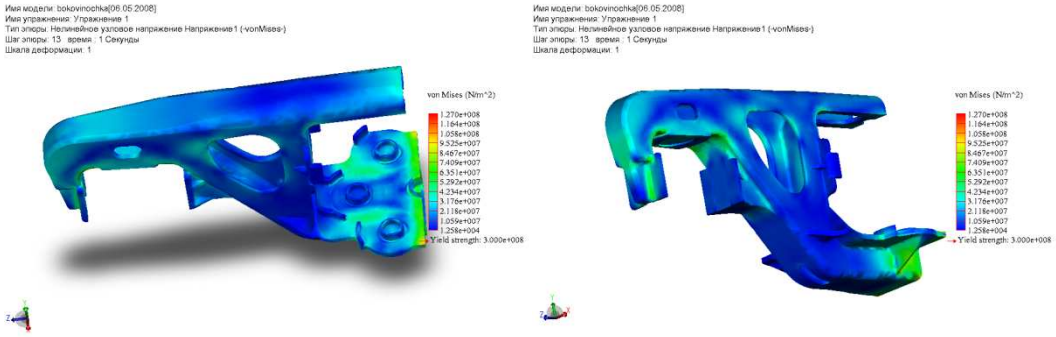
а б

Рисунок 5 – Изополя распределения напряжений в боковой раме (I режим, 2 часть)



а б

Рисунок 6 – Изополя распределения напряжений в боковой раме (III режим, 1 часть)



а б

Рисунок 7 – Изополя распределения напряжений в боковой раме (III режим, 2 часть)

Результаты расчетов в сечениях приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты расчетов боковой рамы, МПа

Сечение	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
I режим	296	302	286	231	232	93	186	129	118	59	196	82
III режим	127	147	142	122	124	108	105	92	89	16	84	28

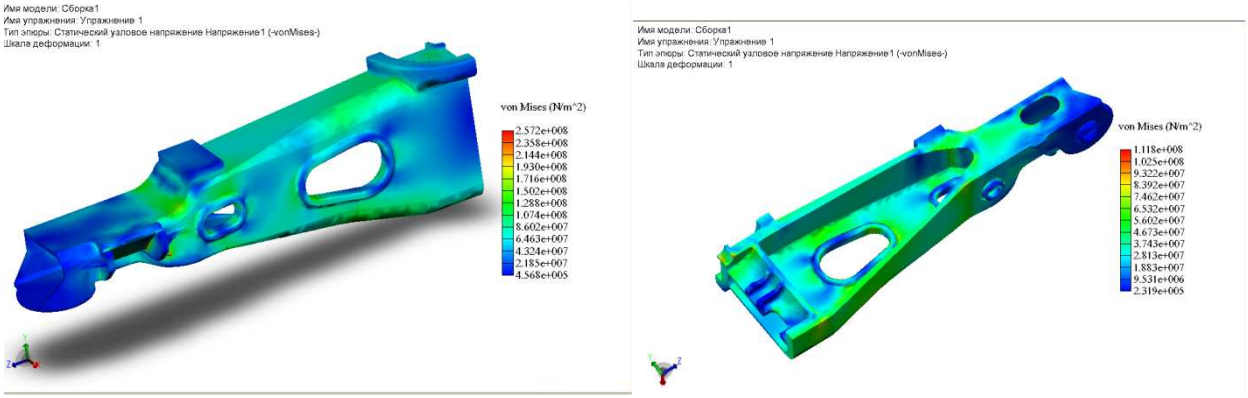
Анализ полученных результатов расчета боковой рамы показывает, что при величинах допускаемых напряжений – I расчетного режима ([σ] = 295 МПа) и III (([σ] = 140 МПа) – в сечении 2 напряжения превышают допускаемые, причем все 19 случаев схода вагонов, происшедших за девять месяцев 2012 г. из-за излома боковой рамы, оказались именно в этом месте; в сечении 1 напряжения равны допускаемым, а в сечении 3 подходят достаточно близко к допускаемым. Следовательно, необходимо разработать предложения, направленные на снижение эксплуатационных напряжений в этих сечениях боковой рамы тележки вагона.

Расчет напряженно-деформированного состояния надрессорной балки: для уменьшения времени счета геометрическая модель балки была разбита на четыре части в силу симметрии. Каждая геометрическая модель части надрессорной балки разбита автоматически на 12906 конечных элементов с числом степеней свободы 261636. Для построения сетки использовался 4-узловой объемный линейный тетраэдр. Интенсивность напряжений в надрессорной

балке определялась при рассмотрении следующих схем приложения сил: в прямом участке пути, I расчетный режим; в прямом участке пути, III расчетный режим; в кривом участке пути, I расчетный режим (ближняя к центру кривой четверть балки); в кривом участке пути, I расчетный режим (дальняя от центра кривой четверть балки); в кривом участке пути, III расчетный режим (ближняя к центру кривой четверть балки); в кривом участке пути, III расчетный режим (дальняя четверть балки от центру кривой).

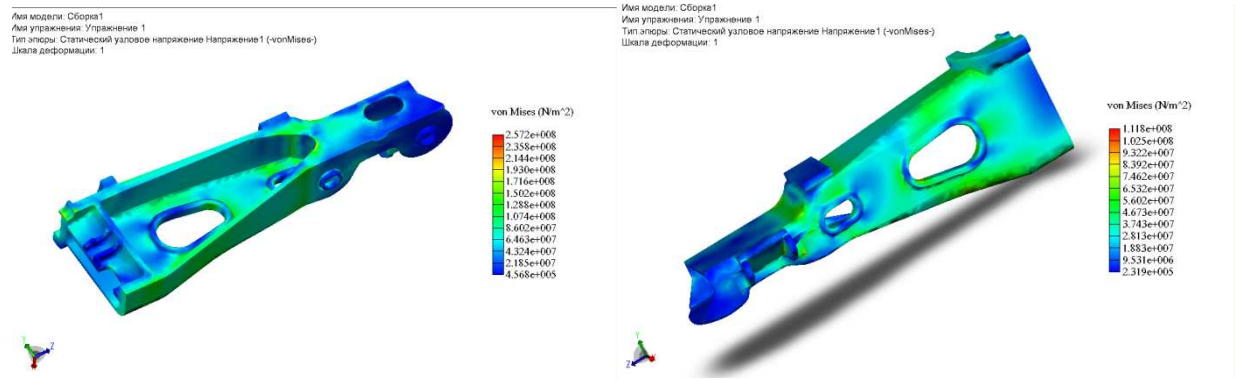
Время расчета каждой схемы нагружения надрессорной балки составило 14 мин. Таким образом, надрессорная балка рассчитана для I и III расчетных режимов при движении в прямом и кривом участках пути. При движении в кривом участке пути было учтено различие приложенных нагрузок, действующих на геометрическую модель, находящуюся ближе к центру кривой и дальше от него.

Изополя распределения напряжений для некоторых вариантов расчетов приведены на рисунках 8 и 9.



а б

Рисунок 8 – Изополя распределения напряжений в надрессорной балке в прямом участке пути (I расчетный режим)



а б

Рисунок 9 – Изополя распределения напряжений в надрессорной балке в прямом участке пути (III расчетный режим)

Анализ результатов расчетов показал совпадение внутренних и внешних сил, что обеспечивает достаточную точность вычислений. Изополя распределения напряженно-деформируемого состояния имеют концентраты напряжений во всех типичных зонах технологических отказов.

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. 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.

4. Алямовский, А. А. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике [Текст] / А. А. Алямовский. – СПб: БХВ-Петербург, 2008. – 1040 с.

5. Нормы для расчета и проектирования грузовых вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) [Текст] / М.: ВНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. – 318 с.

6. Конструирование и расчет вагонов [Текст] / В. В. Лукин, Л. А. Шадур и др. / УМК МПС России. – М., 2000. – 731 с.

УДК 621.332

Г. П. Маслов, И. Л. Саля, К. С. Маркелова

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ТОКОСЪЕМА НА МОНОРЕЛЬСОВОМ ТРАНСПОРТЕ

В статье приведены результаты исследования взаимодействия устройств токосъема монорельсового транспорта. Проанализированы негативные последствия токосъема: акустический шум, радиопомехи и световое излучение при искрении, износ контактных элементов.

Устройства токосъема являются одними из важных элементов монорельсовой транспортной системы. Контактное нажатие выступает основным критерием, определяющим качество токосъема [1].

Схема для расчета взаимодействия токоприемника монорельсового транспорта с жестким токопроводом и определения контактного нажатия $P_{кт}$ изображена на рисунке 1.

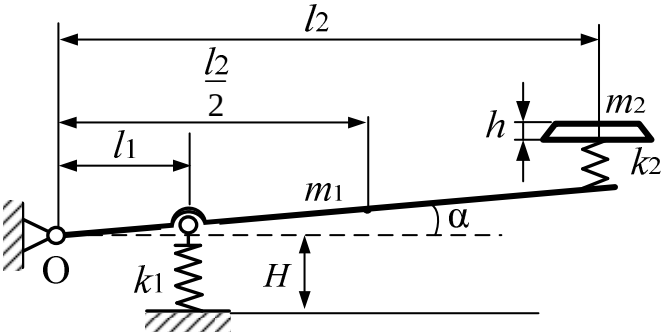


Рисунок 1 − Схема для расчета взаимодействия токоприемника монорельсового транспорта с жестким токопроводом: m1 − масса штанги, кг; m2 − масса контактного элемента, кг; k1 − жесткость нажимной пружины, Н/м; k2 − жесткость пружины контактного элемента, Н/м; l1 − расстояние от оси вращения до нажимной пружины, м; l2 − расстояние от оси вращения О до точки крепления пружины контактного элемента, м; 0,5·l2 – расстояние от оси вращения О до центра массы штанги токоприемника С, м; α – угол поворота штанги токоприемника; Н – расстояние до точки крепления нажимной пружины, м; h – расстояние от верхней точки крепления пружины контактного элемента до верхней (рабочей) грани контактного элемента, м

В расчетах приняты следующие допущения:

1) токопровод считается абсолютно жестким;

2) траектория провисания токопровода выбирается синусоидальной;

3) амплитуды горизонтальных и вертикальных перемещений основания токоприемника равны нулю (влияние экипажа отсутствует);

4) отрывы токосъемного элемента от токопровода отсутствуют;

5) токопровод не имеет разрегулированных стыковых соединений;

6) аэродинамическая сила, влияющая на контактное нажатие, принимается равной нулю;

7) сила трения скольжения между токопроводом и токосъемным элементом отсутствует.

Силы, действующие на элементы токоприемника, показаны на рисунке 2.

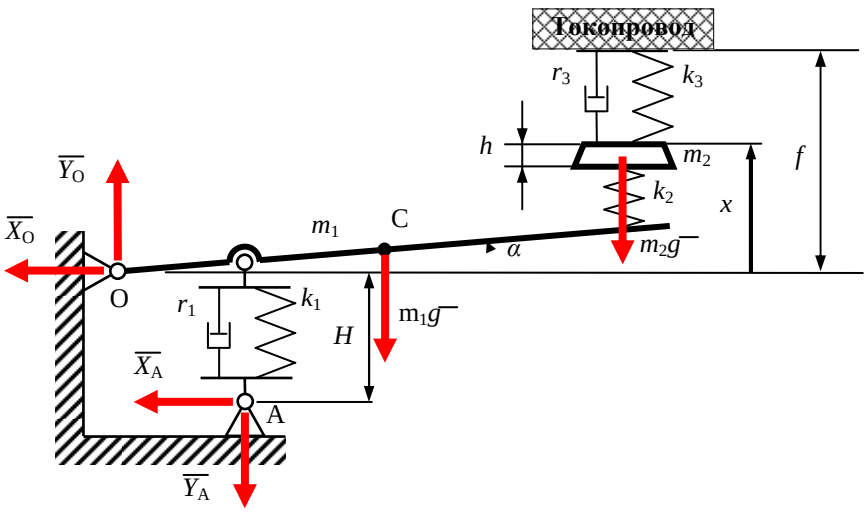


Рисунок 2 – Силы, действующие на элементы токоприемника

За обобщенные координаты приняты:

x – вертикальное смещение контактного элемента от положения покоя;

α – угол поворота штанги от положения покоя.

На рисунке 2 введены следующие обозначения: r_3 – вязкость в контакте согласно теории Герца [2]; k_3 – жесткость в контакте; m_1g – вес штанги токоприемника; m_2g – вес контактного элемента; Y_O, X_O, Y_A, X_A – опорные реакции; f – высотное положение токопровода, которое задано выражением:

$$f = f_0 + f_m \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot x_{п.с}}{l_{пр}}\right), \tag{1}$$

где f_0 – смещение синусоиды токопровода относительно оси вращения штанги токоприемника;

f_m – амплитуда траектории расположения токопровода;

$x_{п.с}$ – путь, пройденный подвижным составом;

$l_{пр}$ – длина одного пролета токопровода (периода синусоиды $l_{пр}$ = 2,26 м).

Силу контактного нажатия токоприемника можно определить, решая систему двух уравнений Лагранжа второго рода:

$$\begin{cases} \dfrac{d}{dt}\left(\dfrac{\partial T}{\partial \dot{x}}\right) - \dfrac{\partial T}{\partial x} + \dfrac{\partial \Pi}{\partial x} + \dfrac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}} = Q_x; \\ \dfrac{d}{dt}\left(\dfrac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}}\right) - \dfrac{\partial T}{\partial \alpha} + \dfrac{\partial \Pi}{\partial \alpha} + \dfrac{\partial \Phi}{\partial \dot{\alpha}} = Q_\alpha, \end{cases} \tag{2}$$

где T – кинетическая энергия системы;

Π – потенциальная энергия;

Φ – функция рассеивания системы;

Q_x – обобщенная сила, соответствующая силам сопротивления по обобщенной координате x;

Q_α – обобщенная сила, соответствующая силам сопротивления по обобщенной координате α.

Кинетическая энергия токоприемника в рассматриваемой системе определяется следующим образом:

$$T = \sum_{i=1}^{n} T_i. \tag{3}$$

Кинетическая энергия штанги токоприемника

$$T_1 = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \dot{\alpha}^2, \tag{4}$$

где $\dot{\alpha}$ – угловая скорость штанги;

J – момент инерции штанги относительно неподвижной оси,

$$J = \frac{1}{3} m_1 \cdot l_2^{\,2}, \tag{5}$$

где m_1 – масса штанги;

l_2 – длина штанги.

Кинетическая энергия контактного элемента:

$$T_2 = \frac{1}{2} m_2 \cdot \dot{x}^2, \tag{6}$$

где m_2 – масса контактного элемента;

$\dot{x}$ – скорость перемещения контактного элемента.

Тогда кинетическая энергия токоприемника равна сумме кинетических энергий штанги и контактного элемента:

$$T = \frac{1}{6} m_1 \cdot l_2^{\,2} \cdot \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2} m_2 \cdot \dot{x}^2. \tag{7}$$

Потенциальная энергия токоприемника в рассматриваемой системе определяется по выражению:

$$\ddot{I} = \sum_{i=1}^{n} \ddot{I}_{\,i} + \sum_{j=1}^{m} \ddot{I}_{\,\acute{o}j}, \tag{8}$$

где Π_i – потенциальная энергия i-го элемента конструкции токоприемника в поле сил тяжести;

$\Pi_{уj}$ – потенциальная энергия j-й пружины токоприемника в поле сил упругости.

Потенциальная энергия штанги токоприемника

$$\Pi_1 = -m_1 \cdot g \frac{l_2}{2} \sin(\alpha). \tag{9}$$

Потенциальная энергия контактного элемента

$$\Pi_2 = -m_2 \cdot g \cdot x. \tag{10}$$

Потенциальная энергия от силы упругости нажимной пружины токоприемника

$$\Pi_{y1} = \frac{1}{2} k_1 \left(l_{01} - H - l_1 \sin(\alpha) \right)^2, \tag{11}$$

где l_{01} – длина нажимной пружины в ненагруженном состоянии.

Потенциальная энергия от силы упругости пружины каретки токоприемника

$$\Pi_{y2} = \frac{1}{2} k_2 \left(l_{02} - x + h + l_2 \sin(\alpha) \right)^2, \tag{12}$$

где l_{02} – длина пружины каретки в ненагруженном состоянии.

Потенциальная энергия от *имитируемых* сил упругости контакта

$$\Pi_{y3} = \frac{1}{2} k_3 \left(l_{03} - f + x \right)^2, \tag{13}$$

где l_{03} – длина пружины, имитирующей жесткость контакта, в ненагруженном состоянии.

Таким образом, потенциальная энергия рассматриваемого токоприемника

$$\Pi = \frac{1}{2}k_1\left(l_{01} - H - l_1\sin(\alpha)\right)^2 + \frac{1}{2}k_2\left(l_{02} - x + h + l_2\sin(\alpha)\right)^2 + \\ + \frac{1}{2}k_3\left(l_{03} - f + x\right)^2 + \frac{1}{2}m_1 \cdot g \cdot l_2 \cdot \sin(\alpha) + m_2 \cdot g \cdot x. \quad (14)$$

Функция рассеивания системы зависит от сил вязкого трения r_1 и r_3:

$$\Phi = \frac{1}{2}r_1 \cdot l_1^2 \cdot \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2}r_3\left(\dot{x} - \dot{f}\right)^2. \quad (15)$$

Вычислив производные, подставим их в систему уравнений (2):

$$\begin{cases} \frac{1}{3}m_1 \cdot l_2^2 \cdot \ddot{\alpha} - k_1 \cdot \left(l_{01} - H - l_1 \cdot \sin(\alpha)\right) \cdot l_1 \cdot \cos(\alpha) + \\ + k_2\left(l_{02} - x + h + l_2 \cdot \sin(\alpha)\right) l_2 \cdot \cos(\alpha) + \frac{1}{2}m_1 \cdot g \cdot l_2 \cdot \cos(\alpha) + r_1 \cdot l_1^2 \cdot \dot{\alpha} = 0; \\ m_2 \cdot \ddot{x} - k_2\left(l_{02} - x + h + l_2 \cdot \sin(\alpha)\right) + k_3\left(l_{03} - f + x\right) + m_2 \cdot g + r_3\left(\dot{x} - \dot{f}\right) = 0. \end{cases} \quad (16)$$

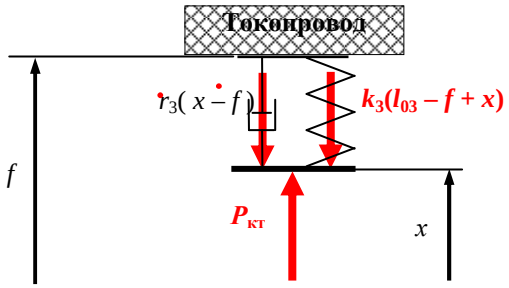


Рисунок 3 – Расчетная схема токоприемника для определения контактного нажатия

Решая систему дифференциальных уравнений (16), получаем зависимости угла поворота штанги токоприемника α(t) и высотного положения контактного элемента x(t), а также их производные. Далее рассмотрим схему, которая включает в себя только токопровод (рисунок 3). Воздействие со стороны токоприемника учитывается силой нажатия токоприемником на токопровод (контактным нажатием $P_{кт}$).

Составив уравнение равновесия по вертикальной оси и приравняв его к нулю, получаем формулу для расчета силы контактного нажатия:

$$P_{кт} = r_3\left(\dot{x} - \dot{f}\right) + k_3\left(l_{03} - f + x\right). \quad (17)$$

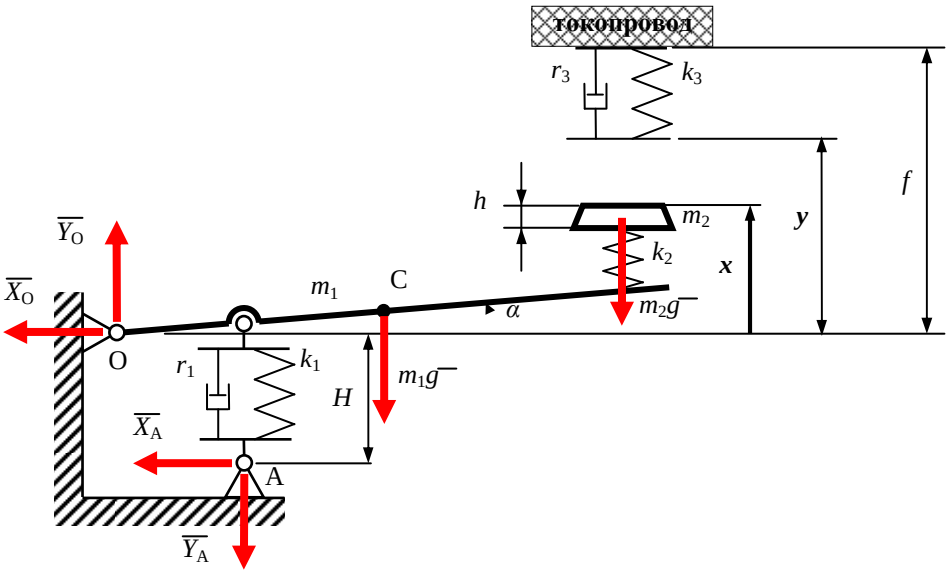


Рисунок 4 – Расчетная схема токоприемника

Для определения доли времени, при котором отсутствует контакт между токосъемным элементом и токопроводом, т. е. доли «отрывов» токосъемного элемента от токопровода, необходимо разделить работу токоприемника на две фазы: при контакте с токопроводом и без контакта с токопроводом. Первая фаза уже рассмотрена выше, для нее получена система двух уравнений, описывающих ди-

намику элементов токоприемника, (16) и формула для расчета контактного нажатия (17). Для второй фазы контактное нажатие отсутствует и необходимо рассматривать токоприемник отдельно от токопровода, так как в случае «отрыва» токоприемник механически не взаимодействует с токопроводом. Расчетная схема представлена на рисунке 4.

Система уравнений, описывающая движение элементов токоприемника в момент «отрыва», имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{1}{3} m_1 \cdot l_2^2 \cdot \ddot{\alpha} - k_1 \cdot \left(l_{01} - H - l_1 \cdot \sin(\alpha)\right) \cdot l_1 \cdot \cos(\alpha) + \\ + k_2 \left(l_{02} - x + h + l_2 \cdot \sin(\alpha)\right) l_2 \cdot \cos(\alpha) + \frac{1}{2} m_1 \cdot g \cdot l_2 \cdot \cos(\alpha) + r_1 \cdot l_1^2 \cdot \dot{\alpha} = 0; \\ m_2 \cdot \ddot{x} - k_2 \left(l_{02} - x + h + l_2 \cdot \sin(\alpha)\right) + m_2 \cdot g = 0. \end{cases} \quad (18)$$

Уравнение, описывающее движение контактной части токопровода (координата y на рисунке 4), имеет вид:

$$k_3 \left(l_{03} - f + y\right) + r_3 \left(\dot{x} - \dot{f}\right) = 0. \quad (19)$$

Условием переключения с расчетных уравнений первой фазы (16) и (17) на уравнения второй фазы «отрыв» (18) и (19) является получение в формуле расчета контактного нажатия (17) отрицательного значения. Условием обратного перехода является условие $x \geq y$.

Для заданных параметров токоприемника (таблица) получены зависимости, представленные на рисунке 5.

Исходные данные

Наименование параметра токоприемника	m_1, кг	l_1, м	k_1, Н/м	m_2, кг	l_2, м	k_2, Н/м	h, м	H, м	r_1, Н·с/м
Величина	2,0	0,22	1100	1,0	0,7	4000	0,02	0,15	20
Наименование	r_3, Н·с/м	f_m, м	k_3, Н/м	f_0, м	$l_{пр}$, м	g, м/с^2	l_{01}, м	l_{02}, м	l_{03}, м
Величина	55	0,001	50000	0,2	2,26	9,81	0,44	0,22	0

Пользуясь данной методикой, можно рассчитать силу контактного нажатия на рассматриваемом участке при заданной скорости движения подвижного состава и процент времени отсутствия контактного нажатия. Второй параметр позволяет судить об интенсивности электрического износа контактного элемента и токопровода, а также об уровне электромагнитных помех, излучаемых токоприемником.

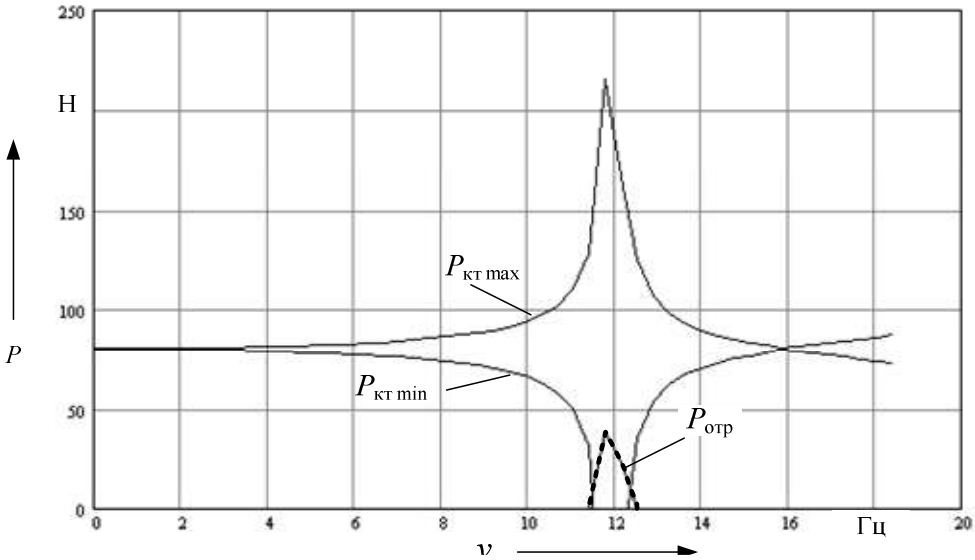


Рисунок 5 − Влияние частоты колебаний токоприемника на величину контактного нажатия при взаимодействии токосъемных устройств монорельсового транспорта

Из приведенных данных видно, что с увеличением частоты колебаний токоприемника наблюдается увеличение контактного нажатия и его максимальная величина достигает 215 Н на частоте 11,8 Гц (см. рисунок 5). В результате этого снижается качество токосъема и появляются негативные факторы (рисунок 6).

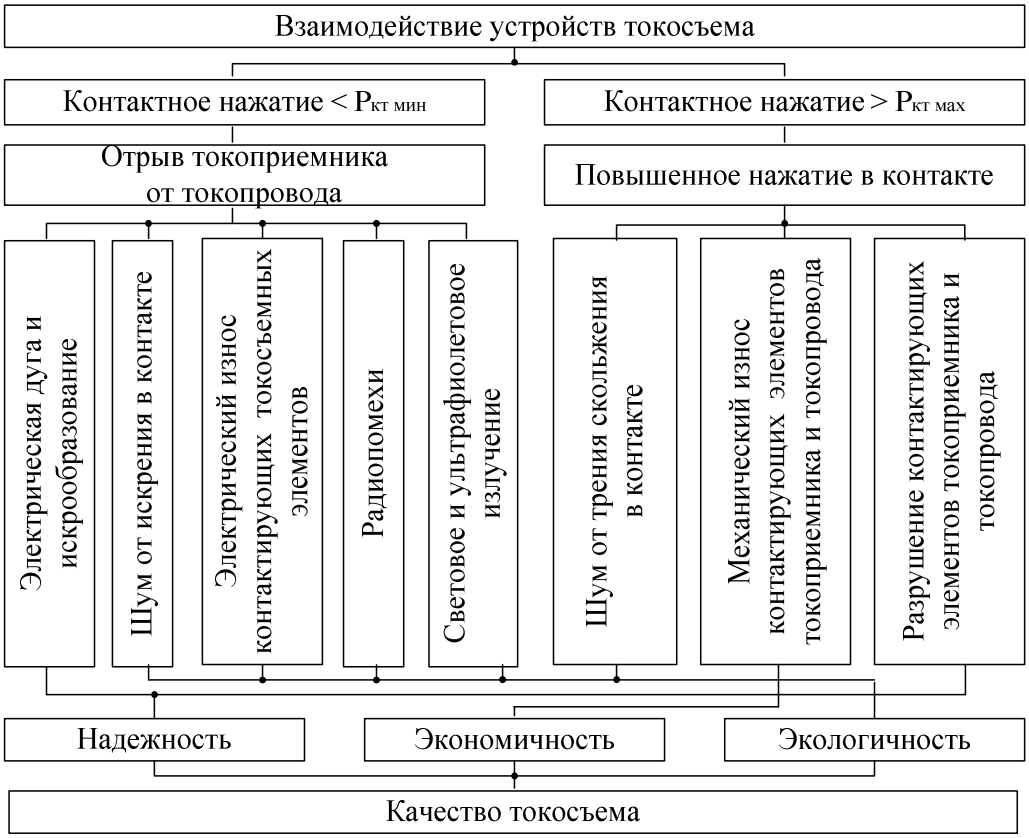


Рисунок 6 − Негативные факторы, снижающие качество токосъема

Контактное нажатие менее $P_{кт\ min}$ приводит к отрыву токоприемника от токопровода, вследствие чего появляются электрическая дуга и искрообразование, шум от искрения в контакте; радиопомехи; световое и ультрафиолетовое излучение и др.

Контактное нажатие свыше $P_{кт\ max}$ приводит к увеличению шума от трения скольжения в контакте; повышенному истиранию и износу контактирующих элементов токоприемника и токопровода и др.

Отрыв токоприемника от токопровода и повышенное нажатие не обеспечивают безопасного взаимодействия токосъемных устройств, что нарушает надежность токосъема.

Повышенный износ контактирующих элементов при уменьшении или увеличении контактного нажатия приводит к снижению экономичности токосъема.

Радиопомехи, шум от трения и искрения в контакте, световое и ультрафиолетовое излучение, распространение продуктов износа контактирующих элементов токоприемника и токопровода снижают экологичность токосъема.

Проведенные исследования взаимодействия устройств токосъема монорельсового транспорта показали, что контактное нажатие изменяется от 0 до 215 Н на частоте 11,8 Гц.

При указанном размахе колебаний контактного нажатия возникают негативные последствия токосъема, а именно: акустический шум, радиопомехи и световое излучение при искрении, износ контактирующих элементов, которые ухудшают надежность, экономичность и экологичность токосъема.

Список литературы

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

2. Ландау, Л. Д. Теория упругости [Текст] / Л. Д. Ландау, Е. М. Лившиц. – М.: Наука, 1987. – 246 с.

УДК 629.45.048

Ю. И. Матяш, О. В. Гателюк, О. С. Томилова, В. В. Томилов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТИ В УФ-СТЕРИЛИЗАТОРЕ МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

В статье приведены математические модели течения жидкости в УФ-стерилизаторе с концентрично установленными патрубками модернизированной системы водоснабжения пассажирского вагона, позволяющие определить поле скоростей вращательной составляющей скорости и оценить степень ее затухания в зависимости от геометрии камеры обеззараживания, входного давления в системе водоснабжения и свойств жидкости. Найдены точные решения уравнений Навье – Стокса для вращающейся жидкости между неподвижными цилиндрами бесконечной длины и ограниченными фиктивными детерминированно вращающимися крышками при условии пуазейлевого осесимметричного течения. Решение в явном виде содержит произведение цилиндрических функций Бесселя и гиперболических функций.

Согласно стратегии инновационного развития ОАО «РЖД» на период до 2015 г. («Белая книга» ОАО «РЖД») железнодорожный транспорт должен стать лидирующим видом транспорта, в том числе по экологической безопасности, в пассажирских перевозках. Цель инновационного развития ОАО «РЖД» направлена на достижение параметров экологической безопасности, определенных транспортной стратегией Российской Федерации на период до 2030 г., стратегией развития железнодорожного транспорта до 2030 г. и стратегией развития холдинга «РЖД» на период до 2030 г. и основных приоритетов его развития на среднесрочный период до 2015 г.

Стратегические ориентиры компании в области экологии к 2015 г. предусматривают внедрение эффективных ресурсосберегающих природоохранных технологий и экологически чистых материалов, рациональное использование природных ресурсов и повышение экологической безопасности и социальной ответственности деятельности компании. Ожидаемым результатом, который будет достигнут в процессе реализации экологической стратегии, является формирование имиджа экологически ответственной компании.

Согласно программе «Чистая вода» повышение качества централизованного водоснабжения до уровня, достигнутого западноевропейскими странами, позволит населению использовать водопроводную воду и не прибегать к использованию бутилированной воды.

В то же время вода, поступающая к потребителю в пассажирских вагонах, подверженная вторичному загрязнению [1], не всегда отвечает требованиям по эпидемиологической безопасности. Поэтому разработка устройств очистки воды в пассажирских вагонах является весьма актуальной задачей.

В работах [2 – 4] приводятся решения указанной выше проблемы, заключающиеся в установке модернизированного устройства ультрафиолетовой (УФ) стерилизации в водоналивную трубу [5]. Однако в настоящее время отсутствует математическая модель, позволяющая за малое время выполнить предварительную оценку работоспособности устройства.

Исследованием динамики жидкости занимались такие зарубежные ученые, как Л. Эйлер, Д. Бернулли, Ж. Лагранж, А. Навье, Г. Стокс, Г. Ламб, Л. Прандтль, Л. Милн-Томсон, Г. Гельмгольц, А. Пуанкаре, Ж. Пуазейль, О. Рейнольдс, Н. Куэтт, Ф. Циглер, Дж. Бэтчелор, Г. Бирхгоф и др. Численным решением уравнений гидрогазодинамики занимался Дж. Роуч.

Образование по гидромеханике в нашей стране следует традициям Н. Е. Жуковского и С. А. Чаплыгина. Их последователями можно назвать классиков российской науки Н. Е. Кочина, И. А. Кибеля и Н. В. Розе, Л. Г. Лояцинскиого, Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица, Л. И. Седова, С. А. Христиановича, М. А. Лаврентьева и Б. В. Шабата и др.

К наиболее близким моделям, в которых используются аналитические выражения, можно отнести гидродинамические расчеты распределения скоростей в трубах различного сечения при заданном градиенте давления вдоль оси, вращающихся жидкостях, коаксиальных

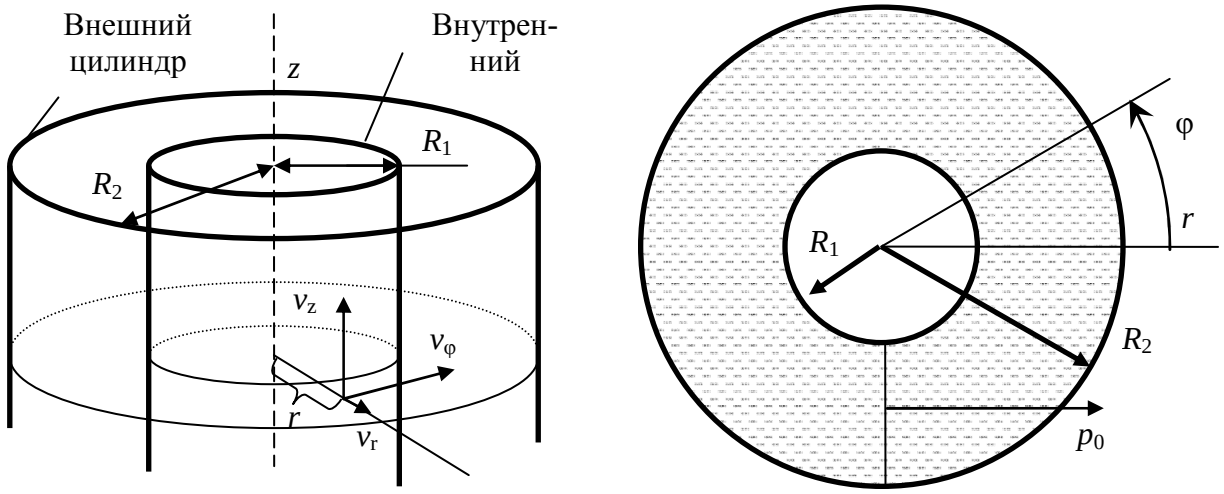
цилиндрах (и эллипсоидах), вращающихся с постоянными скоростями (одинаковыми и разными, в том числе в разных направлениях), и в вихревых трубах, основанных на эффекте Ранка и применяемых для охлаждения и подогрева, в том числе жидких сред.

Из всего многообразия методов для расчета движения жидкости в УФ-камере стерилизатора могут быть применены общие методики расчета, в которых жидкость представлена вязкой несжимаемой средой с наложением граничных условий, связанных с геометрией камеры и свойством «прилипания» жидкости, и начальных условий, формируемых тангенциальными входом и выходом.

Внутренне рабочее пространство УФ-стерилизатора представляет собой две концентрично расположенные цилиндрические поверхности конечного размера: кварцевый чехол и противоположная поверхность корпуса, закрытые с обеих сторон плоскими поверхностями.

В общем случае задача сводится к гидродинамическому расчету несжимаемой вязкой жидкости между двумя коаксиальными цилиндрами с общей осью z и радиусами R_1 и R_2 соответственно (рисунок 1). Каждая частица жидкости в определенный момент времени обладает скоростью v, которую можно разложить на составляющие v_z, v_φ и v_r, а также пространственными координатами.

При формировании модели используются следующие допущения. В расчете не учитывается наличие внутренних крепежных элементов, интенсивно перемешивающих потоки жидкости, и поверхности имеют простые геометрические формы, а формируемая модель является стационарной, так как переходный процесс заполнения камеры УФ-стерилизатора значительно меньше основного времени заполнения бака. Цилиндры принимаются бесконечной длины, следовательно, краевыми эффектами «прилипания» жидкости на концах можно пренебречь. Действие силы тяжести не учитывается. Модель является изотермической, поэтому уравнение теплового баланса исключено из расчета.



а б

Рисунок 1 – Расчетная схема устройства в цилиндрических координатах (а) и ее поперечное сечение (б)

Используя одну из гипотез Г. Бирхгофа об интуитивном определении топологии течения, вызванного симметричным воздействием [6], полагаем, что постоянный градиент давления вызывает симметричный эффект, проявляющийся в данном случае в отсутствии радиального компонента скорости v_r и наличии только тангенциального v_φ, зависящего от координаты r.

С учетом указанных допущений компонент v_φ известного дифференциального уравнения Навье – Стокса, описывающего состояние среды в цилиндрических координатах, приведенного к каноническому виду, имеет вид:

$$\frac{\partial^2 \upsilon_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial \upsilon_\varphi}{\partial r} - \frac{\upsilon_\varphi}{r^2} = \frac{p_0}{\nu\rho}\frac{1}{r}. \quad (1)$$

где ρ – плотность среды;

p_0 – давление;

v – кинематическая вязкость.

Полученное неоднородное линейное дифференциальное уравнение второго порядка (1) является уравнением Эйлера [7], решение которого находится путем ввода новой независимой переменной, а затем – в виде суммы общего и частного решения полученного неоднородного:

$$\upsilon_\varphi = C_1 r + C_2 \frac{1}{r} + \ln r \cdot r \frac{1}{2} \frac{p_0}{v\rho}. \qquad (2)$$

Постоянные C_1 и C_2 определяются из граничных условий «прилипания» жидкости к поверхностям цилиндров:

$$\mathrm{v}(r = R_1) = \mathrm{v}(r = R_2) = 0. \qquad (3)$$

Подставляя граничные условия для скорости жидкости, получим:

$$\begin{cases} C_1 R_1 + C_2 \dfrac{1}{R_1} + \ln R_1 \cdot R_1 \dfrac{1}{2} \dfrac{p_0}{v\rho} = 0; \\ C_1 R_2 + C_2 \dfrac{1}{R_2} + \ln R_2 \cdot R_2 \dfrac{1}{2} \dfrac{p_0}{v\rho} = 0. \end{cases} \qquad (4)$$

Точное решение уравнения движения жидкости между неподвижными коаксиальными цилиндрами бесконечной длины под действием постоянного давления, приводящего во вращение жидкость, имеет вид:

$$\upsilon_\varphi(r) = \frac{1}{2} \frac{p_0}{v\rho} \left[-\left(\frac{R_2}{R_1^2} \frac{\ln R_2 - \ln R_1}{\dfrac{R_2}{R_1^2} - \dfrac{1}{R_2}} + \ln R_1 \right) r + \left(R_2 \frac{\ln R_2 - \ln R_1}{\dfrac{R_2}{R_1^2} - \dfrac{1}{R_2}} \right) \frac{1}{r} + \ln r \cdot r \right]. \qquad (5)$$

Эпюра распределения скоростей между стенками цилиндров для различных величин давления p_0, г/(см · с^2) приведена на рисунке 2,а. Геометрические размеры внутреннего цилиндра R_1 = 5 см, внешнего – R_2 = 10 см. Плотность ρ = 0,9982 г/см^3, кинематическая вязкость воды $v = 0,010$ см^2/с.

Величину $r = R_3$, в которой скорость v_φ принимает максимальное значение, определим из условия равенства нулю производной v_φ:

$$\frac{1}{2} \frac{p_0}{v\rho} \left[-\left(\frac{R_2}{R_1^2} \frac{\ln R_2 - \ln R_1}{\dfrac{R_2}{R_1^2} - \dfrac{1}{R_2}} + \ln R_1 \right) - \left(R_2 \frac{\ln R_2 - \ln R_1}{\dfrac{R_2}{R_1^2} - \dfrac{1}{R_2}} \right) \frac{1}{r^2} + 1 + \ln r \right] = 0. \qquad (5)$$

Из уравнения (5) видно, что при заданной топологии величины вязкости, плотности и давления не влияют на кривую распределения изменения скорости по радиусу, т. е. максимум скорости всегда располагается на одном и том же расстоянии.

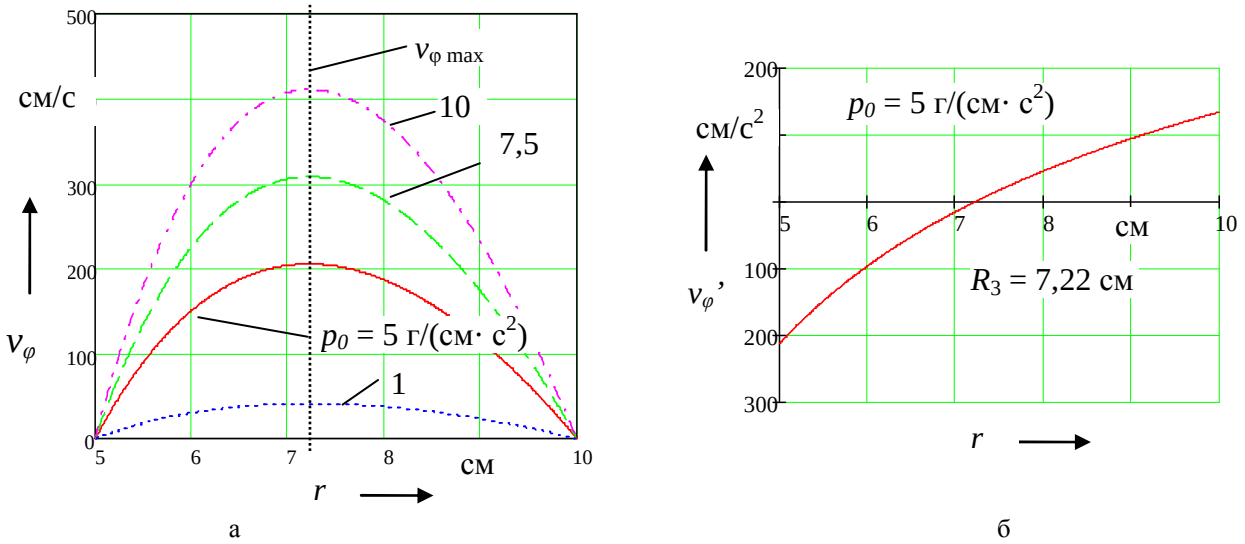


Рисунок 2 – Эпюры распределения скоростей (а) и ускорений (б) потоков между стенками цилиндров

Уравнение (5) относится к нелинейным трансцендентным, и его решение может быть найдено одним из численных методов, например, методом Рунге – Кутта четвертого порядка с помощью встроенной функции программы MathCAD. Корень уравнения (5) R_3 = 7,22 см (рисунок 2,б).

С определенным допущением полученная эпюра распределения скорости справедлива для тангенциального ввода, где градиент давления совпадает с его плоскостью. Между вводами давление направлено преимущественно вдоль оси стерилизатора, поэтому тангенциальная составляющая скорости будет снижаться при удалении от ввода и вывода.

Для определения характера вращательного движения между коаксиальными цилиндрами ограничим их по оси z таким образом, что нижняя и верхняя поверхности приводятся во вращение (рисунок 3,а). Для реализации движения воды в тангенциальных вводах примем величину угловой скорости вращения зависящей от радиуса таким образом, что ее распределение совпадает с эпюрой скоростей между стенками цилиндров при бесконечной длине. Особенностью данной модели является отсутствие давления, так как оно заменяется фиктивной скоростью указанной выше поверхности.

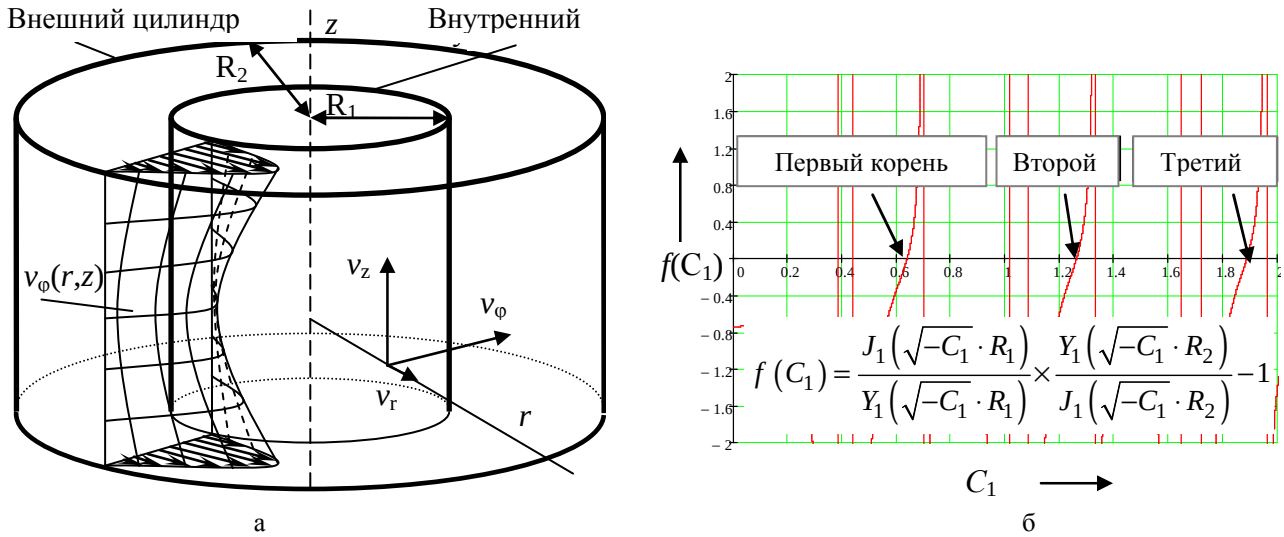


Рисунок 3 – Расчетная схема (а) определения поля скоростей между коаксиальными цилиндрами; график функции $f(C_1)$ (б)

С учетом предыдущих и вновь обозначенных допущений уравнения Навье – Стокса в полярных координатах для компонента v_φ преобразуются следующим образом:

$$\nu\left(\frac{\partial^2 \upsilon_\varphi}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial \upsilon_\varphi}{\partial r}+\frac{\partial^2 \upsilon_\varphi}{\partial z^2}-\frac{\upsilon_\varphi}{r^2}\right)=0\,. \qquad (6)$$

Уравнение (6) выполняется тождественно без учета коэффициента вязкости ν. Так как распределение скорости жидкости не зависит от вязкости, то такое распределение может иметь и идеальная жидкость, не обладающая вязкостью по определению. Уравнение (6) является дифференциальным уравнением в частных производных. Для его решения воспользуемся одним из распространенных методов решения уравнений математической физики – методом разделения переменных [8], при котором точное решение находится мультипликативным методом в виде произведения функций разных аргументов $v_\varphi=\varsigma(r)\cdot\psi(z)$:

$$\frac{\varsigma''_{rr}}{\varsigma(r)}+\frac{1}{r}\frac{\varsigma'_r}{\varsigma(r)}-\frac{1}{r^2}=-\frac{\psi''_{zz}}{\psi(z)}\,. \qquad (7)$$

Левая часть равенства (7) зависит только от переменной r, а правая – от z. Это возможно лишь при одновременном выполнении условия равенства левой и правой частей произвольной постоянной C_1. После преобразования вновь полученных уравнений из (7) и приведения их к каноническому виду имеем:

$$r^2\cdot\varsigma''_{rr}+r\cdot\varsigma'_r+\left[-C_1\cdot r^2-1\right]\varsigma(r)=0; \qquad (8)$$

$$\psi''_{zz}+C_1\cdot\psi(z)=0\,. \qquad (9)$$

Уравнение (8) является дифференциальным уравнением Бесселя, (9) – уравнением свободных колебаний. Общим решением полученных уравнений является множество семейств решений, зависящих от значения неопределенного коэффициента C_1, среди которых по результатам анализа подходит только одно:

$$\upsilon_\varphi(r,z)=\left[C_2\mathrm{sh}\left(z\sqrt{|C_1|}\right)+C_3\mathrm{ch}\left(z\sqrt{|C_1|}\right)\right]\times\left[C_4J_1\left(\sqrt{-C_1}\cdot r\right)+C_5Y_1\left(\sqrt{-C_1}\cdot r\right)\right], \qquad (10)$$

где $J_1(z)$, $Y_1(z)$ – функции Бесселя первого и второго рода соответственно.

Неопределенные коэффициенты C_1 – C_5 находятся из граничных условий «прилипания» жидкости на стенках коаксиальных цилиндров, а также на нижней и верхней крышках, имеющих координаты Z_1 и Z_2 и вращающихся с детерминированными скоростями с максимумом на радиусе R_3 (R_3 = 7,22 см, для R_1 = 5 см и R_2 = 10 см) соответственно:

$$\begin{cases}\upsilon_\varphi\left[r=R_1, z\in\left(Z_1,Z_2\right)\right]=0;\\ \upsilon_\varphi\left[r=R_2, z\in\left(Z_1,Z_2\right)\right]=0;\end{cases} \qquad (11)$$

$$\begin{cases}\upsilon_\varphi\left[r=R_3, z=Z_1\right]=\upsilon_{\varphi\max};\\ \upsilon_\varphi\left[r=R_3, z=Z_2\right]=\upsilon_{\varphi\max}.\end{cases} \qquad (12)$$

С учетом граничных условий (11) и (12), опуская промежуточные преобразования, неопределенный коэффициент C_1 может быть найден из следующего выражения:

$$\frac{J_1\left(\sqrt{-C_1}\cdot R_1\right)}{Y_1\left(\sqrt{-C_1}\cdot R_1\right)}\times\frac{Y_1\left(\sqrt{-C_1}\cdot R_2\right)}{J_1\left(\sqrt{-C_1}\cdot R_2\right)}=1\,, \qquad (13)$$

решение которого возможно найти лишь численным методом и при известных R_1 и R_2, для чего воспользуемся графическим способом отделения корней.

Для R_1 = 5 и R_2 = 10 график функции $f(C_1)$ приведен на рисунке 3,б, из которого видно, что на интервале [0;2] имеются три корня. Определение первого корня на интервале [0,6; 0,65] итерационными методами Рунге – Кутта четвертого порядка и Ньютона дает значение C_1 = 0,639.

При подстановке первого корня (C_1 = 0,639) эпюра распределения скоростей между стенками цилиндров для произвольной координаты z выглядит, как на рисунке 4,а.

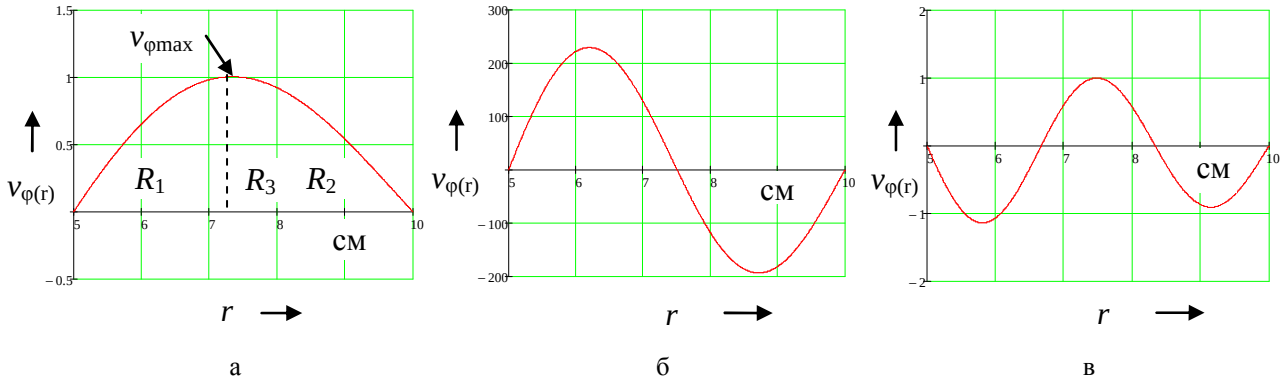


Рисунок 4 – Эпюры распределения скоростей между стенками цилиндров для неопределенного коэффициента C1 = 0,639 (а); 1,262 (б) и 1,889 (в)

Необходимо отметить, что при подстановке второго и последующих корней C_1 (рисунок 4,б,в) для любых R_1 и R_2 детерминированное распределение скорости v_φ поверхностей, ограничивающих концентричные цилиндры, принимает отрицательные значения. Эпюра на рисунке 4,б возможна только при значительных скоростях, когда возникает обратный центральный продольный поток, закручивающийся в противоположную сторону. Последнее характерно для вихревых труб, циклонов и других устройств. Третья эпюра (см. рисунок 4,в) с физической точки зрения течения жидкости не имеет смысла. Для расчета предлагаемой модели необходимо использовать только первый корень.

Опуская промежуточные расчеты по определению неопределенных коэффициентов, частное решение уравнения (10) при выполнении условия (13) выражается зависимостью (14).

Эпюра распределения максимумов скоростей между фиктивными поверхностями, ограничивающими цилиндры, с координатами Z_1 = 1 см и Z_2 = 100 см и максимумами скоростей $v_{\varphi\ max1} = v_{\varphi\ max2}$ = 10 см/с приведена на рисунке 5,а.

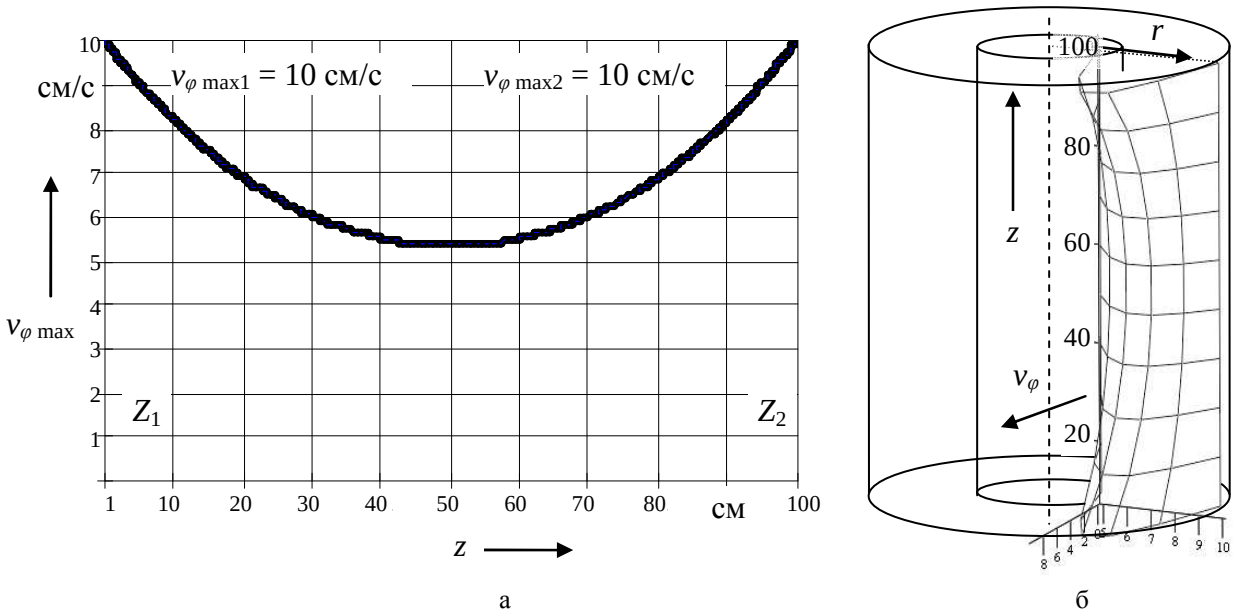


Рисунок 5 – Эпюра максимумов (а) и поле (б) скоростей между поверхностями, ограничивающими цилиндры

Равенство скоростей входного и выходного патрубков возможно при идеальной и полностью симметричной геометрии; однако на практике такого быть не может. Эпюра распределения максимумов скоростей между поверхностями, ограничивающими цилиндры с разными скоростями $v_{\varphi\ max1}$ = 10 см/с и $v_{\varphi\ max2}$ = 5 см/с, приведена на рисунке 6.

$$\upsilon_{\varphi}(r,z)=\left[\frac{v_{\varphi\max 1}}{\mathrm{sh}\left(z_1\sqrt{|C_1|}\right)}-\frac{v_{\varphi\max 2}-v_{\varphi\max 1}\dfrac{\mathrm{sh}\left(z_2\sqrt{|C_1|}\right)}{\mathrm{sh}\left(z_1\sqrt{|C_1|}\right)}}{\mathrm{sh}\left(z_1\sqrt{|C_1|}\right)\times\mathrm{ch}\left(z_2\sqrt{|C_1|}\right)-\mathrm{ch}\left(z_1\sqrt{|C_1|}\right)\times\mathrm{sh}\left(z_2\sqrt{|C_1|}\right)}\times\right.$$

$$\left.\times\mathrm{ch}\left(z_1\sqrt{|C_1|}\right)\times\mathrm{sh}\left(z\sqrt{|C_1|}\right)+\frac{v_{\varphi\max 2}-v_{\varphi\max 1}\dfrac{\mathrm{sh}\left(z_2\sqrt{|C_1|}\right)}{\mathrm{sh}\left(z_1\sqrt{|C_1|}\right)}}{\mathrm{ch}\left(z_2\sqrt{|C_1|}\right)-\dfrac{\mathrm{ch}\left(z_1\sqrt{|C_1|}\right)\times\mathrm{sh}\left(z_2\sqrt{|C_1|}\right)}{\mathrm{sh}\left(z_1\sqrt{|C_1|}\right)}}\times\mathrm{ch}\left(z\sqrt{|C_1|}\right)\right]\times \qquad (14)$$

$$\times\left[\frac{J_1\left(\sqrt{-C_1}\cdot r\right)}{J_1\left(\sqrt{-C_1}\cdot R_3\right)-\dfrac{1}{Y_1\left(\sqrt{-C_1}\cdot R_3\right)}\times\dfrac{Y_1\left(\sqrt{-C_1}\cdot R_2\right)}{J_1\left(\sqrt{-C_1}\cdot R_2\right)}}+\frac{Y_1\left(\sqrt{-C_1}\cdot r\right)}{Y_1\left(\sqrt{-C_1}\cdot R_3\right)-\dfrac{1}{J_1\left(\sqrt{-C_1}\cdot R_3\right)}\times\dfrac{J_1\left(\sqrt{-C_1}\cdot R_1\right)}{Y_1\left(\sqrt{-C_1}\cdot R_1\right)}}\right].$$

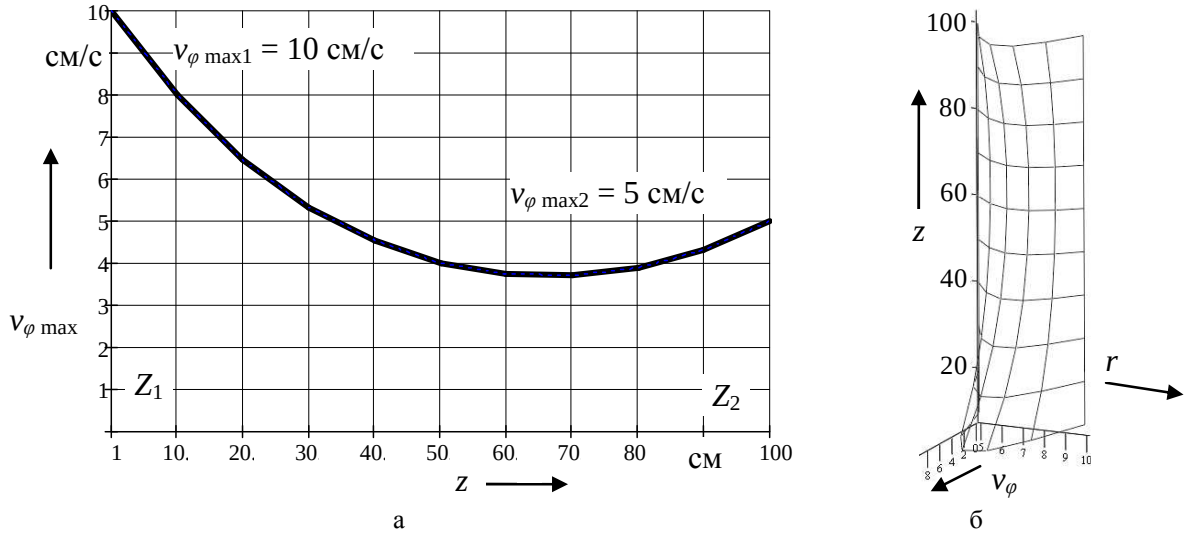


Рисунок 6 – Эпюра максимумов (а) и поле (б) скоростей между поверхностями, ограничивающими цилиндры и вращающимися с разными скоростями

Кроме того, возникает вопрос о достаточности установки только одного концентричного патрубка (или входного, или выходного) для формирования закрученного потока. При этом максимум скорости будет приходиться на тот патрубок, что установлен концентрично, и ее нулевое значение – на конец без «закрутки». Распределение скоростей для такого режима показано на рисунке 7.

На рисунке 8 приведено распределение максимумов скоростей между поверхностями, ограничивающими цилиндры и вращающимися в противоположных направлениях.

Как указывалось выше, при значительном давлении в области тангенциального завихрителя формируется обратный поток вдоль УФ-лампы, имеющий вращение в обратную сторону. Настоящая модель позволяет моделировать несмотря на отсутствие учета продольной и радиальной составляющей скорости, такой вид течений и отображает степень затухания скоростей вихрей вдоль оси (рисунок 9).

Функция (14) двух переменных r и z с геометрической точки зрения представляет собой

поверхность, расположенную в трехмерных координатах, с физической – поле скоростей. Влияние расположения патрубков на поле скоростей приведено на рисунках 5 – 9,б.

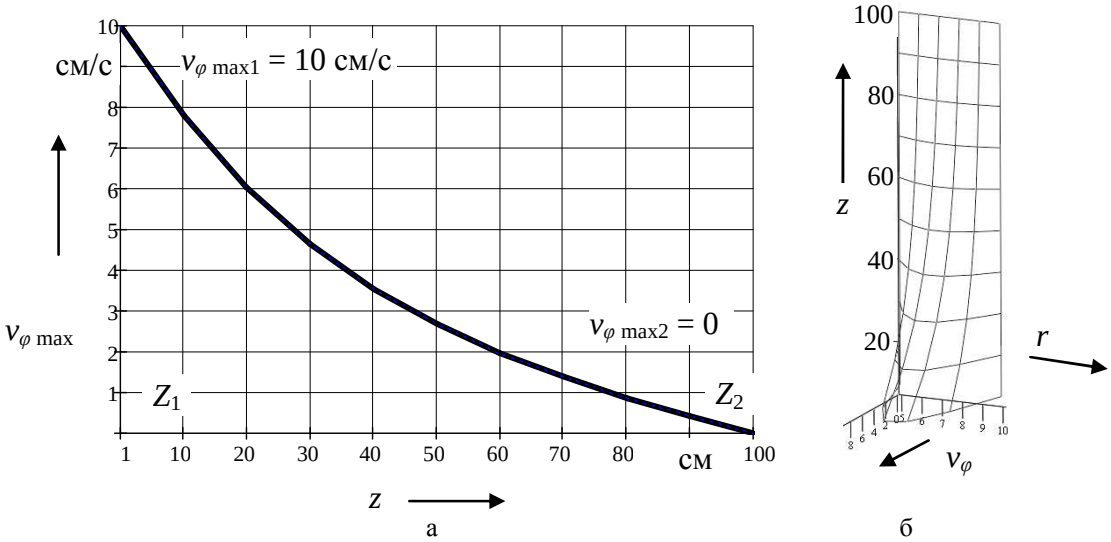


Рисунок 7 – Эпюра максимумов (а) и поле (б) скоростей с одной вращающейся и одной неподвижной поверхностями, ограничивающими цилиндры

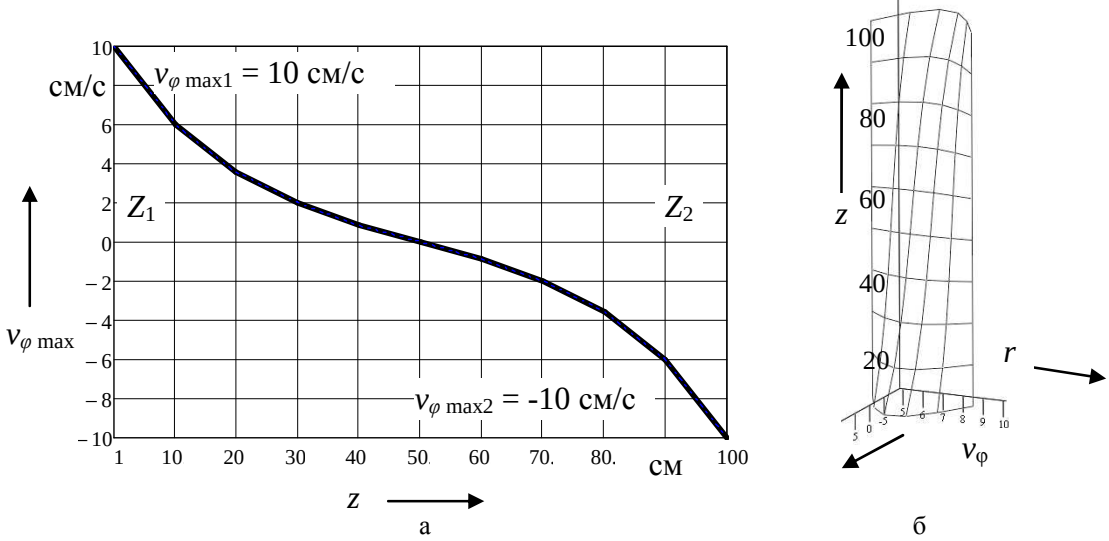


Рисунок 8 – Эпюра максимумов (а) и поле (б) скоростей между поверхностями, ограничивающими цилиндры и вращающимися в противоположных направлениях

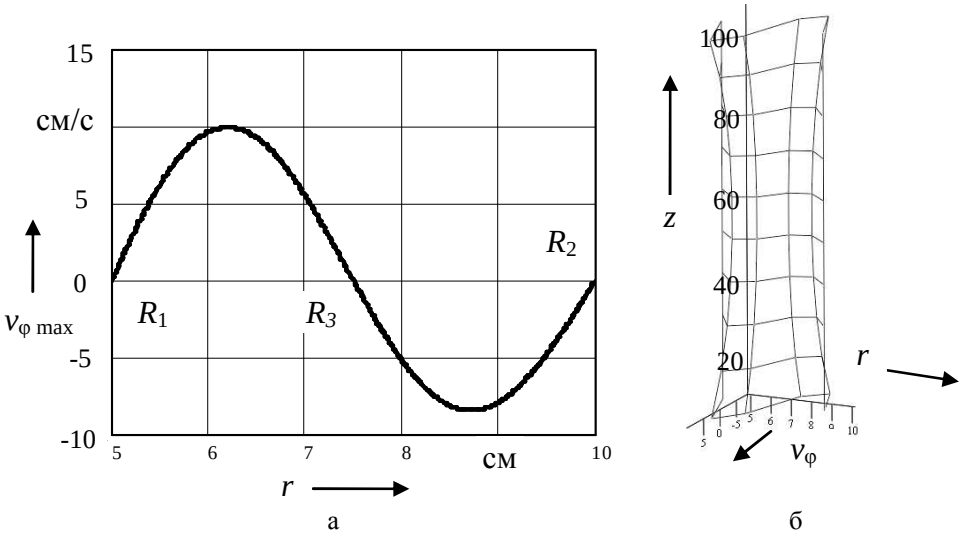


Рисунок 9 – Эпюра максимумов (а) и поле (б) скоростей между поверхностями, ограничивающими цилиндры, вращающимися в противоположных направлениях со встречными внутренним и внешним вихрями

По результатам анализа математических моделей для модернизированных УФ-стерилизаторов пассажирских вагонов железнодорожного транспорта можно сделать следующие выводы.

Модель позволяет оценить степень снижения вращательной (тангенциальной) составляющей скорости вдоль камеры обеззараживания; определить рациональную длину УФ-стерилизатора, обеспечивающую высокую степень очистки в соответствии с условиями, характерными для систем водоснабжения на железнодорожном транспорте.

При проектировании УФ-стерилизатора его верхний патрубок должен быть выполнен концентрично и установлен таким образом, чтобы формировать вращение потока воды в том же направлении, что и нижний.

Модель на основе точного расчета позволяет визуализировать поле скоростей течения, количественно оценить изменение вращательной составляющей скорости для заданных геометрических параметров УФ-стерилизатора, давления воды, рассчитать среднюю скорость и определить напор и расход воды. Кроме того, имеется возможность аналитического описания распределения скоростей в устройствах со встречными течениями жидкости.

Разработанные модели необходимы для предварительного формирования геометрии камеры обеззараживания УФ-стерилизатора, реализуемого в программе Solid Works для оценки эффективности устройства [9]. Такой подход весьма востребован, поскольку метод конечных элементов требует больших затрат труда и времени [10].

Отличительной особенностью модели является возможность учета вращения стенок коаксиальных цилиндров в любых направлениях и при любых скоростях, что не может быть реализовано методом конечных элементов.

Результаты исследований с достаточной степенью точности согласуются с экспериментальными данными, полученными на лабораторном стенде, реализованном на кафедре «Вагоны и вагонное хозяйство» Омского государственного университета путей сообщения.

Согласно проведенным исследованиям применение УФ-стерилизаторов с тангенциальной составляющей скорости движения жидкости позволяет снизить мощность УФ-лампы, уменьшить габариты устройства и обеспечить высокую степень очистки однократным пропусканием жидкости по сравнения с типовыми конструкциями.

По предварительным экономический расчетам отказ от использования в пассажирских вагонах бутилированной питьевой воды в пользу применения предлагаемой системы водоснабжения позволяет достичь значительного экономического эффекта и в кратчайшие сроки окупить вложенные инвестиции, что является критерием инновационности.

Предлагаемая модель может быть использована при проектировании проточных стерилизаторов с концентрично установленными фланцами и для других отраслей народного хозяйства.

Список литературы

1. Матяш, Ю. И. Устройства по предотвращению появления вторичного загрязнения питьевой воды в пассажирских вагонах дальнего следования [Текст] / Ю. И. Матяш, О. С. Томилова // Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – С. 115 – 122.

2. Матяш, Ю. И. Устройство для обеззараживания воды в пассажирских поездах дальнего следования [Текст] / Ю. И. Матяш, О. С. Томилова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – № 4. – С. 23 – 27.

3. Матяш, Ю. И. Применение ультрафиолетовых стерилизаторов для обеззараживания воды в пассажирских поездах дальнего следования [Текст] / Ю. И. Матяш, О. С. Томилова // Инновации для транспорта / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – Ч. 2. – С. 176 – 180.

4. Матяш, Ю. И. Моделирование процессов протекания жидкости в ультрафиолетовом стерилизаторе модернизированной системы водоснабжения пассажирского вагона [Текст] /

Ю. И. Матяш, О. С. Томилова, В. В. Томилов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2011. – № 2. – С. 16 – 21.

5. Пат. 88327 Российская Федерация, МПК B 61 D 35/00. Водоналивная система пассажирского вагона [Текст] / Ю. И. Матяш, О. С. Мотовилова (Россия). – № 2009127020/22; Заявлено 14.07.2009; Опубл. 10.11.2009 // Открытия. Изобретения. – 2009. – № 31. – 3 с.

6. Бирхгоф, Г. Гидродинамика. Методы. Факты. Учебное подобие [Текст] / Г. Бирхгоф / М.: Иностранная литература, 1963. – 244 с.

7. Зайцев, В. Ф. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям [Текст] / В. Ф. Зайцев, А. Д. Полянин. – М.: Физматлит, 2001. – 576 с.

8. Зайцев В. Ф. Метод разделения переменных в математической физике. Учебное пособие [Текст] / В. Ф. Зайцев, А. Д. Полянин // Российский гос. пед. ун-т им. А. И. Герцена. – СПб, 2009. – 92 с.

9. Томилова, О. С. Расчет эффективности УФ-стерилизатора модернизированной системы водоснабжения пассажирского вагона [Текст] / О. С. Томилова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2012. – № 3. – С. 47 – 54.

10. Маслов, Г. П. Аэродинамические показатели токоприемников скоростного электрического подвижного состава [Текст] / Г. П. Маслов, М. А. Дятлова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – № 1. – С. 20 – 25.

УДК 504.4054:628

Е. А. Руш, М. В. Обуздина

СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ АДСОРБЕНТОВ НА ОСНОВЕ ЦЕОЛИТОВ ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ ДЛЯ ОЧИСТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД В ЛОКОМОТИВНЫХ ДЕПО

В статье приводятся результаты исследований по созданию адсорбентов на основе модификации природных цеолитов Холинского месторождения Восточного Забайкалья, эффективных по отношению к извлечению нефтепродуктов из растворов; изучения закономерностей и механизмов протекающих процессов и установления количественных характеристик адсорбции в целях практического применения для очистки сточных вод в локомотивных депо.

Железнодорожный транспорт является одним из основных источников загрязнения окружающей среды. На предприятиях железнодорожного транспорта выполняются различные технологические процессы мойки оборудования, подвижного состава и его узлов в процессе эксплуатации и ремонта, в которых используется вода, что определяет образование сточных вод, содержащих значительные концентрации нефтепродуктов, кислот, щелочей, моющих веществ, антисептиков, фенолов, солей тяжелых металлов и многих других сопутствующих компонентов органического и неорганического происхождения. Технология очистки таких стоков представляет собой довольно сложный процесс. Расход сточных вод на различных предприятиях железнодорожного транспорта колеблется от 200 до 4000 м3/сут без учета такого же количества ливневых стоков с составом загрязнений, практически аналогичных составу промышленных сточных вод.

Стратегией развития железнодорожного транспорта до 2015 г. предусмотрена программа реализации комплекса природоохранных мероприятий, направленных на снижение техногенной нагрузки на объекты окружающей среды и уменьшение экологических рисков производственной деятельности предприятий отрасли на основе разработки технологий обезвреживания образующихся жидких нефтесодержащих отходов и сточных вод, так как в настоящее время не во всех случаях проводимых процессов многоступенчатой очистки сточных вод качество очищенных потоков удовлетворяет установленным требованиям [1].

Одним из способов очистки сточных вод от нефтепродуктов является извлечение их с помощью адсорбентов различной химической природы с последующей регенерацией. Несмотря на разнообразие промышленных адсорбентов многие из них не удовлетворяют всему комплексу требований, предъявляемых к материалам подобного типа. Поэтому представляется актуальным и перспективным поиск новых эффективных и экономически выгодных наполнителей адсорбционных аппаратов и фильтров, сохраняющих свои свойства при различных режимах очистки промышленных сточных вод.

Наличие больших запасов природных цеолитов в Восточном Забайкалье позволило авторам исследовать процессы их модификации в целях создания сорбционных материалов, эффективных к извлечению нефтепродуктов из промышленных сточных вод, а также изучить закономерности сорбционной очистки.

Природные цеолиты и цеолитсодержащие породы, являясь широко распространенным и дешевым минеральным сырьем, обладают уникальным спектром физических, физико-химических и адсорбционных свойств, благодаря чему они нашли широкое применение в практике очистки природных и сточных вод. Поскольку цеолиты являются сложными и непостоянными по составу многокомпонентными системами, их свойства существенно зависят не только от содержания цеолитовой фазы, но и от условий формирования цеолитизированных осадочных пород и характера примесей.

Холинское месторождение цеолитсодержащих туфов по разведанным запасам, качеству минерального сырья, горно-геологическим условиям и экономическому положению представляется наиболее крупным и выгодным для промышленного освоения среди других известных месторождений в пределах Восточной Сибири [2].

Полученные авторами данные минералогического, химического анализа и ИК-спектроскопии свидетельствуют о том, что исследуемые цеолитсодержащие туфы Холинского месторождения содержат в своем составе, %: 60–66 клиноптилолита, 3–5 монтмориллонита, 3 – 5 кварца, 3 – 5 микроклина, 10 – 2 кристобалита, 10 – 12 рентгеноаморфной фазы. Химический состав цеолитсодержащих туфов представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав цеолитсодержащих туфов Холинского месторождения

Компонент	Среднее содержание цеолитов, %	Компонент	Среднее содержание цеолитов, %
SiO_2	65,72	Na_2O	1,7 – 2,97
P_2O_5	0,04 – 0,054	K_2O	3,19 – 4,59
Al_2O_3	11,52	MnO	0,05 – 0,18
TiO_2	0,07 – 0,23	Cs_20	0,013
Fe_2O_3	0,44 – 1,97	Rb_20	0,045
FeO	0,17 – 0,73	SO	0,07
CaO	1,17 – 1,89	SO_3	0,13

Текстурно-геометрические характеристики цеолитов этого месторождения свидетельствуют об их высокой пористости – 40,87 % при среднем радиусе пор (по объему) – 0,3617 мкм и поверхности микропор 6,214 мкм. Насыпная плотность составляет 1007 – 778,9 кг/м^3. Размеры входных окон-входов – (3 – 13)·10 – 10 м. Диаметры пор не превышают 10 Å. Объем сорбционного пространства составляет 0,0037 – 0,0121·м^3/кг, предельный сорбционный объем – 0,0356 – 0,0217 м^3/кг, микропористость – 24 – 51 %, статическая влагоемкость – 3,0 – 8,6 %.

Основу структуры природных цеолитов клиноптилолитового типа составляет каркас из алюмокремнекислородных тетраэдров [Al, Si]O4, в которых каждый из четырех атомов кислорода, находящийся в вершинах тетраэдра, одновременно принадлежит двум смежным тетраэдрам, что обеспечивает такой структуре (неорганический полимер) сравнительно большую прочность. Атомы кремния и алюминия размещаются в центрах тетраэдров. Основной особенностью структуры цеолитов является наличие в каркасе больших пустот, объединяющихся в своеобразные открытые каналы [3].

Кремнекислородные и алюмокислородные тетраэдры в структуре·цеолита упакованы довольно рыхло, и образующиеся между ними пустоты заполнены водой, которую можно

удалить путем нагревания цеолита, не разрушая при этом его каркаса. Свободные от воды поры могут быть заполнены различными веществами, эффективные размеры которых не превышают диаметра входного окна. Эти особенности и определяют уникальные свойства минералов данного класса: молекулярно-ситовой, разделяющий эффект, высокую сорбционную и каталитическую способность [4].

Одним из перспективных направлений в очистке сточных вод является создание более эффективных сорбентов путем модификации поверхности материалов природного происхождения с целью расширения спектра извлекаемых из водных сред примесей.

Поэтому авторами были изучены сорбционные свойства образцов природных цеолитов Холинского месторождения Восточного Забайкалья и образцов указанных цеолитов, термически и химически модифицированных по отношению к нефтепродуктам.

Локомотивное депо ст. Иркутск-Сортировочный является подразделением Восточно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО «РЖД». Основными производственными показателями предприятия являются текущие ремонты тепловозов по циклам: технический ремонт ТР-1 и техническое обслуживание тепловозов по циклам ТО-2, ТО-3, а также текущие ремонты электровозов по циклам ТР-1, ТР-2. Системой производственной канализации ремонтных цехов ТР-1, ТО-2 предусмотрен сбор промышленных стоков и отвод их на локальные очистные сооружения, расположенные на территории локомотивного депо. Основными загрязнителями промышленных сточных вод являются нефтепродукты (дизельное топливо, мазут Н-20, отработанные моторные масла), железо общее, взвешенные вещества. Концентрация нефтепродуктов в поступающих на очистку стоках колеблется в значительных пределах – от 50 мг/г до 250 мг/л.

Локальные очистные сооружения (ЛОС) ТЧ-15 в составе «нефтеловушка, флотаторы, механические фильтры с загрузкой из кварцевого песка, фильтры доочистки с загрузкой из активированного угля» были запущены в эксплуатацию в 1978 г. Проектная мощность очистных сооружений составляет 300 $м^3$/сут. Фактическая нагрузка на очистные сооружения составляет 168,2 – 234 $м^3$/сут.

Проведенный анализ работы аппаратов, входящих в технологическую схему, позволил выявить следующие недостатки:

фильтр с керамзитовой загрузкой из кварцевого песка недостаточно эффективно удерживал взвешенные вещества, что приводило к их проскоку в фильтрах с активированным углем и снижало сорбционную емкость фильтра;

при регенерации сорбционных фильтров имел место вынос активированного угля вместе с отработанным паром и горячей водой (до 0,01 – 0,012 $м^3$ с одного фильтра при каждой регенерации). Кроме того, остаточная концентрация нефтепродуктов в очищенных потоках на выходе составляла 6,6 – 10,2 мг/л. Вода, сбрасываемая в городскую канализацию, согласно требованиям МУП «Водоканал» г. Иркутска имеет ограничения по концентрации нефтепродуктов 0,6 мг/л; взвешенных веществ – 60 мг/л; величине pH 6,5 – 8,5.

Таким образом, действующая технологическая схема очистки не позволяет достичь требуемых нормативов качества очищенных вод, что и предопределило необходимость реконструкции узла доочистки за счет использования адсорбера с новым типом загрузки.

Анализ публикаций последних нескольких лет показал, что разработка технологий очистки, включающих в себя процессы адсорбции, является актуальным направлением научных исследований и может стать оптимальным решением для достижения необходимой степени очистки нефтесодержащих сточных вод, в частности, на предприятиях железнодорожного транспорта. Блоки адсорбционной очистки, как правило, включают в схему на заключительной стадии обезвреживания промышленных сточных вод, когда из них удалена основная масса загрязняющих веществ. Сорбционная очистка эффективна во всем диапазоне концентрации нефтепродуктов в воде, но более всего ее преимущества сказываются на фоне других методов очистки при низкой концентрации загрязнений [5 – 7].

Процессы сорбции нефтепродуктов на природных и модифицированных цеолитах изучались на модельных растворах с исходной концентрацией органических загрязнителей (мг/л) 27, 64,114 соответственно.

Количественный и качественный состав нефтепродуктов определяли в сточных водах методами инфракрасной спектроскопии (ИКС), газожидкостной хроматографии (ГЖХ) и гравиметрического анализа. Методика проведения экспериментов по адсорбционной очистке сточных вод достаточно апробирована, поэтому изучение процессов сорбции в статических и динамических условиях проводили известными методами.

Изучение способов модификации природных цеолитов проводили с использованием гексаметилдисилазана [(CH3)3Si-]2NH (ГМДС), тетраэтоксисилана (C2H5O)4Si (ТЭОС) и термической обработки.

Адсорбционную способность цеолитсодержащих туфов Холинского месторождения по отношению к нефтепродуктам сравнивали с адсорбционной способностью активированного угля марки БАУ, который широко применяется в качестве адсорбента в системах очистки нефтесодержащих сточных вод (рисунок 1), в частности, в технологическом процессе локомотивного депо ВСЖД. Представленные данные свидетельствуют о том, что максимальная адсорбционная способность для цеолитов наблюдается в течение 20 – 30 мин, а затем она снижается. Для активированного угля адсорбционная способность максимальна в первые 15 мин.

Первым способом модифицирования природных цеолитов в проводимых исследованиях послужила термическая обработка минералов. На полученных термограммах наблюдались два эндотермических эффекта, связанных с потерей адсорбированной (160 – 240 °С) и конституционной воды (400 – 550 °С), при этом терялось до 4,8 % массы. Экзотермический эффект при 800 – 900 °С свидетельствовал о разрушении структуры клиноптилолита.

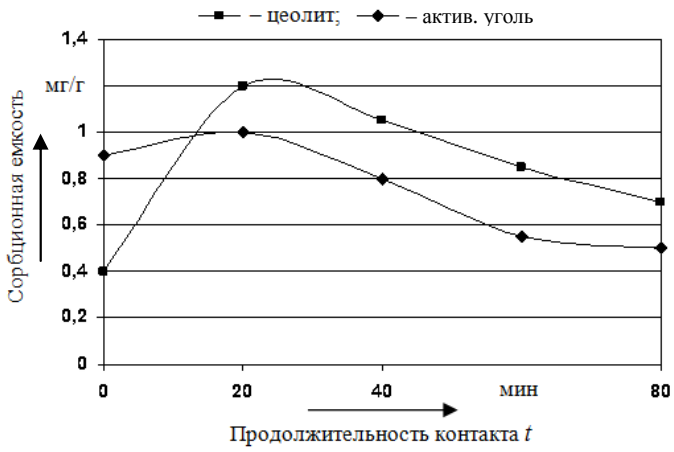


Рисунок 1 – Кривые сорбционной емкости цеолита и активированного угля в зависимости от продолжительности контакта *t* при концентрации нефтепродуктов 27 мг/л

Таким образом, можно предполагать, что с потерей адсорбционной и конституционной воды адсорбционная емкость цеолитсодержащих туфов должна увеличиться. Влияние температуры предварительной обработки на сорбционную емкость цеолита клиноптилолитового типа по отношению к нефтепродуктам, присутствующим в модельных водах, представлено в таблице 2.

Таблица 2 – Влияние температуры предварительной термической обработки природного цеолита на его сорбционную емкость

Температура обработки Т, °С	Сорбционная емкость $А_ц$, мг/г	Температура обработки Т, °С	Сорбционная емкость $А_ц$, мг/г
Исходный материал	0,97	350	1,48
100	1,17	400	1,44
200	1,32	500	1,05
300	1,46	600	0,15

Исследованиями установлено, что сорбционная емкость цеолитсодержащего туфа максимальна при его термической обработке при температуре 350 °С, а при увеличении температуры обработки до 600 °С она снижается (рисунок 2). Вероятно, это связано с удалением при температуре 350 °С воды, координационно-связанной с обменными катионами и кислородным каркасом, а также высвобождением микрокапилляров, что и приводит к увеличению поверхности адсорбции.

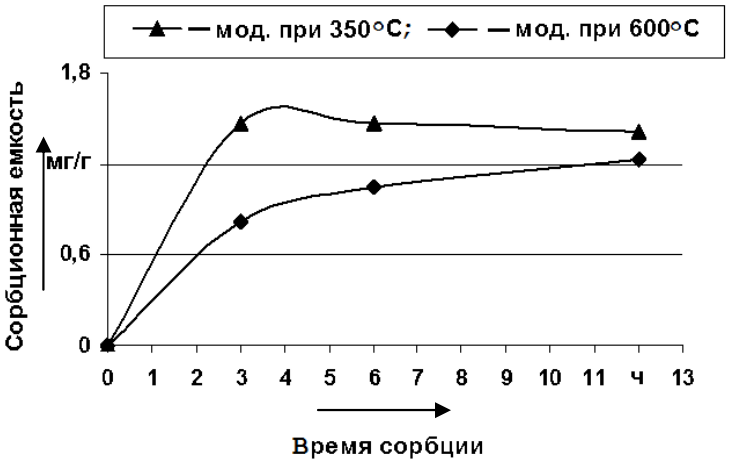


Рисунок 2 – Зависимость сорбции нефтепродуктов с концентрацией 64 мг/л термически модифицированным цеолитом от времени сорбции

При температуре 600 °С и выше протекает процесс конденсации ОН-групп, при этом разрушаются функционально активные центры в структуре клиноптилолита и адсорбционная емкость резко снижается. Поэтому цеолитсодержащий туф, термически модифицированный при температуре 350 °С, может быть рекомендован в качестве сорбента при очистке нефтесодержащих сточных вод в практических условиях [8].

Следующий этап исследований был направлен на изучение возможности химической модификации цеолитов клиноптилолитового типа для получения материалов с более высокой адсорбционной способностью по отношению к нефтепродуктам, чем природные цеолиты. Процесс модифицирования проводили следующим образом: 1 г тетраэтоксисилана растворяли в 100 мл толуола, затем полученный раствор смешивали вручную со 100 г природного цеолита в течение 30 мин, остатки толуола сливали, полученный модифицированный цеолит высушивали в течение 3 сут на открытом воздухе и затем – в течение 6 ч в муфельной печи при температуре 110 ºС. Модификацию цеолита гексаметилдисилазаном производили аналогичным образом.

Строение термически и химически модифицированных цеолитов устанавливалось методом ИК-спектроскопии. ИК-спектры получены при помощи ИК-Фурье спектрометра Vertex70 в Байкальском аналитическом центре коллективного пользования СО РАН. Кроме того, для установления возможного механизма протекающих процессов метод ИК-спектроскопии позволяет выявить наличие функциональных групп на поверхности минералов, которые определяют образование активных центров для адсорбции.

Характеристические полосы поглощения на ИК-спектрах природных Холинских цеолитсодержащих туфов проявляются при волновых числах 610 см-1 и 1220 см-1, что характеризует колебания внешнететраэдрических Si-O-A1-связей. Полосы поглощения основных тетраэдров Al, Si-O4(T-O4) алюмосиликатного каркаса цеолитов находятся в средней области ИК-спектров.

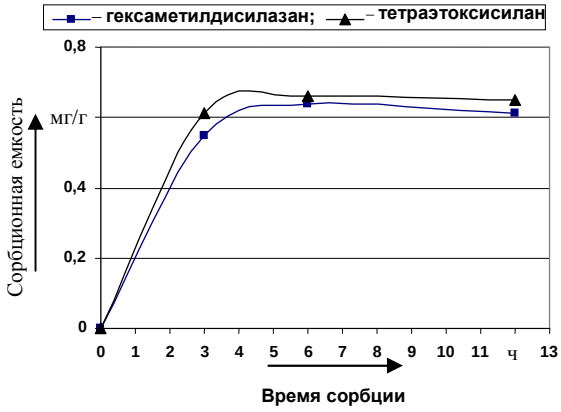
Об изменении структуры природных цеолитов при термической обработке свидетельствовал характер полученных ИК-спектров. Как уже указывалось, сорбционная емкость цеолита максимальна при его предварительном обжиге при температуре 350 °С. У цеолита, модифицированного при 350 °С, в области 3400 см-1 происходит удаление воды, координационно-связанной с обменными катионами и с кислородным каркасом, что и приводит к увеличению его адсорбционной поверхности.

При модификации цеолита высококремнеорганическими соединениями ГМДС – гексаметилдисилазаном [(CH3)3Si-]2NH – и ТЭОС – тетраэтоксисиланом (C2H5O)4Si – происходит гидрофобизация поверхности сорбента и увеличивается его адсорбционная емкость по отношению к нефтепродуктам.

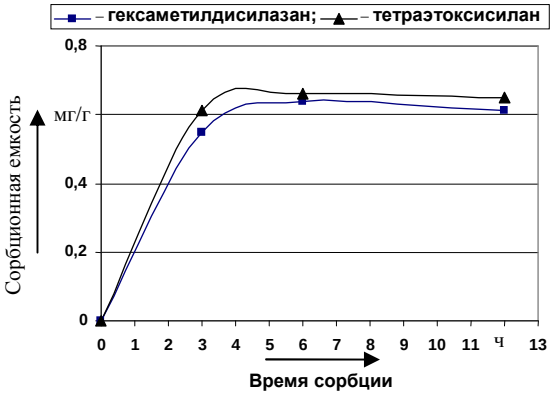
В целях доказательства взаимодействия модификаторов с поверхностью природных цеолитов были сняты ИК-спектры образцов минералов. ИК-спектры немодифицированного природного цеолита характеризуются полосами поглощения при 470 (Si-O), 820 (OH-группы), 1000 – 1200 (Si-O-Si) и 3400 – 3600 (адсорбционная вода) см-1. Фиксация модифицирующих веществ на поверхности природного цеолита характеризуется на ИК-спектрах появлением новых полос поглощения при 3600 – 3700 см-1 (OH-группы из ТЭОС) и 2500 – 2900 см1 (C-H из ГМДС).

При модификации термически обработанного туфа Холинского месторождения ТЭОС достигается максимальная сорбционная активность, что свидетельствует об устойчивой гидрофобизации поверхности. Смещение полосы поглощения внешнететраэдрической Si-O-Al связи 1055,28–1073,69 для цеолита, модифицированного ТЭОС, и 1058,18 – 1077,34 является доказательством сорбции нефтепродуктов на цеолите клиноптилолитового типа. На основе результатов теоретических и эксперименальных исследований по изучению сорбционного извлечения нефтепродуктов из модельных сточных вод модифицированными ТЭОС цеолитами сделано предположение о возможном механизме протекающих процессов. При извлечении нефтепродуктов клиноптилолитом, модифицированным ТЭОС, осуществляется процесс, протекающий по сложному механизму, имеющему следующие стадии: стадию подвода вещества к зерну адсорбента; внешнедиффузионную стадию кинетики массопереноса; стадию перемещения вещества внутри зерна [8].

Изучены зависимости сорбции нефтепродуктов цеолитом, модифицированным ГМДС или ТЭОС, от изменения концентрации исходного раствора (рисунок 3) и от изменения концентрации нефтепродуктов (рисунок 4,а).

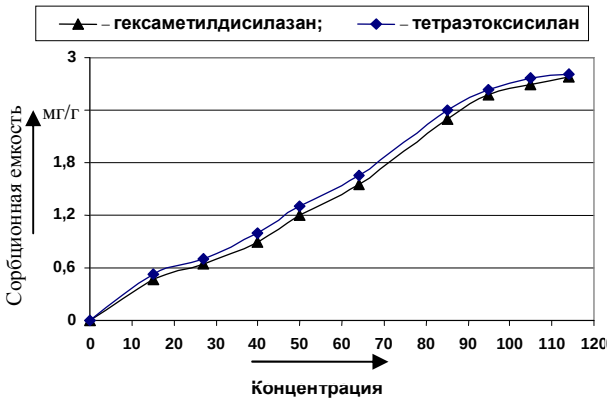


а

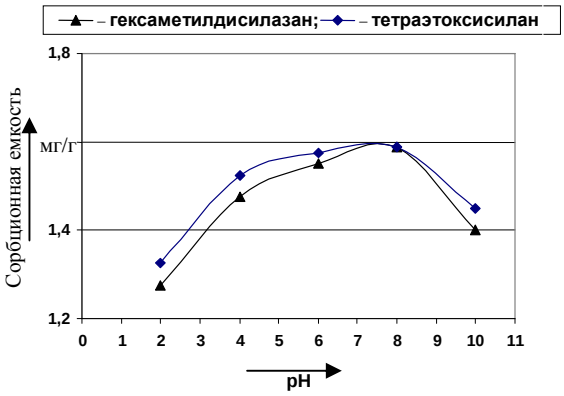


б

Рисунок 3 – Зависимость сорбции нефтепродуктов цеолитом, модифицированным ГМДС и ТЭОС, от времени при концентрации 27 мг/л (а) и 114 (б)



а



б

Рисунок 4 – Изотерма сорбции нефтепродуктов цеолитом, модифицированным ГМДС и ТЭОС, при температуре 20 °С в статических условиях (а) и зависимость сорбции нефтепродуктов природным цеолитом, модифицированным ГМДС и ТЭОС, от изменения величины pH (б)

Экспериментально определено, что модификация ГМДС или ТЭОС способствует возрастанию адсорбционной емкости цеолита по отношению к нефтепродуктам в 1, 2 раза в статических условиях по сравнению с природным цеолитом.

Важными факторами, влияющими на процесс сорбции, являются величина pH (рисунок 4,б) и температура. Экспериментальными исследованиями установлено, что максимальная сорбционная емкость для цеолитов наблюдается в области значений pH = 6 – 8, а при изменении температурного режима – в области значений 22 – 27 °С

Сравнительная характеристика сорбционной емкости (мг/г) цеолитов, термически и химически модифицированных, по отношению к нефтепродуктам, присутствующим в модельных сточных водах в различных концентрациях, представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнительная характеристика сорбционной емкости различных модификаций цеолита

Сорбенты (цеолиты и их модификации)	Концентрация нефтепродуктов в растворе		
	27 мг/л	64 мг/л	114мг/л
Клиноптилолит	0,25 мг/г	0,98 мг/г	2,58 мг/г
Клиноптилолит, термически модифицированный при температуре 350 °С	0,50 мг/г	1,48 мг/г	2,78 мг/г
Клиноптилолит, модифицированный ГМДС	0,64 мг/г	1,55мг/г	2,79 мг/г
Клиноптилолит, модифицированный ТЭОС	0,66 мг/г	1,58 мг/г	2,81 мг/г

Представленные результаты свидетельствуют о том, что максимальной адсорбционной способностью по отношению к нефтепродуктам обладает цеолит, модифицированный ТЭОС, что позволяет рекомендовать его для практического использования в технологии очистки сточных вод в рассматриваемом локомотивном депо.

Для оценки степени применимости результатов исследований в реальных промышленных установках по обезвреживанию сточных вод были изучены процессы сорбции в динамических режимах. Установлено, что динамическая сорбционная емкость (нефтеемкость) модифицированного цеолита смеси фракций 2 и 5 мм составляет 2,2 мг/г, что превышает соответствующие показатели немодифицированного природного цеолита в 1,5 раза.

Необходимым элементом любой технологической схемы адсорбционной очистки сточных вод является регенерация сорбента после насыщения его веществами, извлеченными из сточных вод. Для исследования десорбции нефтепродуктов с насыщенных сорбентов (цеолит Холинского месторождения, модифицированный ГМДС и ТЭОС) в статическом режиме осуществляли их двукратную промывку горячей водой в течение 30 мин при температуре 40, 60 и 80 °С. После температурной обработки цеолиты приобретают рыхлую структуру и полностью восстанавливают свои сорбционные свойства. Оптимальной температурой промывочной воды является 80 °С, при этом степень извлечения нефтепродуктов с насыщенных цеолитов, модифицированных ГМДС и ТЭОС, составляет 90,5 и 92,8 % соответственно. После регенерации сорбент должен быть обработан острым паром для удаления адсорбированной воды и восстановления поверхности. В рассматриваемом локомотивном депо имеются оборудование для промывки сорбента и пропарочная станция для его обработки острым паром. Регенерацию загрузки предлагается проводить 1 раз в 10 дней. Результаты опытно-промышленных испытаний предлагаемого узла доочистки нефтесодержащих сточных вод в локомотивном депо показали возможность снижения затрат электроэнергии на проведение регенерации адсорбентов в 1, 2 раза по сравнению с существующим положением.

Таким образом, проведенные исследования показали, что природные и модифицированные термически при температуре 350 ºС и химически ТЭОС (C2H5O)4Si) клиноптилолиты Холинского месторождения Восточного Забайкалья могут быть использованы в качестве загрузки адсорбционного фильтра для очистки нефтесодержащих сточных вод в локомотивном депо. Внедрение нового узла доочистки в существующую технологическую схему локальных очистных сооружений депо позволит повысить глубину очистки стоков от нефтепродуктов до установленных нормативов и полностью сократить сверхлимитные платежи предприятия за сброс сточных вод, не соответствующих допустимым концентрациям.

Список литературы

1. Афанасьев, О. М. Снижение экологических рисков производственной деятельности предприятий железнодорожного транспорта путем внедрения технологии переработки образующихся жидких нефтесодержащих отходов [Текст] // О. М. Афанасьев, А. В. Панин / Безопасность жизнедеятельности. – 2009. – № 6. – С. 22 – 29.

2. Котов, П. А. Месторождения Забайкалья [Текст] / П. А. Котов. – М.: Геоинформмарк, 1995. – 280 с.

3. Челищев, Н. Ф. Цеолиты – новый тип минерального сырья [Текст] / Н. Ф. Челищев. – М.: Недра, – 1987. – 172 с.

4. Тарасевич, Ю.И. Природные сорбенты в процессах очистки воды [Текст] / Ю. И. Тарасевич. – Киев: Наукова думка, 1989. – 222 с.

5. Герасимова, В. Н. Природные цеолиты как адсорбенты нефтепродуктов [Текст] // В. Н. Герасимова // Химия в интересах устойчивого развития. – 2003. – № 11. – С. 481 – 488.

6. Бордунов, В. В. Очистка воды от нефти и нефтепродуктов [Текст] // В. В. Бордунов, С. В. Бордунов, В. В. Леоненко // Экология и промышленность России. – 2005. – № 8. – С. 24 – 26.

7. Свиридов, А. В. Алюмосиликатные сорбенты в технологиях очистки воды [Текст] // А. В. Свиридов, Е. В. Ганедных, В. А. Елизаров // Экология и промышленность России. – 2009. – № 11. – С. 28 – 30.

8. Обуздина, М. В. Исследование закономерностей сорбционного извлечения органических загрязнителей из промышленных сточных вод цеолитами [Текст] // М. В. Обуздина, Е. А. Руш // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2011. – № 2 (30). – С. 110 – 116.

УДК 621.891:536.12

А. А. Ражковский, Т. Г. Бунькова

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО СООТНОШЕНИЯ ТВЕРДОСТИ В СИСТЕМЕ «КОЛЕСО – РЕЛЬС»

Статья посвящена одной из актуальных проблем – определению рационального соотношения твердости колеса и рельса. Разработана математическая модель процесса изнашивания пары трения «колесо – рельс». Представлены результаты исследований на интенсивность изнашивания колеса и рельса.

Проблеме определения оптимального соотношения твердости в системе «колесо – рельс» уделялось особое внимание еще с момента возникновения железных дорог. Проведенный анализ твердости цельнокатаного колеса и железнодорожного рельса по данным отечественных и зарубежных статей показал, что максимальная твердость колеса в таких странах, как США, Бразилия, Канада (390 НВ), а рельса – в России (401 НВ). Оптимальное соотношение твердости материала колеса и рельса в России минимальное (0,86), а в странах Европы – максимальное (1,1). Из триботехники известно, что лучшую износостойкость в трущейся паре проявляют металлы с примерно одинаковой твердостью [1].

В России на протяжении последних семидесяти лет соотношение твердости колеса и рельса менялось следующим образом: с 1935 по 1955 г. НВк/НВр = 0,93; с 1956 по 1980 г. – 1,1 – 1,05; с 1981 по 2002 г. – 0,85; с 2003 по 2010 г. – 0,86. Если с 1956 по 1980 г. соотношение твердости колеса и рельса составляло 1,03 (прочностные характеристики почти одинаковые), то уже с 2003 по 2010 г. твердость колеса уменьшилась на 14 % по отношению к твердости рельса.

В работах [2, 3] на основе анализа мирового опыта и экспериментальных работ сделан

вывод: повышение твердости колеса на 1 НВ в эксплуатационном интервале твердостей увеличивает его износостойкость на 1 – 2 %. Кроме того, увеличение твердости колес от 250 до 600 НВ практически не влияет на износ и контактную долговечность рельса, а контактно-усталостная долговечность колес возрастает пропорционально квадрату приращения их твердости.

Реальные контактные напряжения обусловлены некруглостью колес и неровностью рельсов, постоянным изменением их профилей и колебаниями скоростей и нагрузок в колесно-рельсовой трибосистеме (КРТ), превосходят предел текучести даже закаленной на мартенсит стали. Все системы качения, в том числе закаленные на высокую твердость, имеют период приработки, в котором происходит пластическое обмятие поверхностей и приближение их формы к форме идеальных тел качения. Возможность приработки резко уменьшается по мере повышения твердости и снижения пластичности, поэтому в сложившихся условиях критическая деформация на твердых сталях накапливается даже быстрее, чем на мягких. Чтобы избежать этого, повышение твердости должно сопровождаться увеличением конформности профилей.

Чем больше различие элементов по твердости, тем медленнее прирабатывается твердый элемент и тем быстрее мягкий элемент выходит из строя. Исходя из требований равнопрочности системы трибоэлементы должны иметь приблизительно одинаковую твердость. Поскольку зоны контактных поверхностей колес и рельсов, воспринимающие боковые и вертикальные усилия, работают в различных условиях, то, как неоднократно указывалось, существенно увеличить срок службы КРТ можно за счет дифференцированной закалки рабочих поверхностей колес и рельсов, реально твердость поверхностей катания можно довести до 400 HV, а боковых поверхностей – до 700 HV.

С целью определения рационального соотношения твердости пары трения «колесо – рельс» были проведены экспериментальные исследования с использованием установки на базе токарно-винторезного станка модели 1К62. В качестве образцов колеса использовались ролики из материала цельнокатаного колеса, а в качестве имитатора рельса – диск, изготовленный из материала рельса Р65. Твердость модели рельса оставалась постоянной и равной 401 НВ, что соответствует верхнему значению твердости рельса по ГОСТ Р51685-2000, а твердость модели колеса варьировалась в пределах 293 – 363 НВ в соответствии с ГОСТ 10791-2004 [4].

Для математического описания процесса изнашивания колеса и рельса был применен симплекс-решетчатый план 3-го порядка. Была составлена матрица планирования с условиями опытов в натуральных переменных. Каждый опыт повторялся три раза, полученные значения результатов усреднялись. При помощи программного комплекса STATISTICA 6.0 были построены контурные кривые поверхности равного отклика износа колеса и рельса. Уравнения регрессии функции отклика y_a и y_b, описывающие величину износа колеса и рельса, имеют вид:

$$\begin{aligned} y_a &= 0,04x_1 + 0,28x_2 + 0,3x_3 + 0,1575x_1x_2 - 0,36x_1x_3 - 0,6975x_2x_3 - \\ &-0,2025x_1x_2(x_1 - x_2) + 1,125x_1x_3(x_1 - x_3) - 0,1575x_2x_3(x_2 - x_3) - 1,26x_1x_2x_3; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} y_b &= 0,01x_1 + 0,09x_2 + 0,07x_3 - 0,045x_1x_2 - 0,099x_1x_3 + 0,2273x_2x_3 - \\ &-0,09x_1x_2(x_1 - x_2) + 0,0945x_1x_3(x_1 - x_3) + 1,5682x_2x_3(x_2 - x_3) - 0,1598x_1x_2x_3, \end{aligned} \quad (2)$$

где x_1, x_2, x_3 – кодированные значения факторов;

y_a, y_b – значение функции отклика.

Для перехода из симплексной системы координат к натуральным значениям факторов используются выражения:

$$HB_к = 293 + 70x_1, \quad (3)$$

где $HB_к$ – твердость материала колеса, ед.;

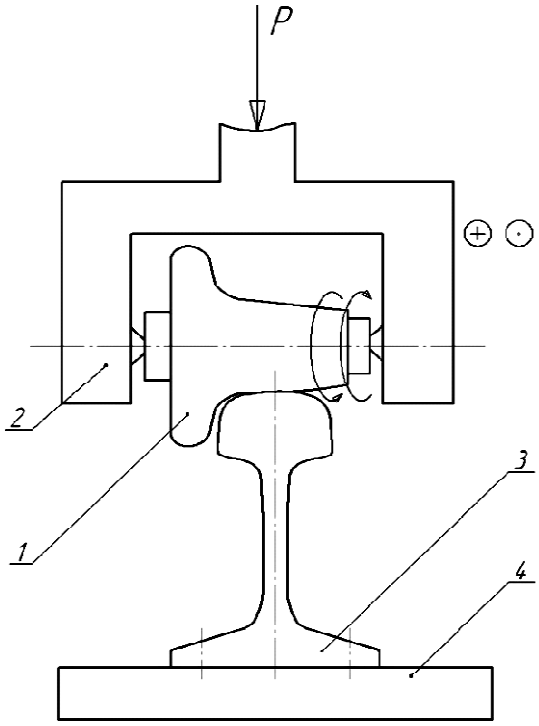
$$P_1 = 420 + 1560x_2, \quad (4)$$

где P_1 – вертикальная нагрузка на колесо, Н;

$$P_2 = 195 + 1384x_3, \quad (5)$$

где P_2 – горизонтальная нагрузка на колесо, Н.

В результате экспериментальных исследований были определены интервалы твердости колеса, при которых имеет место минимальный износ и колеса, и рельса. По линиям равного отклика износа колеса это интервалы от 308,26 до 318,27 НВ и при значении твердости колеса 363 НВ, по линиям равного отклика износа рельса – от 293 до 334,58 и от 349,86 до 363 НВ. Определено оптимальное соотношение твердости колеса и рельса $НВ_к363/НВ_р401$= = 0,91, но для уточнения результатов требуется проведение дополнительных экспериментальных исследований.



гво для имитации процесса колеса по рельсу

В реальных условиях колесо, перемещаясь по рельсу, изменяет свою скорость от нуля до максимума, а затем в условиях торможения – от максимума до нуля. Кроме того, даже при движении по «бархатному пути» имеются стыковые соединения рельсов [5], поэтому для имитации движения колеса по рельсу было спроектировано новое испытательное устройство, на которое был получен патент на полезную модель.

Испытательное устройство создано на базе поперечно-строгального станка модели 735 (рисунок 1). Устройство состоит из модели колеса 1, установленной в центрах вилки 2, закрепленной в приспособлении на суппорте поперечно-строгального станка, и модели рельса 3. Модель колеса изготовлена из колесной стали, профиль которого соответствует профилю катания колеса. Модель рельса выполнена прямолинейной из рельсовой стали, жестко закреплена на столе поперечно-строгального станка при помощи плиты 4. Модель рельса имеет профиль, соответствующий профилю рельса. С целью имитации циклического взаимодействия колеса со стыковым соединением звеньев рельсовой нити на модели рельса выполнен пропил в средней части, параллельный оси вращения модели колеса [6]. Модель колеса имеет возможность нагружения в вертикальном направлении и перемещения вдоль модели рельса [7].

На условия нагружения колеса на рельс был получен патент на полезную модель.

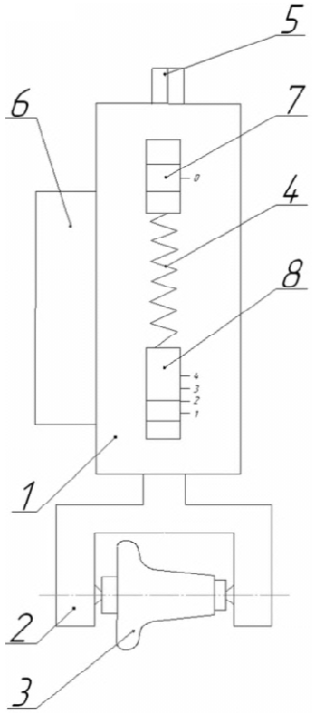


Рисунок 2 – Устройство для имитации процесса нагружения колеса на рельс

Новое испытательное устройство, описывающее условия нагружения колеса на рельс, было создано на базе поперечно-строгального станка модели 735 (рисунок 2), оно крепится в суппорте ползуна поперечно-строгального станка. Устройство состоит из держателя – корпуса 1, внутри него находится вилка 2, в центрах которой закреплена модель колеса 3. Модель колеса изготовлена из колесной стали, профиль которого соот-

ветствует профилю катания колеса. Вилка нагружается тарированной пружиной 4, которая в свою очередь опирается на регулировочный винт 5, располагающихся в верхней части корпуса устройства. Регулировочный винт необходим для создания предварительного натяга пружины перед работой и снятия натяга после испытания на износ пары трения «колесо – рельс». На корпусе располагается полка 6, при помощи которой устройство устанавливается в резцедержателе. Установленное в резцедержателе устройство предварительно нагружается регулировочным винтом до смещения штифта 7 до отметки «0», затем в зависимости от величины нагрузки, приложенной к модели колеса, производится плавный подвод устройства к неподвижной модели рельса. При этом будет происходить смещение разметочного штифта 8, установленного в вилке устройства. Совпадение паза штифта с тарированными значениями на корпусе устройства будет соответствовать приложенной нагрузке. Тарировка нагрузки выполнена в виде цифр, каждая из которых обозначает усилие нажатия, приложенное моделью колеса к модели рельса и выраженное в ньютонах [8].

На созданной установке было проведено экспериментальное исследование с применением некомпозиционного ротатабельного плана второго порядка для рассмотрения износостойкости материала колеса и рельса.

Твердость модели рельса оставалась постоянной и равной 401 НВ, что соответствует верхнему значению твердости рельса по ГОСТ Р51685-2000, а твердость модели колеса варьировалась в пределах 293 – 363 НВ в соответствии с требованиями ГОСТ 10791-2004. Значения скоростей и нагрузок выбирались в соответствии с линейной скоростью вращения колесной пары и нагрузки на ось, действующей в эксплуатации, с учетом поправочных коэффициентов по π-теореме [9]. Исходя из технических возможностей экспериментальной установки максимальное значение нагрузки на ось P_{max} составило 23 т, значение скорости V = 70 км/ч. Поправочный коэффициент для вертикальной нагрузки, действующей на прямых участках пути, $k_{попр}$ = 54,7.

На рисунке 3 указаны номера опытов, а также (в скобках) – уровни факторов в этих опытах, где число центральных точек n0 – более 1. Принимаем n0 = 4, тогда необходимо провести 10 опытов, из которых шесть выполняются на уровне факторов, указанных в вершинах шестиугольника, а четыре опыта – при уровнях факторов, соответствующих центру плана.

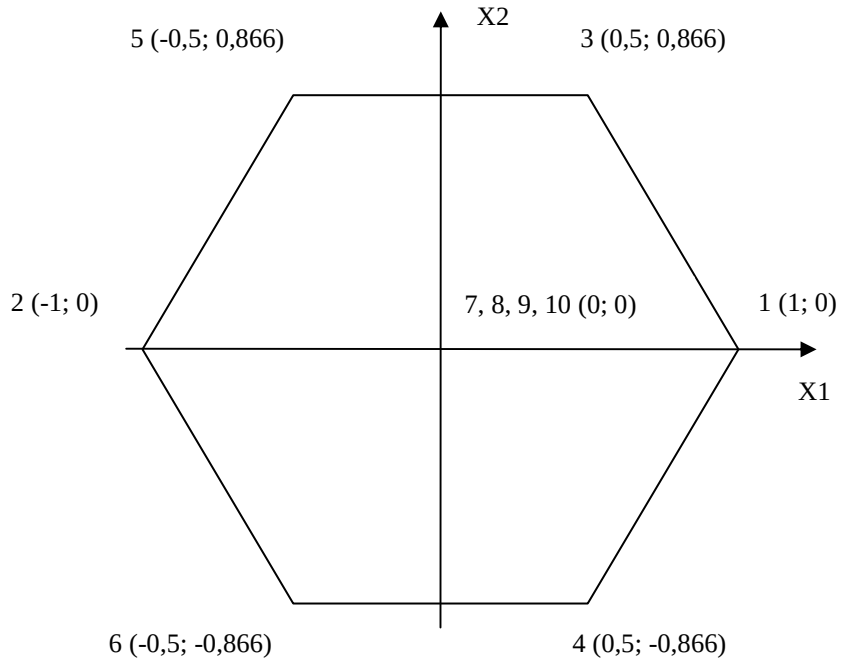


Рисунок 3 – Некомпозиционный ротатабельный план второго порядка (К = 2)

Матрица плана, изображенного на рисунке 3, представлена в таблице. По результатам опытов, выполненных согласно плану, определяются коэффициенты уравнения регрессии.

Уравнение регрессии будет иметь вид:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{12} x_1 x_2, \quad (6)$$

где $b_0, b_1, b_2, b_{11}, b_{22}, b_{12}$ – коэффициенты регрессии;

x_1, x_2 – кодированные значения факторов;

y_a, y_b – значения функции отклика.

Матрица планирования и результаты опытов

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	$x_1 x_2$	x_1^2	x_2^2	$HB_к$	P, Н	y_a, г	y_b, мм
1	+1	+1	0	0	+1	0	363	1200	0,04	0,02
2	+1	-1	0	0	+1	0	293	1200	0,22	0,05
3	+1	0,5	0,866	+0,433	+0,25	+0,75	345	1840	0,31	0,12
4	+1	0,5	-0,866	-0,433	+0,25	+0,75	345	520	0,20	0,08
5	+1	-0,5	0,866	-0,433	+0,25	+0,75	310	1840	0,12	0,05
6	+1	-0,5	-0,866	+0,433	+0,25	+0,75	310	520	0,07	0,03
7	0	0	0	0	0	0	328	1200	0,28	0,09
8	0	0	0	0	0	0	328	1200	0,27	0,08
9	0	0	0	0	0	0	328	1200	0,27	0,08
10	0	0	0	0	0	0	328	1200	0,28	0,09

Контроль потери массы образцов колеса проводился на лабораторных квадрантных весах четвертого класса модели ВЛКТ-500 с точностью измерений 0,01 г. Для точности образцы колес промывались в керосине, высушивались, и только тогда проводилось их взвешивание.

Контроль потери линейного размера образца рельса проводился с помощью поверочной лекальной линейки класса 0 типа ЛТ длиной 200 мм (ЛТ-0-200) по ГОСТ 8026-92 и набора щупов № 2 класса 2 по ГОСТ 882-75.

Были рассчитаны коэффициенты уравнения регрессии и дисперсии коэффициентов регрессии для функции отклика.

Уравнения регрессии, описывающие влияние твердости и нагрузки на износостойкость колеса y_a и рельса y_b, имеют вид:

$$y_a = 0,275 - 0,0067 x_1 + 0,0462 x_2 - 0,145 x_1^2 - 0,085 x_2^2 + 0,346 x_1 x_2; \quad (7)$$

$$y_b = 0,085 + 0,01 x_1 + 0,0173 x_2 - 0,05 x_1^2 - 0,0033 x_2^2 + 0,0115 x_1 x_2. \quad (8)$$

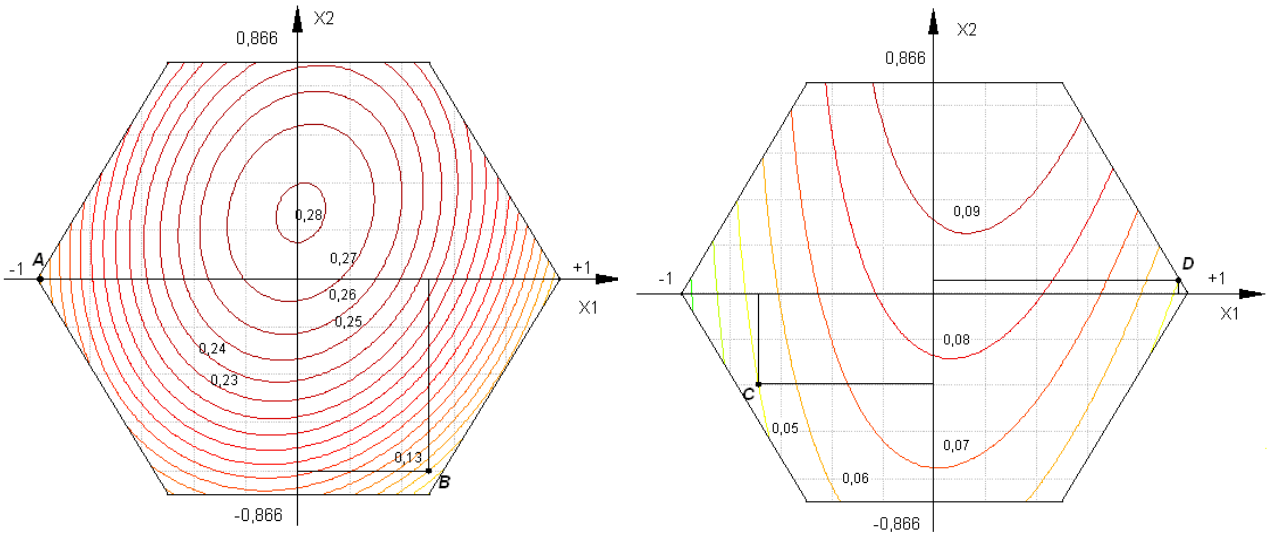
После расчета коэффициентов регрессии следует проверить их статистическую значимость по критерию Стьюдента. Коэффициент регрессии можно считать статистически значимым, если его абсолютное значение равно значению доверительного интервала или превышает его.

В случае уравнения регрессии, описывающего износостойкость рельса, коэффициент b_2 получился меньше доверительного интервала, следовательно, является статистически незначимым коэффициентом.

После вычисления коэффициентов регрессии и проверки их значимости необходимо провести статистический анализ уравнения регрессии. С этой целью проводят проверку гипотезы об адекватности регрессионного уравнения по *F*-критерию Фишера. Гипотеза об адекватности может быть принята, если расчетное значение критерия меньше табличного ($F_р < F_{табл}$). При 5 %-ном уровне значимости табличное значение $F_р$ критерия $F_{табл} = 10,1$.

Поскольку гипотеза об адекватности не отвергается (выполняется условие $F_р < F_{табл}$), уравнения регрессии можно использовать в качестве математической модели для определения износостойкости колеса и рельса.

Для графической интерпретации полученной модели были построены линии равного отклика с помощью программного комплекса STATISTICA 6.0, что значительно упрощает расчет (рисунок 4,а,б).



а б

Рисунок 4 – Линии равного отклика износа колеса (а) и рельса (б)

По линиям равного отклика *y*, которые представлены на рисунке 4, можно перейти от кодированных значений x_1, x_2 к натуральным значениям твердости HB и нагрузки P, используя выражения:

$$HB = 328 + 35x_1; \tag{9}$$

$$P = 1200 + 780x_2. \tag{10}$$

Каждой точке линий равного отклика соответствуют определенное соотношение значений твердости материала колеса и нагрузки, действующей на колесо. Данная математическая модель описывает влияние основных факторов HB и P на интенсивность изнашивания колеса грузового вагона и железнодорожного рельса. Используя линии равного отклика, можно подобрать значения твердости и вертикальной нагрузки, обеспечивающие минимальный износ и колеса, и рельса.

Для примера по линиям равного отклика износа колеса рассмотрим точки A и B, которым соответствует значение износа 0,13 г (см. рисунок 4,а).

Координаты точки A: $x_1 = -0{,}98$; $x_2 = 0$. Подставляя эти значения в выражения (9), (10), получим:

$HB = 328 - 35 \cdot 0{,}98 = 293{,}7$ ед.; $P = 1200 + 780 \cdot 0 = 1200$ Н.

Координаты точки B: $x_1 = 0{,}5$; $x_2 = -0{,}8$.

$HB = 328 + 35 \cdot 0{,}5 = 345{,}5$ ед.; $P = 1200 - 780 \cdot 0{,}8 = 576$ Н.

Разбег значений твердости по потере массы для значений износа 0,13 г по линиям равного отклика значительный – от 340,95 до 363 HB, от 361,6 до 362,3 и при значении твердости материала колеса 293,7 HB.

Рассмотрим точки C и D по линям равного отклика линейного износа рельса, которым соответствует значение 0,05 мм (см. рисунок 4,б).

Точка C: $x_1 = -0{,}68$; $x_2 = -0{,}4$. Подставляя эти значения в уравнения (9), (10), получим:

$HB = 328 - 35 \cdot 0{,}68 = 304{,}2$ ед.; $P = 1200 - 780 \cdot 0{,}4 = 888$ Н.

Координаты точки D: $x_1 = 0{,}96$; $x_2 = 0{,}05$.

$HB = 328 + 35 \cdot 0{,}96 = 353{,}6$ ед.; $P = 1200 + 780 \cdot 0{,}05 = 1239$ Н.

Разбег значений твердости по потере линейного износа для значений 0,05 мм по линиям равного отклика уже не такой значительный и составляет от 353,6 до 358,1 НВ и от 301,05 до 305,6 НВ.

Анализ контурных кривых линий равного отклика (см. рисунок 4,а,б) показал, что получение одинаковых значений износа возможно при различной твердости материала колеса. Снижение интенсивности изнашивания колесной и рельсовой стали достигается при значении твердости колеса 300 – 320 и 350 – 360 НВ. Так как контактно-усталостная долговечность колес возрастает пропорционально квадрату приращения их твердости, и исходя из результатов предыдущего эксперимента можно сделать вывод о том, что оптимальное соотношение твердости колеса и рельса равно 0,91 при значении твердости рельса 401 НВ и значении твердости материала колеса 363 НВ.

Необходимо отметить, что на дорогах Англии, Германии, Франции и многих других стран применяют рельсы более легких типов, с меньшим содержанием углерода, а значит, и с меньшей твердостью. Считается, что чем тверже бандаж, тем меньше истирание его и рельса, но во всех случаях истирание второго больше, чем первого. Комбинация мягкого бандажа с твердым рельсом дает значительно худшие результаты, о чем свидетельствуют исследования инженера К. И. Домбровского в 1962 г., которые доказывают, что минимальный износ бандажей и рельсов достигается при соотношении твердости бандажа и рельса в пределах 1,00 – 1,05. Эксперименты, проведенные кафедрой «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения на Свердловской дороге, подтвердили теоретические выводы К. И. Домбровского.

При проведении исследований в различных депо было выявлено, что износ элементов пары «колесо – рельс» отражает приработочный период, нормальную работу и старение (интенсивный износ). С помощью стратегии ремонтов (переточек) колес попадание их в третий этап – старение, как правило, не допускается. Однако специфика работы колесной пары такова, что при одном фиксированном элементе пары второй – всегда переменный [10].

С целью более детального анализа полученных данных был проведен дополнительный эксперимент для случая прямых участков с постоянной нагрузкой на ось.

Твердость модели рельса оставалась постоянной и равной 401 НВ, что соответствует верхнему пределу твердости рельса по ГОСТ 351685-2000, а твердость модели колеса варьировалась в пределах 293 – 363 НВ в соответствии с ГОСТ 10791-2004. Также в данном эксперименте использовались образцы с твердостью, выходящей за пределы, установленные стандартом, чтобы получить полную картину по износостойкости колеса и рельса. В качестве измеряемого параметра использовалась потеря веса образцов колеса и рельса в зависимости от соотношения их твердости. Соотношению 0,64 соответствует твердость образца серийного колеса 255 НВ; 0,73 – 293 НВ; 0,78 – 311 НВ; 0,83 – 331 НВ; 0,85 – 341 НВ; 0.91 – 363 НВ; 0,97 – 388 НВ и соотношению 1,11 соответствует твердость образца 444 НВ.

Из графика на рисунке 5 видно, что минимальный износ и колеса, и рельса приходится на соотношение от 0,91(НВк363/НВр401) до 0,97(НВк388/НВр401).

С повышением твердости колеса износ колесного и рельсового образцов возрастает до твердости 331 – 341 НВ, что объясняется наличием микрорельефа, изменяющего на макроуровне контактные характеристики образцов колеса и рельса, к которым относятся номинальное давление, номинальная область контакта, зависимость внедрения от приложенной нагрузки, способствующая увеличению износа.

По проведенному экспериментальному исследованию на износ можно сделать вывод о том, что оптимальным соотношением твердости колеса и рельса является значение, близкое к 1, т. е. в пределах от 0,91(НВк363/НВр401) до 0,97(НВк388/НВр401), что соответствует минимальному износу по относительной потере массы образцов. Однако с точки зрения снижения стоимости ремонта колеса наиболее приемлемым является соотношение от 0,78 (НВк311/НВр401) до 0,8(НВк320/НВр401), так как подобные значения твердости колесной стали не вызывают трудности при механической обработке.

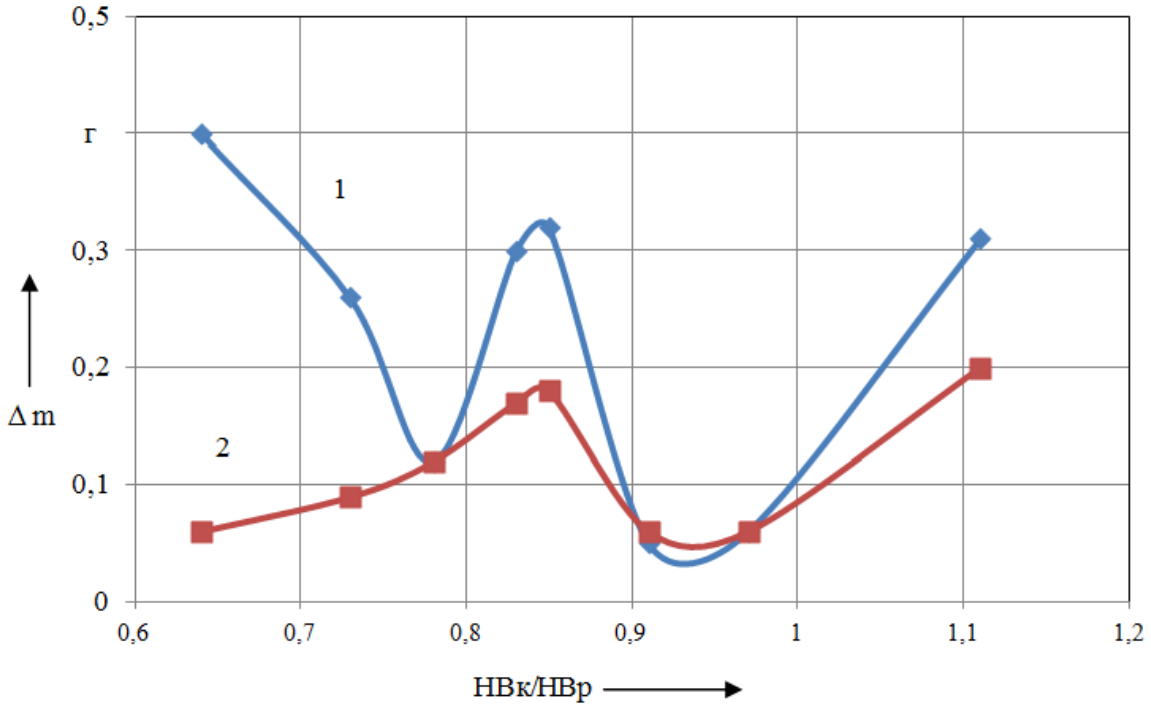


Рисунок 5 – Износ по потере массы колесных (1) и рельсовых (2) образцов в зависимости от соотношения их твердости

В связи с тем, что авторы не получили однозначного решения проблемы повышенной интенсивности изнашивания цельнокатаных колес и железнодорожных рельсов, требуются дальнейшие исследования по выбору рационального соотношения их твердости, в котором может быть достигнуто оптимальное соотношение механических свойств колесной и рельсовой стали.

Список литературы

1. Бунькова, Т. Г. Об оптимальном соотношении твердости цельнокатаного колеса грузового вагона и железнодорожного рельса [Текст] / Т. Г. Бунькова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2011. – № 1. – С. 86 – 90.

2. Марков, Д. П. Повышение твердости колес подвижного состава (предпосылки и перспективы) [Текст] / Д. П. Марков // Вестник ВНИИЖТа. – 1995. – № 3. – С. 10 – 17.

3. Марков, Д. П. Закалка гребней колес подвижного состава на высокую твердость для снижения бокового износа [Текст] / Д. П. Марков // Вестник ВНИИЖТа. – 1997. – № 1. – С. 45 – 51.

4. Бунькова, Т. Г. К вопросу о влиянии соотношения твердостей колеса и рельса на их износостойкость [Текст] / Т. Г. Бунькова // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава: Материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2011. – С. 286 – 290.

5. 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. – С. 107 – 112.

6. Нехаев, В. А. Исследование движения необрессоренных масс по пути со случайной геометрической неровностью рельса [Текст] / В. А. Нехаев, В. А. Николаев, А. Н. Смалев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – № 2. – С. 106 – 113.

7. Пат. 110485 Российская Федерация, МПК G 01 M 17/10 (17/00). Устройство для имитации процесса движения колеса по рельсу [Текст] / А. А. Ражковский, А. Г. Петракова, Т. Г. Бунькова (Россия). – № 2011125268/11; Заявлено 20.06.2011; Опубл. 20.11.2011. Бюл. № 32. – 2 с.

8. Пат. 113839 Российская Федерация, МПК G 01 M 17/10. Устройство для имитации процесса нагружения колеса на рельс [Текст] / А. А. Ражковский, А. Г. Петракова, Т. Г. Бунькова (Россия). – № 2011131543/11; Заявлено 27.07.2011; Опубл. 27.02.2012. Бюл. № 6. – 2 с.

9. Шилер, В. В. Исследование динамических свойств колесной пары с гибкими независимо вращающимися бандажами [Текст] / В. В. Шилер, П. А. Шипилов, А. В. Шилер // Известия Транссиба/ Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2011. – № 4. – С. 69 – 75.

10. Буйносов, А. П. Универсальная модель оценки износа бандажей колесных пар локомотивов [Текст] / А. П. Буйносов, В. А. Тихонов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2012. – № 2. – С. 16 – 23.

УДК 621.313.2

В. В. Харламов, П. К. Шкодун, Д. А. Ахунов, А. С. Хлопцов

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПРОФИЛЯ КОЛЛЕКТОРА ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ПРИБОРА ПКП-4М

Статья посвящена разработке программного обеспечения для анализа и преобразования данных, полученных при исследовании поверхности коллектора тяговых электродвигателей с помощью прибора контроля профиля коллектора ПКП-4М. Применение данного компьютерного приложения в процессе обработки экспериментальных данных позволит повысить достоверность контроля профиля коллектора, а также рассчитать основные диагностические параметры, характеризующие влияние профиля на процесс коммутации.

Состояние коммутации тяговых электродвигателей (ТЭДов) подвижного состава является одним из определяющих факторов, характеризующих надежность работы коллекторно-щеточного узла и электрической машины в целом. Факторы, оказывающие влияние на процесс коммутации в ТЭДе, принято разделять на электромагнитные и механические. Совместное влияние факторов различной природы приводит к неидентичности коммутационных циклов, в результате чего процесс коммутации становится в некоторой степени случайным [1]. В работах ведущих специалистов в области коммутации доказано, что неидентичность коммутационных циклов, обусловленная причинами механической природы, не только не равномерна по коллектору, но и значительно изменяется во времени [2]. Даже при обеспечении необходимых электромагнитных условий коммутации нарушение надлежащего состояния коллектора и щеточного аппарата может привести к появлению интенсивного искрения щеток [3]. Поэтому совершенствование методов анализа влияния механических факторов на процесс коммутации в ТЭДе является одной из первостепенных задач.

Одним из важнейших факторов механической природы, влияющих на процесс коммутации в машинах постоянного тока, является состояние профиля коллектора [4].

В настоящее время при исследовании микрогеометрии коллектора ТЭДа наибольшее применение получил бесконтактный вихретоковый метод. Данный метод нашел свое применение в приборе ПКП-4М, разработанном на кафедре «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПСа, осуществляющем регистрацию состояния поверхности коллектора как в статическом, так и в динамическом режимах [5]. Высокая чувствительность и быстродействие, а также независимость результатов измерений от электрофизических свойств контролируемой поверхности позволяют использовать данный прибор при проведении приемосдаточных испытаний ТЭДов в локомотивных депо. Функциональная схема прибора приведена на рисунке 1.

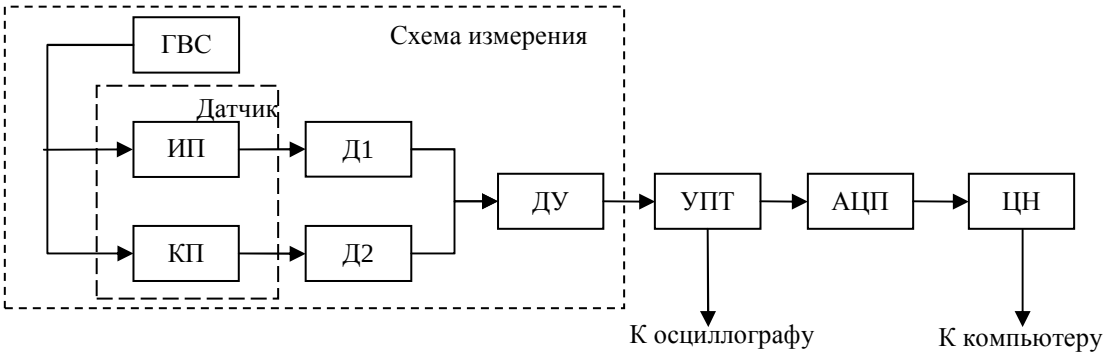


Рисунок 1 – Функциональная схема прибора ПКП-4М:
ГВС – генератор высокочастотного сигнала; ИП – измерительный преобразователь; КП – компенсационный преобразователь; Д1, Д2 – детекторы; ДУ – дифференциальный усилитель; УПТ – усилитель постоянного тока; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ЦН – цифровой накопитель

Существенный недостаток процесса преобразования исходного аналогового сигнала, поступающего от схемы измерения прибора ПКП-4М, был выявлен при обработке экспериментальных данных, полученных при контроле профиля коллектора тяговых электродвигателей ТЛ-2К1 в локомотивном депо.

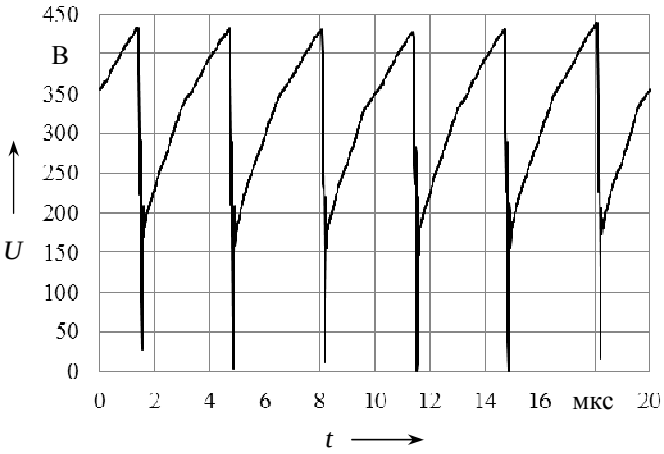


Рисунок 2 – Форма питающего напряжения

При проведении приемосдаточных испытаний напряжение питания на тяговый электродвигатель (рисунок 2) подается от выпрямительных тиристорных преобразователей, наличие которых может стать причиной появления импульсных помех в сигнале прибора ПКП-4М.

Аналоговый сигнал от схемы измерения прибора ПКП-4М представляет собой последовательность импульсов колоколообразной формы, частота следования которых определяется частотой вращения якоря исследуемой машины. При питании ТЭДа от тиристорного преобразователя этот сигнал может быть искажен импульсными помехами, частота которых зависит от частоты питающей сети преобразователя. Так как при определении профиля коллектора интерес представляет не форма сигнала, а его амплитудное значение, то в случае совпадения импульса помехи с вершиной импульса полезного сигнала (рисунок 3) возникает опасность ошибочного принятия величины выброса в качестве максимального значения коллекторной пластины. Это в конечном счете может привести к появлению значительной погрешности при оценке профиля коллектора исследуемого ТЭДа [6].

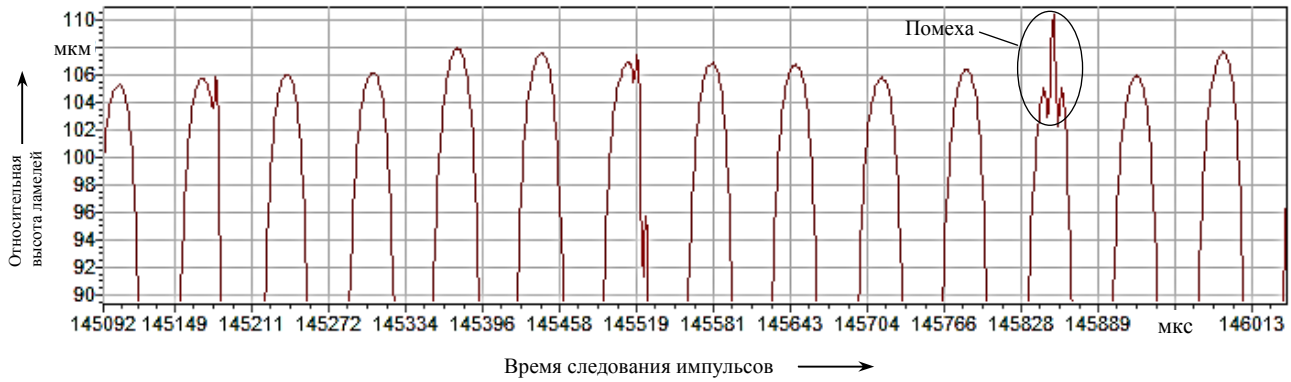


Рисунок 3 – Фрагмент профиля коллектора тягового электродвигателя

Для исключения этой погрешности исходные данные, полученные от схемы измерения, после аналого-цифрового преобразования предлагается подвергать медианной фильтрации. Основными преимуществами медианных фильтров перед линейными фильтрами низких частот является способность сохранять резкие перепады дискретной последовательности данных, а также эффективность при сглаживании импульсного шума.

Медианная фильтрация осуществляется посредством движения некоторого окна (апертуры) вдоль массива исходных данных и замены значения в центре апертуры медианой исходных значений отчетов внутри апертуры. Выходной сигнал y_k скользящего медианного фильтра шириной $2n+1$ для текущего отчета k формируется из входного переменного ряда $\ldots, x_{k-1}, x_k, x_{k+1}, \ldots$ в соответствии с формулой из работы [7]:

$$y_k = \mathrm{med}\left(x_{k-n}, x_{k-n+1}, \ldots, x_{k-1}, x_k, x_{k+1}, \ldots, x_{k+n-1}, x_{k+n}\right), \quad (1)$$

где $\mathrm{med}(x_1, \ldots, x_m, \ldots, x_{2n+1}) = x_{n+1}$,

x_m – элементы вариационного ряда, т. е. ранжированные в порядке возрастания значения x_m;

$x_1 = \min\left(x_1, x_2, \ldots, x_{2n+1}\right) \le x_2 \le x_3 \le \ldots \le x_{2n+1} = \max\left(x_1, x_2, \ldots, x_{2n+1}\right)$.

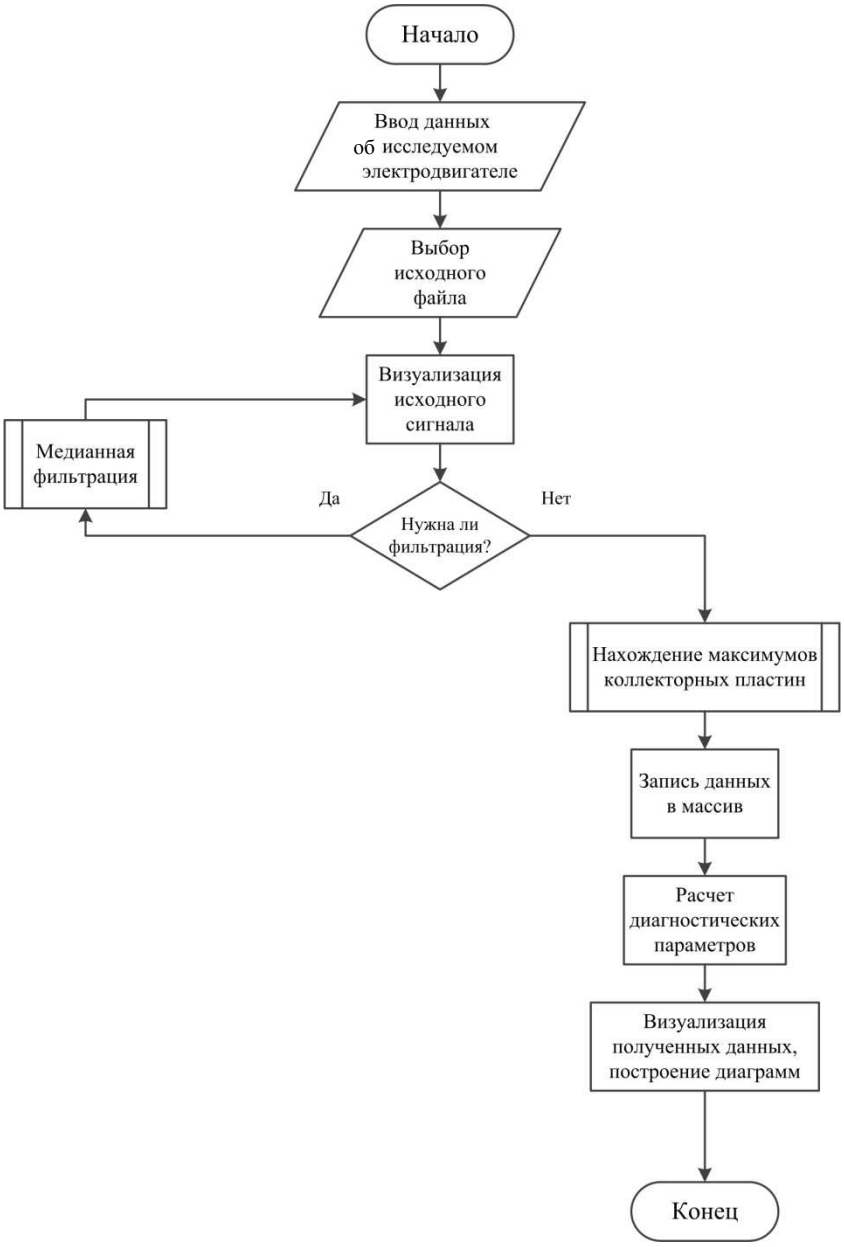


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма работы приложения

Для повышения помехоустойчивости контроля профиля коллектора разработан алгоритм (рисунок 4) и компьютерное приложение для обработки экспериментальных данных, полученных после непрерывного аналого-цифрового преобразования сигнала с выхода измерительной схемы прибора. Данный алгоритм предусматривает выполнение двух функций: реализацию медианной фильтрации исходного аналогового сигнала, полученного от схемы измерения прибора ПКП-4М, и поиск максимальных значений сигнала после фильтрации для определения профиля коллектора. Разработка оригинального программного продукта осущест-влялась в среде Borland C++ Builder v6.

Работа программы начинается с ввода исходных данных об исследуемом электродвигателе, чтения исходного файла, содержащего массив чисел, пропорциональных аналоговому амплитудно-модулированному сигналу, полученному от измерительной схемы прибора ПКП-4М. После преобразования единиц измерения (милливольт в микрометры) с учетом чувствительности измерительного канала 10 мВ/мкм производится анализ исходных данных.

После графического представления сигнала профиля коллектора (рисунок 5) принимается решение о целесообразности использования медианного фильтра.

Важнейшей задачей при работе с медианными фильтрами является определение величины апертуры фильтра *A*, так как от значения этого параметра зависит не только величина нежелательной импульсной помехи, но и амплитуда импульсов от коллекторных пластин. На рисунке 5 представлено окно компьютерного приложения *PKP Median Soft* при осуществлении фильтрации сигнала профиля коллектора ТЭД ЭД-106. В верхней части окна представлен исходный сигнал после аналого-цифрового преобразования, имеющий в своем составе значительные импульсные помехи, величина которых может в несколько раз превышать величину перепада между соседними коллекторными пластинами. В нижней части окна представлен этот же сигнал, но после обработки медианным фильтром с величиной апертуры $A = 9$.

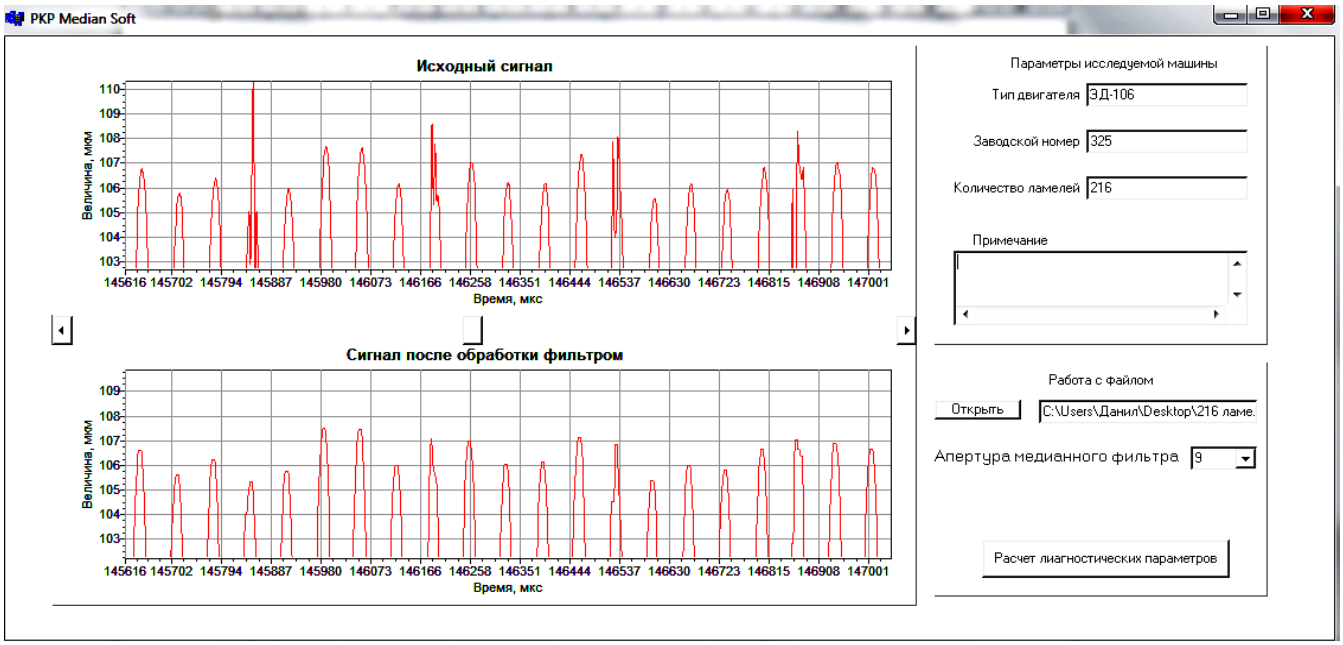


Рисунок 5 – Вид окна анализа исходных данных профиля ТЭД ЭД-106 приложения *PKP Median Soft*

После осуществления фильтрации переходим к нахождению локальных максимумов сигнала, подверженного фильтрации, т. е. к определению профиля коллектора исследуемой машины, а также к расчету диагностических параметров, характеризующих влияние профиля коллектора на коммутацию электрической машины.

Известен ряд параметров, по величине которых принято оценивать степень влияния микрорельефа поверхности коллектора на состояние коммутации диагностируемых ТЭД [5]:

– биение поверхности коллектора $\Delta\eta$;

– среднее квадратическое отклонение высот коллекторных пластин σ_η;
– максимальная величина перепада соседних коллекторных пластин Δh_{max};
– среднее квадратическое отклонение перепадов $\sigma_{\Delta h}$;
– минимальное значение второй производной функции профиля коллектора $\ddot{\eta}_{min}$.

Величина биения поверхности коллектора $\Delta\eta$ определяется как разность между максимально выступающей и максимально западающей коллекторными пластинами. Профиль, в свою очередь, представляет собой совокупность относительных высот коллекторных пластин:

$$\eta_j = y_j - \frac{1}{K}\sum_{j=1}^{K} y_j, \tag{2}$$

где j – порядковый номер ламели; y_j – расстояние от j-й пластины до произвольно выбранной базы измерения; K – количество коллекторных пластин.

При определении величины максимального перепада между соседними ламелями учтена погрешность ε_j, вносимая в результаты непосредственного измерения эксцентриситетом и овальностью поверхности коллектора [5]:

$$\varepsilon_j = 2\sum_{\nu=1}^{2} A_\nu \sin\frac{\pi\nu}{K}\cos\left[\frac{\pi\nu(2j-1)}{K}+\varphi_\nu\right], \tag{3}$$

где ν – номер гармоники; A_ν, ϕ_ν – амплитуда и фаза ν-й гармоники.

С учетом выражения (3) расчет истинного значения перепадов осуществляется по формуле:

$$\Delta h = \Delta h_j^* - \varepsilon_j, \tag{4}$$

где Δh_j^* – значения перепадов между соседними коллекторными пластинами, определенные по профилограмме.

По полученной профилограмме осуществляется также приближенное представление функции профиля коллектора $\eta(x)$, заданной на промежутке $0 \le x < K$ в дискретной системе точек x_k, тригонометрическим многочленом вида [8]:

$$\eta(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{\nu=0}^{n-1}\left(a_\nu \cos\left(2\pi\frac{\nu x}{N}\right) + b_\nu \sin\left(2\pi\frac{\nu x}{N}\right)\right) + \frac{a_n}{2}\cos\left(\frac{2\pi n x}{N}\right), \tag{5}$$

где $\frac{a_0}{2}$ – постоянная составляющая; $n = \frac{K+1}{2}$.

$$a_\nu = \frac{2}{K}\sum_{j=0}^{K-1}\eta_j \cos\left(2\pi\frac{j\nu}{K}\right); \tag{6}$$

$$b_\nu = \frac{2}{K}\sum_{j=1}^{K-1}\eta_j \sin\left(2\pi\frac{j\nu}{K}\right); \tag{7}$$

$$a_n = \frac{2}{K}\sum_{j=0}^{K-1}\eta_j \cos\left(2\pi\frac{jn}{K}\right). \tag{8}$$

Разложение профиля коллектора по тригонометрическим функциям согласно выражению (5) позволило произвести гармонический анализ. По данным гармонического анализа произведен расчет значений $\ddot{\eta}_j$:

$$\ddot{\eta}(x) = -\frac{4\pi^2}{K^2}\sum_{\nu=0}^{n-1}\left(a_\nu \nu^2 \cos\left(2\pi\frac{\nu x}{K}\right) + b_\nu \nu^2 \sin\left(2\pi\frac{\nu x}{K}\right)\right) - \frac{2a_n\pi^2 n^2}{K^2}\cos\left(\frac{2\pi n x}{K}\right). \quad (9)$$

На рисунке 6 представлен вид окна компьютерного приложения PKP Median Soft, в котором сверху в виде ступенчатой диаграммы показан профиль коллектора тяговой электрической машины ЭД-106. Для снижения влияния вибрации на результат измерения произведено усреднение максимальных значений для каждой ламели по числу оборотов якоря электрической машины за время сбора исходных данных. В этой же системе координат отображен график изменения второй производной функции профиля коллектора по всей длине окружности коллектора. В нижней части окна отображен амплитудный спектр функции профиля коллектора.

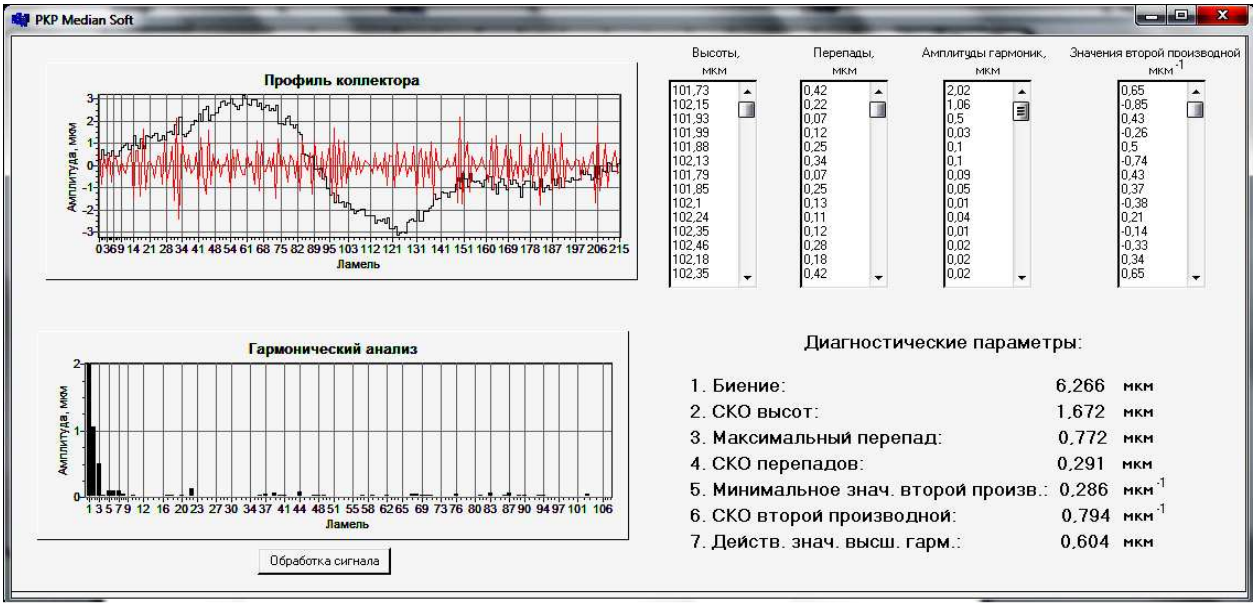


Рисунок 6 – Вид окна расчета диагностических параметров ТЭД ЭД-106 приложения *PKP Median Soft*

В представленном окне (см. рисунок 6) по формулам (2) – (9) производится расчет диагностических параметров профиля коллектора исследуемого ТЭДа.

Предложенный метод непрерывного аналого-цифрового преобразования сигнала измерительного тракта прибора ПКП-4М с последующей программной обработкой данных в приложении *PKP Median Soft* позволяет повысить достоверность контроля профиля коллектора тяговых электродвигателей в процессе проведения приемосдаточных испытаний путем повышения помехоустойчивости метода анализа профиля при питании исследуемого электродвигателя от тиристорного преобразователя. Кроме того, разработанное программное приложение позволяет рассчитать важнейшие диагностические параметры, характеризующие степень влияния профиля коллектора на процесс коммутации электрической машины.

Список литературы

1. 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).

2. Авилов, В. Д. Методика нормирования качества коммутации в тяговых электрических машинах [Текст] / В. Д. Авилов, Ш. К. Исмаилов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2012. – № 2 (10).

3. Авилов, В. Д. Решение проблемы оптимизации коммутационного процесса в электрических машинах постоянного тока [Текст] / В. Д. Авилов, Ш. К. Исмаилов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2012. – № 4 (12).

4. Петроченко, С. В. Восстановление работоспособности тяговых электродвигателей путем совершенствования технологической операции обработки рабочей поверхности коллекторов [Текст] / С. В. Петроченко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – № 1 (1).

5. Харламов, В. В. Методы и средства диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей и других коллекторных машин постоянного тока [Текст] / В. В. Харламов / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2002. – 233 с.

6. Ахунов, Д. А. Повышение достоверности контроля профиля коллектора электрических машин вихретоковым методом [Текст] / Д. А. Ахунов // Омский научный вестник / Омский гос. техн. ун-т. – Омск, 2012. – № 3 (113).

7. Тутубалин, В. Н. Теория вероятностей и случайных процессов [Текст] / В. Н. Тутубалин / МГУ. – М., 1992. – 400 с.

8. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов [Текст] / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М.: Наука, 1986. – 544 с.

УДК 331.33

В. Д. Авилов, Е. А. Третьяков, А. В. Краузе

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ НЕТЯГОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Несмотря на существенный прогресс в развитии систем учет, наблюдаются практически повсеместный рост отчетных потерь электроэнергии и снижение ее качества. Наряду с внедрением современного энергоэффективного электрооборудования проблему повышения эффективности использования электрической энергии в стационарной энергетике можно решить за счет внедрения активно-адаптивных технологий управления работой компенсирующих устройств, управляемых средств регулирования напряжений, коммутационного и силового оборудования и их диагностирования на основе цифровых технологий, в том числе для автоматического поддержания минимума потерь в сетях при изменении нагрузок. Предлагается система управления объектами электроснабжения нетяговых потребителей на базе адаптивных технологий и аппаратно-программного комплекса оптимизации параметров режима в реальном времени.

В последние годы актуализировались задачи повышения энергетической эффективности объектов ОАО «РЖД»: приняты «Энергетическая стратегия ОАО «РЖД» на период до 2010 года и на перспективу до 2030 года», «Стратегия инновационного развития ОАО «РЖД» на период до 2015 г. («Белая книга»)», определяющие основной вектор развития железнодорожной отрасли.

Применительно к распределительным сетям железнодорожного транспорта повышение эффективности использования электрической энергии связано со снижением потерь и повышением ее качества [1]. Современные технологии и технические решения также должны быть направлены на повышение эксплуатационных показателей надежности электроснабжения, качества электроэнергии (КЭ), внедрение силовых трансформаторов и другого энергоэкономичного оборудования с улучшенными характеристиками.

В соответствии с общепринятыми подходами [2] создание системы управления КЭ предусматривает выполнение ряда требований: формирование структуры управления КЭ; правовое регулирование отношений в части обеспечения КЭ; разработка технических мероприятий на этапе проектирования и ввода в эксплуатацию нового присоединения; разработка методических требований; организационные задачи; контроль КЭ; договоры.

При этом под управлением КЭ понимается система методических, технических и организационных мероприятий, направленных на обеспечение электромагнитной совместимости в электрических сетях [3].

Однако обеспечение КЭ в указанном смысле не может являться его управлением, предполагающим наличие обратной связи для корректирующего воздействия на КЭ с целью достижения заданных значений (показателей) КЭ.

В настоящее время техническая оснащенность распределительных сетей нетяговых потребителей не позволяет в полной мере осуществлять управление качеством электроэнергии, ограничиваясь функциями ручных переключений уровня напряжений с помощью распределительных трансформаторов, батарей статических конденсаторов и т. п.

Для повышения энергоэффективности передачи и распределения электроэнергии за счет снижения потерь в распределительных сетях нетяговых потребителей требуется внедрять адаптивные методы управления работой компенсирующих устройств, управляемых средств регулирования напряжений, коммутационного и силового оборудования и их диагностирования на основе цифровых технологий, в том числе для автоматического поддержания минимума потерь в сетях при изменении нагрузок. Подобные системы электроснабжения в более узком смысле в виде smart grid успешно реализуются за рубежом [4, 5]. Отличительной особенностью активно-адаптивных технологий в распределительных сетях (smart grid) является наличие большого количества измерительной аппаратуры для оценки состояния параметров сети и выработки решений по его изменению в различных режимах работы. Подход к построению электрических сетей на базе smart grid базируется на возможности использования распределенной генерации, наблюдаемости сети, создания системы онлайн-мониторинга и интеллектуальной диагностики состояния оборудования, повышения надежности и качества электроснабжения (без управления объектами).

Предпосылками создания системы управления объектами электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта на базе адаптивных технологий и аппаратно-программного комплекса оптимизации параметров режима в реальном времени являются следующие актуальные проблемы:

1) Проблема согласования системы электроснабжения распределительных сетей с источниками распределенной генерации. Существующие распределительные сети выполнены в виде иерархических структур от источника к нагрузке, поэтому общепринятые законы регулирования напряжения в таких сетях при наличии источников генерации на стороне среднего напряжения оказываются непригодными. Наличие источников генерации (в том числе накопителей энергии в активном режиме) приведет к уравнительным токам и дополнительным потерям, существенно меняется идеология построения релейной защиты. Требуется управление объектами электроснабжения на основе реализации алгоритмов оптимизации параметров режима в реальном времени.

2) Проблема разработки методов и алгоритмов обоснования внедрения передовых энергосберегающих средств и технологий повышения надежности, качества электроэнергии и снижения потерь. Определение оптимальных мест размещения, типов и параметров компенсирующих устройств в электрических сетях [6, 7], выбор оптимального состава (нерегулируемые батареи статических конденсаторов, ступенчато-регулируемые компенсирующие устройства (КУ), статические тиристорные компенсирующие устройства и др.), параметров, законов регулирования КУ для получения требуемых характеристик установившихся режимов по реактивной мощности, отклонениям, несимметрии и колебаниям напряжения при минимальных затратах, выбор и расчет параметров технических средств по компенсации искажений синусоидальности кривой напряжения, корректировка схемных решений для повышения надежности электроснабжения, моделирование − вот лишь краткий круг вопросов, который необходимо проработать для повышения энергоэффективности систем электроснабжения нетяговых потребителей. Процесс выбора технических средств регулирования реактивной мощности, напряжения, современных силовых электроустановок при их модер-

низации должен сопровождаться обширными экспериментальными исследованиями с помощью цифровых средств измерений и диагностирования.

3) Проблема оптимального управления режимами напряжений в точках распределительных сетей, параметрами режима по реактивной мощности в реальном времени, управления электропотреблением для снижения потерь в сетях, повышения качества электроэнергии и повышения надежности электроснабжения. Речь идет о развитии оперативно-технологического управления сетями и энергообъектами 35 кВ и ниже на основе аппаратно-программного комплекса, которое в ближайшем будущем без существенных доработок может быть интегрировано в цифровую систему управления электропотреблением и качеством электроэнергии, а в настоящее время должно обеспечивать снижение потерь и повышение надежности электроснабжения нетяговых потребителей. Предлагается разработать систему управления объектами электроснабжения нетяговых потребителей на базе адаптивных технологий и аппаратно-программного комплекса оптимизации параметров режима в реальном времени.

Представленная работа базируется на широком применении проведенных авторами исследований: разработанных методик оценки влияния состава электрооборудования на синусоидальность питающих напряжений, определения оптимальных мест размещения компенсирующих устройств, алгоритмов оптимизации их состава и параметров.

В настоящее время на сети железных дорог практически завершены работы по внедрению современных систем учета электроэнергии АСКУЭ (Smart Metering), данные с которых пока используются не в полной мере (как правило, для ежемесячных балансов и оплаты счетов за потребленную энергию). Реализация технологий smart grid также не позволит осуществлять управление качеством электроэнергии и потерями в распределительных сетях крупных железнодорожных узлов, так как в основном они направлены на энергосбытовую деятельность, взаимодействие на уровне «поставщик – потребитель».

В настоящее время техническая оснащенность распределительных сетей нетяговых потребителей не позволяет в полной мере осуществлять управление качеством электроэнергии, ограничиваясь функциями ручных переключений уровня напряжений с помощью распределительных трансформаторов, батарей статических конденсаторов и т. п.

Требования к оборудованию. Объекты управления требуется оснастить контроллерами и исполнительными механизмами (приводами) для воздействия на активные элементы сети (выключатели, устройства автоматического включения резерва, секционирующие пункты, переключатели регулирования напряжения под нагрузкой трансформаторов, вольтодобавочные трансформаторы, конденсаторные установки) с целью изменения ее топологических параметров и воздействия на смежные энергетические объекты по заранее рассчитанным сценариям.

Требования к аппаратно-программному комплексу. Существующие специализированные программно-вычислительные комплексы, ориентированные на расчеты, как правило, электрических сетей высокого напряжения для задач анализа и прогнозирования, оперативно-диспетчерского управления (RastrWin, DAKAR, АНАРЭС-2000, Energy CS, PSS/E и др.), не позволяют определять типы, параметры технических средств и место их установки, предлагать другие энергоэффективные решения для повышения энергоэффективности электрических сетей.

Предлагается доработать (разработчиками) программные средства расчета и анализа электрических режимов электрических сетей для решения следующих задач:

расчет параметров режима в реальном времени (в настоящее время отсутствует возможность даже динамического анализа) на основе данных информационно-измерительных систем (АСКУЭ, датчики положения анцапф трансформаторов, коммутационного оборудования и т.п.);

определение оптимальных мест размещения, типов и параметров КУ, их законов регулирования; выбор и расчет параметров других технических средств; корректировка схемных решений для повышения надежности электроснабжения с точки зрения технико-экономической эффективности;

возможность выработки управляющих воздействий в автоматическом режиме в реальном времени на объекты электроснабжения с высоким быстродействием (по данным синхронизированных измерений и расчетов) для минимизации потерь в сетях и управления электропотреблением;

возможность оптимизация режима при наличии в сети СН I и ниже источников распределенной генерации электрической энергии.

Связь между объектами электроснабжения распределительной сети и диспетчерским пунктом должна осуществляться с использованием стандартных устройств и протоколов. В качестве инструмента для создания систем сбора, обработки и представления информации в графическом виде должны применяться инструментальные оболочки, соответствующие стандартам международной электротехнической комиссии (МЭК). Установленные на железнодорожном транспорте системы АСКУЭ отвечают предъявляемым требованиям.

Программно-вычислительный комплекс должен содержать полную топологию электрической сети, объекты управления (компенсирующие устройства, трансформаторы, коммутационные аппараты и др.) с указанием параметров режима по данным информационно-измерительной системы (в том числе АСКУЭ) в реальном времени. Возможности комплекса: моделирование участка электрической сети в программном комплексе для анализа перетоков мощности, уровня потерь и других параметров в зависимости от топологии сети, уровней напряжения, используемых средств компенсации реактивной мощности; определение оптимальных мест размещения, типов и параметров компенсирующих устройств в электрических сетях по разработанным методикам; выбор оптимального состава (нерегулируемые батареи статических конденсаторов, ступенчато-регулируемые КУ, статические тиристорные компенсирующие устройства и др.) и параметров КУ для получения требуемых характеристик установившихся режимов по реактивной мощности, отклонениям, несимметрии и колебаниям напряжения при минимальных затратах; прогнозирование уровня искажений кривой напряжения в точках электрической сети 35-6/0,4 кВ, отклонений, колебаний и других параметров режима, потерь электроэнергии на основе математического моделирования; оптимизация параметров режима с определением законов регулирования напряжения в заданных точках (законы изменения плавнорегулируемых устройств, определение положений ступеней анцапфы трансформаторов), уровня компенсации реактивной мощности (закон изменения для регулируемых, количество ступеней для ступенчато-регулируемых КУ и т. п.), положение коммутационных аппаратов для минимизации потерь в сетях и обеспечения качества электроэнергии до заданного уровня. Таким образом, аппаратно-программный комплекс позволяет оптимизировать параметры режима в реальном времени (с заданным усреднением при необходимости). При отсутствии в действующих сетях полностью управляемых объектов определяются положение анцапф трансформаторов, количество ступеней нерегулируемых устройств и т. п. для ручных переключений с разумной периодичностью, определяемой усреднением расчетов за определенный период.

Совмещение возможностей аппаратно-программного комплекса и системы управления объектами электроснабжения на базе результатов расчета и данных информационно-измерительных систем позволит эффективно управлять электропотреблением и качеством электроэнергии. Возможности представленной системы управления шире развиваемых smard grid и могут развиваться параллельно.

В качестве исходных данных расчета параметров режима задаются схема замещения системы электроснабжения, значения параметров пассивных элементов, а также значения параметров режима активных элементов, определяемые реальными условиями работы источников и потребителей электроэнергии в системе. Источники электроэнергии вводятся в расчет значениями активной мощности и модуля напряжения на зажимах. Нагрузки задаются статическими характеристиками активной и реактивной мощности по напряжению (нелинейные) и частоте (линейные) ($P = P_{\text{i}}(U, f), Q = Q_{\text{i}}(U, f)$).

Таким образом, установившийся режим системы электроснабжения математически описывается двумя группами уравнений: 1) линейными алгебраическими уравнениями, связывающими ток и напряжение пассивных элементов схемы замещения, представляющей собой линейную электрическую цепь; 2) нелинейными уравнениями, связывающими мощность, напряжение и ток источников и нагрузок.

Система уравнений с комплексными переменными и коэффициентами, описывающая установившейся режим электрической системы имеет вид:

$$\underline{Y}_{\text{у}}\dot{U} + \underline{Y}_{\text{б}}\dot{U}_{\text{б}} = \hat{U}_{\text{д}}^{-1}\hat{S}_{\text{у}}, \qquad (1)$$

где $\underline{Y}_y$ – квадратная матрица узловых проводимостей;

$\dot{U}$ – вектор-столбец линейных напряжений всех узлов;

$U_{\text{д}}$ – диагональная матрица линейных напряжений независимых узлов (кроме балансирующего (символ «б»));

S_y – вектор-столбец узловых мощностей;

символ «^» означает сопряженный комплекс.

Представленная система уравнений нелинейна, может быть решена итерационно и может иметь одно или несколько решений или не иметь решения вообще. Вопросы существования и единственности решения уравнений установившегося режима электрической системы подробно рассмотрены в работе [5].

Кроме классического подхода к расчету установившихся режимов в электрических сетях разрабатываются методы определения параметров режима в условиях неполноты начальных данных с применением средств нейронного моделирования, теорий нечетких множеств и многополюсников.

При моделировании распределительных сетей, в том числе нетяговых железнодорожных потребителей, существует ряд особенностей: схемы замещения содержат только продольные активные и реактивные сопротивления; пренебрегают поперечной составляющей снижения напряжения и в трансформаторах и в линиях; необходимо учитывать несимметрию токов и напряжений, а также наличие нелинейных нагрузок; случайный характер изменения нагрузок и параметров режима.

Задача расчета параметров режима с учетом топологии электрической сети решается в пространстве мощностей и имеет высокой уровень научной проработки, используется как базовая для решения других, более сложных проблем планирования, оптимизации и противоаварийного управления [8].

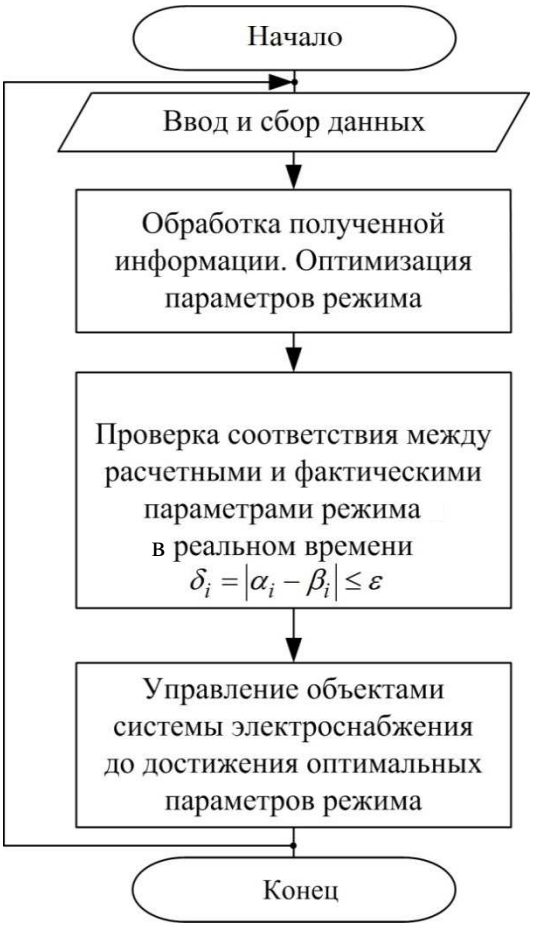


Рисунок 1 – Алгоритм работы аппаратно-программного комплекса

Основные функции автоматизированной системы (рисунок 1): сбор, накопление и передача информации, характеризующей режим электропотребления, состояние электрической сети (конфигурация, ремонт оборудования); передача информации с контрольных точек на диспетчерский пункт и обратно; обработка полученной информации, расчет и оптимизация параметров режима; автоматическое изменение параметров устройств электроснабжения (КУ, выключатели, устройство переключения под нагрузкой (РПН) и т. п.).

Структурная схема управления объектами электроснабжения для оптимизации параметров режима электрической сети в реальном времени для снижения потерь электроэнергии и повышения ее качества может быть реализована, как показано на рисунке 2.

Ожидаемые результаты от введения системы управления объектами электроснабжения нетяговых потребителей на базе адаптивных технологий и аппаратно-программного комплекса оптимизации параметров режима в реальном времени:

повышение надежности и качества электрической энергии, снижение потерь, онлайн-мониторинг результатов управления параметрами режима в распределительных сетях по данным информационно-измерительных систем.

повышение эффективности использования данных с АСКУЭ не только для определения электропотребления, но и управление им (при развитии синхронных измерений).

возможность включения распределенной генерации на параллельную работу с сетью по среднему напряжению (СН) за счет управлением режимами напряжения и параметрами генерации в месте подключения в реальном времени, в том числе с учетом графиков выработки (в случаях с нетрадиционными источниками энергии), накопления энергии (в случае с накопителями энергии) и нагрузки потребителей.

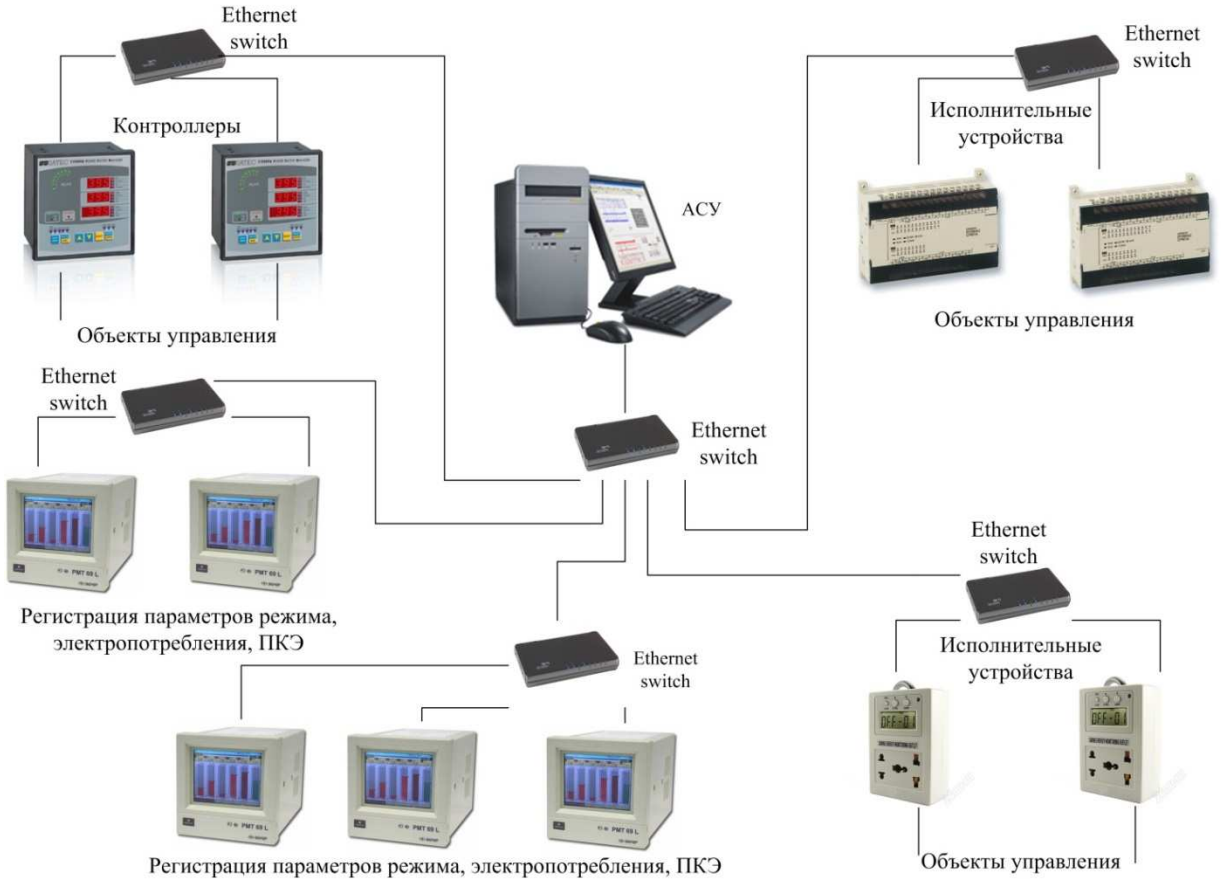


Рисунок 2 – Структурная схема управления объектами электроснабжения

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. Карташов, И. И. Современные задачи управления качеством электроэнергии [Текст] / И. И. Карташов, В. Н. Тульский // Энергонадзор и энергобезопасность. – 2007. – № 4. С. 15 – 19.

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. Бернас, С. Математические модели элементов электроэнергетических систем [Текст] / С. Бернас, З. Цек. – М.: Энергоиздат, 1982. – 312 с.

5. Weng, B. Optimal signal reconstruction using the empirical mode decomposition [Текст] / B. Weng // Euroasip Journal on Advances in Signal Processing. – 2008. – Vol. 4. – P. 12 – 18.

6. Бренков, С. Н. Управление устройствами поперечной емкостной компенсации электрифицированных железных дорог с зависимой выдержкой времени [Текст] / С. Н. Бренков // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2011. – № 1 (5). – С. 46 – 50.

7. 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.

8. Максимов, Ю. А. Алгоритмы решения задач нелинейного программирования [Текст] / Ю. А. Максимов / МИФИ. – М., 1982. – 324 с.

УДК 621.331

В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, М. С. Шульгин

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Предложен новый метод параметрической идентификации трехобмоточных трансформаторов тяговых подстанций, отличающийся от известных использованием фазных координат и построением модели трансформатора в виде решетчатой схемы замещения, элементы которой соединены по схеме полного графа.

Задача расчета режимов электроэнергетических систем (ЭЭС) и систем тягового электроснабжения (СТЭ) сводится к решению нелинейной системы уравнений:

$$F\left(X, D\right) = 0, \tag{1}$$

где F – n-мерная вектор-функция; X – n-мерный вектор нерегулируемых параметров; $D = \Pi \cup Y$ – вектор исходных данных. Вектор D включает в себя две группы параметров: структурные Π и режимныеY. В состав вектора Π входят параметры высоковольтных линий электропередачи (ЛЭП), трансформаторов, а также регулирующих и компенсирующих устройств. Вектор Y образуют активные и реактивные мощности генераторов и нагрузок. В современных ЭЭС компоненты вектора Y определяются на основании телеизмерений с использованием хорошо разработанных методов оценивания состояния [1], и потому вопрос об адекватности этой группы параметров можно считать решенным. Параметры Π определяются на основании аналитических выражений, представленных, например, в работе [2]. При этом могут возникнуть значительные погрешности, о чем свидетельствуют данные, приведенные в работе [3]. Уточнение параметров и получение адекватных реальным условиям математических моделей элементов ЭЭС и СТЭ может быть выполнено на основе методов параметрической идентификации [4]. Однако существующие методы идентификации параметров элементов ЭЭС разработаны применительно к однолинейным схемам замещения и потому не применимы для расчета режимов при наличии продольной и поперечной несимметрии, которая особенно проявляется в ЭЭС, питающих тяговые подстанции.

Адекватный метод параметрической идентификации ЛЭП, позволяющий корректно учитывать продольную и поперечную несимметрию в ЭЭС, предложен в работе [5]. В настоящей статье рассматривается новый метод параметрической идентификации трехобмоточных трансформаторов, основанный на использовании фазных координат.

Следует отметить, что на основе параметрической идентификации трансформаторов может быть решена задача их технического диагностирования. Действительно, на основе регулярных измерений параметров *Y*, точной идентификации компонентов вектора Π и оценки его принадлежности допустимой области D_{Π}, т. е. и $\Pi \in D_{\Pi}$, можно выявить повреждения или отклонения от нормального режима работы трансформатора. Своевременное выявление дефектов позволяет принять меры по предупреждению их развития и сохранению работоспособного состояния трансформатора.

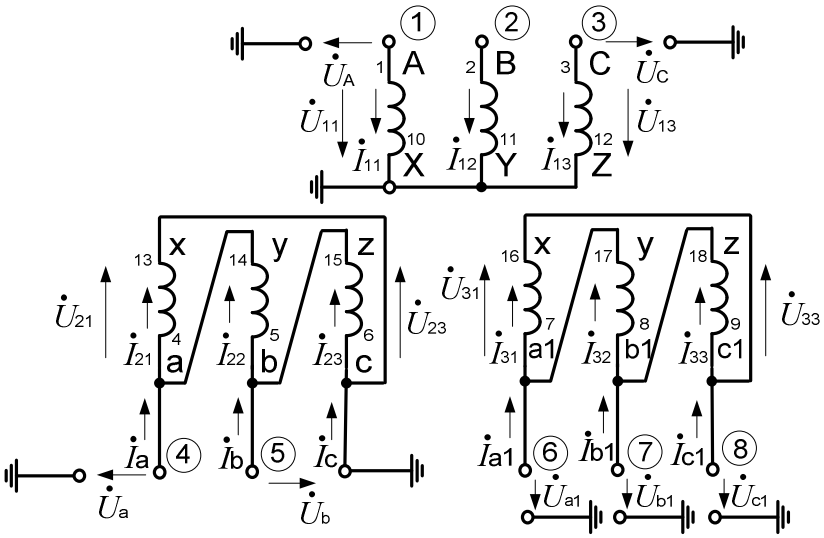


Рисунок 1 – Схема трансформатора Yн/Do/D с заземленной нейтралью звезды

Трансформатор со схемой соединения *Yн/Do/D* с заземленной нейтралью первичной обмотки и заземленным выводом фазы С обмотки 27,5 кВ является наиболее распространенным трансформатором тяговых подстанций. Схема трансформатора с нумерацией узлов и концов катушек показана на рисунке 1. Задача параметрической идентификации состоит в определении параметров трансформатора на основе измерений тока и напряжения обмоток в различных режимах работы устройства.

Система уравнений трансформатора, полученная на основе уравнений электрического и магнитного состояния, записывается следующим образом:

$$\underline{Z}_{11}\,\dot{I}_{11} + j\,\omega\, w_{11}\dot{\Phi}_2 = \dot{U}_{11};\ \underline{Z}_{12}\,\dot{I}_{12} + j\,\omega\, w_{12}\dot{\Phi}_3 = \dot{U}_{12};\ \underline{Z}_{13}\,\dot{I}_{13} + j\,\omega\, w_{13}\dot{\Phi}_4 = \dot{U}_{13}; \tag{2}$$

$$\begin{gathered}\underline{Z}_{21}\,(\dot{I}_{21}{}' + \dot{I}_{20}) + j\,\omega\, w_{21}\dot{\Phi}_2 = \dot{U}_{21};\ \underline{Z}_{22}\left(\dot{I}_{22}{}' + \dot{I}_{20}\right) + j\,\omega\, w_{22}\dot{\Phi}_3 = \dot{U}_{22};\\ \underline{Z}_{23}\left(\dot{I}_{23}{}' + \dot{I}_{20}\right) + j\,\omega\, w_{23}\dot{\Phi}_4 = \dot{U}_{23};\end{gathered} \tag{3}$$

$$\begin{gathered}\underline{Z}_{31}\left(\dot{I}_{31}{}' + \dot{I}_{30}\right) + j\,\omega\, w_{31}\dot{\Phi}_2 = \dot{U}_{31};\ \underline{Z}_{32}\left(\dot{I}_{32}{}' + \dot{I}_{30}\right) + j\,\omega\, w_{32}\dot{\Phi}_3 = \dot{U}_{32};\\ \underline{Z}_{33}\left(\dot{I}_{33}{}' + \dot{I}_{30}\right) + j\,\omega\, w_{33}\dot{\Phi}_4 = \dot{U}_{33};\end{gathered} \tag{4}$$

$$\underline{R}_{m1}\dot{\Phi}_1 - \underline{R}_{m2}\dot{\Phi}_2 + \dot{I}_{11}\,w_{11} + \dot{I}_{21}{}'\,w_{21} + \dot{I}_{20}\,w_{21} + \dot{I}_{31}{}'\,w_{31} + \dot{I}_{30}\,w_{31} = 0; \tag{5}$$

$$\begin{gathered}\underline{R}_{m2}\left[k_{72}\dot{\Phi}_1 + (k_{72}+1)\dot{\Phi}_2 - \dot{\Phi}_3\right] - \dot{I}_{11}\,w_{11} - \dot{I}_{21}{}'\,w_{21} - \dot{I}_{20}\left(w_{21} - w_{22}\right) -\\ - \dot{I}_{31}{}'\,w_{31} - \dot{I}_{30}\left(w_{31} - w_{32}\right) + \dot{I}_{12}\,w_{12} + \dot{I}_{22}{}'\,w_{22} + \dot{I}_{32}{}'\,w_{32} = 0;\end{gathered} \tag{6}$$

$$\begin{gathered}\underline{R}_{m2}\left[k_{72}\dot{\Phi}_1 + k_{72}\dot{\Phi}_2 + (k_{72}+1)\dot{\Phi}_3 - \dot{\Phi}_4\right] - \dot{I}_{12}\,w_{12} - \dot{I}_{22}{}'\,w_{22} -\\ - \dot{I}_{20}\left(w_{22} - w_{23}\right) - \dot{I}_{32}{}'\,w_{32} - \dot{I}_{30}\left(w_{32} - w_{33}\right) + \dot{I}_{13}\,w_{13} + \dot{I}_{23}{}'\,w_{23} + \dot{I}_{33}{}'\,w_{33} = 0;\end{gathered} \tag{7}$$

$$\underline{R}_{m1}\left(\dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2 + \dot{\Phi}_3 + \dot{\Phi}_4\right) + \underline{R}_{m2}\dot{\Phi}_4 - \dot{I}_{13}\,w_{13} - \dot{I}_{23}{}'\,w_{23} - \dot{I}_{20}\,w_{23} - \dot{I}_{33}{}'\,w_{33} - \dot{I}_{30}\,w_{33} = 0. \tag{8}$$

Из токов обмоток необходимо выделить токи нулевой последовательности, которые могут замыкаться в треугольниках вторичных обмоток и не проявляются во внешней цепи:

$$\dot{I}_{21} = \dot{I}_{21}' + \dot{I}_{20};\ \dot{I}_{22} = \dot{I}_{22}' + \dot{I}_{20};\ \dot{I}_{23} = \dot{I}_{23}' + \dot{I}_{20};\ \dot{I}_{21}' + \dot{I}_{22}' + \dot{I}_{23}' = 0; \tag{9}$$

$$\dot{I}_{31} = \dot{I}_{31}' + \dot{I}_{30};\ \dot{I}_{32} = \dot{I}_{32}' + \dot{I}_{30};\ \dot{I}_{33} = \dot{I}_{33}' + \dot{I}_{30};\ \dot{I}_{31}' + \dot{I}_{32}' + \dot{I}_{33}' = 0. \tag{10}$$

Сопротивления и числа витков разных фаз одной обмотки близки по величине:

$$\underline{Z}_{11} \approx \underline{Z}_{12} \approx \underline{Z}_{13} \approx \underline{Z}_1;\ \underline{Z}_{21} \approx \underline{Z}_{22} \approx \underline{Z}_{23} \approx \underline{Z}_2;\ \underline{Z}_{31} \approx \underline{Z}_{32} \approx \underline{Z}_{33} \approx \underline{Z}_3; \tag{11}$$

$$w_{11} = w_{12} = w_{13} = w_1;\ w_{21} = w_{22} = w_{23} = w_2;\ \underline{w}_{31} = w_{32} = w_{33} = w_3. \tag{12}$$

После сложения уравнений (3) и (4) можно получить:

$$3\underline{Z}_2\dot{I}_{20} + j\,\omega\, w_2\left(\dot{\Phi}_2 + \dot{\Phi}_3 + \dot{\Phi}_4\right) = 0;\ 3\underline{Z}_3\dot{I}_{30} + j\,\omega\, w_3\left(\dot{\Phi}_2 + \dot{\Phi}_3 + \dot{\Phi}_4\right) = 0. \tag{13}$$

Уравнения (5) – (12) приводят к соотношению:

$$\dot{I}_{20} = \frac{w_2}{w_3}\frac{\underline{Z}_3}{\underline{Z}_2}\dot{I}_{30} = \underline{k}_{32}\dot{I}_{30}. \tag{14}$$

В качестве первого приближения можно принять, что

$$\underline{Z}_2 = \frac{3U_{2n}^{\ 2}\left(P_{к12} - P_{к13} + P_{к23}\right)}{2S_н^{\ 2}} + j\frac{3U_{2n}^{\ 2}\left(u_{к12}' - u_{к13}' + u_{к23}'\right)}{200S_н}; \tag{15}$$

$$\underline{Z}_3 = \frac{3U_{3n}^{\ 2}\left(-P_{к12} + P_{к13} + P_{к23}\right)}{2S_н^{\ 2}} + j\frac{3U_{3n}^{\ 2}\left(-u_{к12}' + u_{к13}' + u_{к23}'\right)}{200S_н}, \tag{16}$$

где $u_{к\,ik}' = \sqrt{u_{к\,ik}^{\ 2} - \left(\frac{100P_{к\,ik}}{S_н}\right)^2}$; $u_{к12}$, $u_{к13}$, $u_{к23}$, $P_{к12}$, $P_{к13}$, $P_{к23}$ – напряжения и потери короткого замыкания; U_{kn} – номинальное фазное напряжение обмотки *k*; S_i – номинальная мощность трансформатора. Таким образом,

$$\underline{k}_{32} = \frac{w_2\,\underline{Z}_3}{w_3\,\underline{Z}_2} \approx \frac{w_3}{w_2}\frac{\left(-u_{к12}' + u_{к13}' + u_{к23}'\right)}{\left(u_{к12}' - u_{к13}' + u_{к23}'\right)}. \tag{17}$$

Уравнения состояния трансформатора при этом принимают вид:

$$\underline{Z}_{11}\dot{I}_{11} + j\,\omega\, w_{11}\dot{\Phi}_2 = \dot{U}_{11};\ \underline{Z}_{12}\dot{I}_{12} + j\,\omega\, w_{12}\dot{\Phi}_3 = \dot{U}_{12};\ \underline{Z}_{13}\dot{I}_{13} + j\,\omega\, w_{13}\dot{\Phi}_4 = \dot{U}_{13}; \tag{18}$$

$$\begin{gathered}\underline{Z}_{21}\left(\dot{I}_{21}' + \underline{k}_{32}\dot{I}_{30}\right) + j\,\omega\, w_{21}\dot{\Phi}_2 = \dot{U}_{21};\ \underline{Z}_{22}\left(\dot{I}_{22}' + \underline{k}_{32}\dot{I}_{30}\right) + j\,\omega\, w_{22}\dot{\Phi}_3 = \dot{U}_{22}; \\ \underline{Z}_{23}\left(\dot{I}_{23}' + \underline{k}_{32}\dot{I}_{30}\right) + j\,\omega\, w_{23}\dot{\Phi}_4 = \dot{U}_{23};\end{gathered} \tag{19}$$

$$\begin{gathered}\underline{Z}_{31}\left(\dot{I}_{31}' + \dot{I}_{30}\right) + j\,\omega\, w_{31}\dot{\Phi}_2 = \dot{U}_{31};\ \underline{Z}_{32}\left(\dot{I}_{32}' + \dot{I}_{30}\right) + j\,\omega\, w_{32}\dot{\Phi}_3 = \dot{U}_{32}; \\ \underline{Z}_{33}\left(\dot{I}_{33}' + \dot{I}_{30}\right) + j\,\omega\, w_{33}\dot{\Phi}_4 = \dot{U}_{33};\end{gathered} \tag{20}$$

$$\underline{R}_{m1}\dot{\Phi}_1 - \underline{R}_{m2}\dot{\Phi}_2 + \dot{I}_{11}\,w_{11} + \dot{I}_{21}'\,w_{21} + \dot{I}_{30}\left(\underline{k}_{32}w_{21} + w_{31}\right) + \dot{I}_{31}'\,w_{31} = 0; \tag{21}$$

$$\begin{gathered}\underline{R}_{m2}\left[k_{72}\dot{\Phi}_1 + \left(k_{72}+1\right)\dot{\Phi}_2 - \dot{\Phi}_3\right] - \dot{I}_{11}\,w_{11} - \dot{I}_{21}'\,w_{21} - \\ - \dot{I}_{30}\left(\underline{k}_{32}w_{21} - \underline{k}_{32}w_{22} + w_{31} - w_{32}\right) - \dot{I}_{31}'\,w_{31} + \dot{I}_{12}\,w_{12} + \dot{I}_{22}'\,w_{22} + \dot{I}_{32}'\,w_{32} = 0;\end{gathered} \tag{22}$$

$$\begin{gathered}\underline{R}_{m2}\left[k_{72}\dot{\Phi}_1 + k_{72}\dot{\Phi}_2 + \left(k_{72}+1\right)\dot{\Phi}_3 - \dot{\Phi}_4\right] - \dot{I}_{12}\,w_{12} - \dot{I}_{22}'\,w_{22} - \\ - \dot{I}_{30}\left(\underline{k}_{32}w_{22} - \underline{k}_{32}w_{23} + w_{32} - w_{33}\right) - \dot{I}_{32}'\,w_{32} + \dot{I}_{13}\,w_{13} + \dot{I}_{23}'\,w_{23} + \dot{I}_{33}'\,w_{33} = 0;\end{gathered} \tag{23}$$

$$\underline{R}_{m1}\left(\dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2 + \dot{\Phi}_3 + \dot{\Phi}_4\right) + \underline{R}_{m2}\dot{\Phi}_4 - \dot{I}_{13}\,w_{13} - \dot{I}_{23}'\,w_{23} - \dot{I}_{30}\left(\underline{k}_{32}w_{23} + w_{33}\right) - \dot{I}_{33}'\,w_{33} = 0. \tag{24}$$

Линейные токи первичной обмотки совпадают с фазными токами, а напряжения узлов

1 – 3 на рисунке 1 – это напряжения фаз обмотки. Для расчета напряжений вторичных обмоток используются соотношения:

$$\dot{U}_{21}=\dot{U}_a;\ \dot{U}_{22}=\dot{U}_b-\dot{U}_a;\ \dot{U}_{23}=-\dot{U}_b;\ \dot{U}_{31}=\dot{U}_{a1}-\dot{U}_{c1};\ \dot{U}_{32}=\dot{U}_{b1}-\dot{U}_{a1};\ \dot{U}_{33}=\dot{U}_{c1}-\dot{U}_{b1}. \quad (25)$$

Составляющие токов фаз вторичных обмоток без тока нулевой последовательности, замыкающегося в данном треугольнике, определяются из первого закона Кирхгофа:

$$\dot{I}_{21}'=\frac{2\dot{I}_a+\dot{I}_b}{3};\ \dot{I}_{22}'=\frac{\dot{I}_b-\dot{I}_a}{3};\ \dot{I}_{23}'=\frac{-\dot{I}_a-2\dot{I}_b}{3}; \quad (26)$$

$$\dot{I}_{31}'=\frac{\dot{I}_{a1}-\dot{I}_{c1}}{3};\ \dot{I}_{32}'=\frac{\dot{I}_{b1}-\dot{I}_{a1}}{3};\ \dot{I}_{33}'=\frac{\dot{I}_{c1}-\dot{I}_{b1}}{3}. \quad (27)$$

Для снижения возможных погрешностей исходных данных возможна некоторая корректировка линейных токов третьей обмотки трансформатора путем использования условия отсутствия токов нулевой последовательности в линейных токах:

$$\dot{I}_{30a}=\frac{\dot{I}_{a1}'+\dot{I}_{b1}'+\dot{I}_{c1}'}{3};\ \dot{I}_{a1}=\dot{I}_{a1}'-\dot{I}_{30a};\ \dot{I}_{b1}=\dot{I}_{b1}'-\dot{I}_{30a};\ \dot{I}_{c1}=\dot{I}_{c1}'-\dot{I}_{30a}, \quad (28)$$

где токи со штрихами представляют собой результаты измерений.

К числу определяемых параметров трансформатора относятся магнитные сопротивления $\underline{R}_{m1}$, $\underline{R}_{m2}$, магнитные потоки $\dot{\Phi}_1$, $\dot{\Phi}_2$, $\dot{\Phi}_3$, $\dot{\Phi}_4$, числа витков w_{11}, w_{12}, w_{13}, w_{21}, w_{22}, w_{23}, w_{31}, w_{32}, w_{33} и активно-индуктивные сопротивления фаз обмоток $\underline{Z}_{11}$, $\underline{Z}_{12}$, $\underline{Z}_{13}$, $\underline{Z}_{21}$, $\underline{Z}_{22}$, $\underline{Z}_{23}$, $\underline{Z}_{31}$, $\underline{Z}_{32}$, $\underline{Z}_{33}$. Для трансформатора с симметричным сердечником можно считать, что

$$\underline{R}_{m7}=\underline{R}_{m2}\frac{l_7}{l_2}=\frac{1}{2}k_{72}\underline{R}_{m2}, \quad (29)$$

где $k_{72}=\dfrac{2\,l_7}{l_2}$.

Для определения параметров необходимо измерение токов и напряжений по крайней мере в двух режима работы: при холостом ходе или в близком к нему режиме, а также при нагрузках, сравнимых с номинальными. Можно также использовать измерения, полученные в режиме короткого замыкания (КЗ). Алгоритм определения параметров состоит из следующих этапов.

1. Линейные токи и напряжения узлов пересчитываются в фазные (без учета нулевой последовательности):

$$\dot{I}_{21}'=\frac{2\dot{I}_a+\dot{I}_b}{3};\ \dot{I}_{22}'=\frac{\dot{I}_b-\dot{I}_a}{3};\ \dot{I}_{23}'=\frac{-\dot{I}_a-2\dot{I}_b}{3};\ \dot{I}_{31}'=\frac{\dot{I}_{a1}-\dot{I}_{c1}}{3};\ \dot{I}_{32}'=\frac{\dot{I}_{b1}-\dot{I}_{a1}}{3};\ \dot{I}_{33}'=\frac{\dot{I}_{c1}-\dot{I}_{b1}}{3}; \quad (30)$$

$$\dot{I}_{30a}=\frac{\dot{I}_{a1}'+\dot{I}_{b1}'+\dot{I}_{c1}'}{3};\ \dot{I}_{a1}=\dot{I}_{a1}'-\dot{I}_{30a};\ \dot{I}_{b1}=\dot{I}_{b1}'-\dot{I}_{30a};\ \dot{I}_{c1}=\dot{I}_{c1}'-\dot{I}_{30a}; \quad (31)$$

$$\dot{U}_{21}=\dot{U}_a;\ \dot{U}_{22}=\dot{U}_b-\dot{U}_a;\ \dot{U}_{23}=-\dot{U}_b;\ \dot{U}_{31}=\dot{U}_{a1}-\dot{U}_{c1};\ \dot{U}_{32}=\dot{U}_{b1}-\dot{U}_{a1};\ \dot{U}_{33}=\dot{U}_{c1}-\dot{U}_{b1}. \quad (32)$$

2. Из параметров режима холостого хода вычисляются числа витков фаз обмоток:

$$w_{ik}=\frac{0,004502U_{ik}}{B_{2m}S_2}, \quad (33)$$

где напряжение катушки U_{ik} в вольтах, амплитуда индукции[1] B_{2m} в теслах, площадь сечения стержня сердечника S_2 в квадратных метрах.

По справочным данным определяются следующие параметры:

$$\underline{Z}_2 = \frac{1{,}5U_{2n}^{\ 2}}{S_н}\left(\frac{P_{к12} - P_{к13} + P_{к23}}{S_н} + j\frac{u_{к12}' - u_{к13}' + u_{к23}'}{100}\right); \tag{34}$$

$$\underline{Z}_3 = \frac{1{,}5U_{3n}^{\ 2}}{S_н}\left(\frac{-P_{к12} + P_{к13} + P_{к23}}{S_н} + j\frac{-u_{к12}' + u_{к13}' + u_{к23}'}{100}\right); \tag{35}$$

$$w_2 = \frac{w_{21} + w_{22} + w_{23}}{3};\ w_3 = \frac{w_{31} + w_{32} + w_{33}}{3};\ \underline{k}_{32} = \frac{w_2\,\underline{Z}_3}{w_3\,\underline{Z}_2}. \tag{36}$$

Определение магнитных сопротивлений и потоков, а также токов нулевой последовательности вторичных обмоток производится итерационным методом Ньютона. Для этого вычисляются начальные приближения по формулам:

$$\underline{R}_{m1} = \frac{l_1}{\mu_0\,S_1};\ k_{72} = \frac{2\,l_7}{l_2}; \tag{37}$$

$$\dot{\Phi}_2 = \frac{\dot{U}_{11}}{j\,\omega\,w_{11}};\ \dot{\Phi}_3 = \frac{\dot{U}_{12}}{j\,\omega\,w_{12}};\ \dot{\Phi}_4 = \frac{\dot{U}_{13}}{j\,\omega\,w_{13}}; \tag{38}$$

$$Q_х = \sqrt{\left(\frac{i_х S_н}{100}\right)^2 - P_х^{\ 2}};\ p_х = \frac{2\omega\,w_{11}^{\ 2}\,P_х}{U_н^{\ 2}};\ q_х = \frac{2\omega\,w_{11}^{\ 2}\,Q_х}{U_н^{\ 2}}; \tag{39}$$

$$R_{m2} = \frac{q_х}{6 + 4\,k_{72}} + j\frac{p_х}{6 + 4k_{72}};\ \dot{\Phi}_1 = \frac{\underline{R}_{m2}\dot{\Phi}_2 - \dot{I}_{11}\,w_{11} - \dot{I}_{21}\,w_{21}}{\underline{R}_{m1}}, \tag{40}$$

где $U_н$ – номинальное фазное напряжение первичной обмотки; $S_н$ – номинальная мощность трансформатора, $P_х$ – активная мощность холостого хода.

Для реализации метода Ньютона составляется вектор-функция

$$\mathbf{F}\left(\underline{R}_{m1}, \underline{R}_{m2}, \dot{\Phi}_1, \dot{I}_{30}\right) = \begin{bmatrix} f_1\left(\underline{R}_{m1}, \underline{R}_{m2}, \dot{\Phi}_1, \dot{I}_{30}\right) \\ f_2\left(\underline{R}_{m1}, \underline{R}_{m2}, \dot{\Phi}_1, \dot{I}_{30}\right) \\ f_3\left(\underline{R}_{m1}, \underline{R}_{m2}, \dot{\Phi}_1, \dot{I}_{30}\right) \\ f_4\left(\underline{R}_{m1}, \underline{R}_{m2}, \dot{\Phi}_1, \dot{I}_{30}\right) \end{bmatrix}, \tag{41}$$

где

$$f_1\left(\underline{R}_{m1}, \underline{R}_{m2}, \dot{\Phi}_1, \dot{I}_{30}\right) = \underline{R}_{m1}\dot{\Phi}_1 - \underline{R}_{m2}\dot{\Phi}_2 + \dot{I}_{11}\,w_{11} + \dot{I}_{21}'\,w_{21} + \dot{I}_{30}\left(\underline{k}_{32}w_{21} + w_{31}\right) + \dot{I}_{31}'\,w_{31} \tag{42}$$

$$\begin{aligned} f_2\left(\underline{R}_{m1}, \underline{R}_{m2}, \dot{\Phi}_1, \dot{I}_{30}\right) &= \underline{R}_{m2}\left[k_{72}\dot{\Phi}_1 + \left(k_{72} + 1\right)\dot{\Phi}_2 - \dot{\Phi}_3\right] - \dot{I}_{11}\,w_{11} - \dot{I}_{21}'\,w_{21} - \\ &- \dot{I}_{30}\left(\underline{k}_{32}w_{21} - \underline{k}_{32}w_{22} + w_{31} - w_{32}\right) - \dot{I}_{31}'\,w_{31} + \dot{I}_{12}\,w_{12} + \dot{I}_{22}'\,w_{22} + \dot{I}_{32}'\,w_{32}; \end{aligned} \tag{43}$$

$$\begin{aligned} f_3\left(\underline{R}_{m1}, \underline{R}_{m2}, \dot{\Phi}_1, \dot{I}_{30}\right) &= \underline{R}_{m2}\left[k_{72}\dot{\Phi}_1 + k_{72}\dot{\Phi}_2 + (k_{72} + 1)\dot{\Phi}_3 - \dot{\Phi}_4\right] - \\ &- \dot{I}_{12}\,w_{12} - \dot{I}_{22}'\,w_{22} - \dot{I}_{30}\left(\underline{k}_{32}w_{22} - \underline{k}_{32}w_{23} + w_{32} - w_{33}\right) - \dot{I}_{32}'\,w_{32} + \dot{I}_{13}\,w_{13} + \dot{I}_{23}'\,w_{23} + \dot{I}_{33}'\,w_{33}; \end{aligned} \tag{44}$$

[1] Для масляных трансформаторов мощностью от 25 до 100 кВ·А максимальная индукция лежит в пределах от 1,2 до 1,6 Тл, для трансформаторов мощностью более 160 кВ·А максимальная индукция находится в пределах от 1,4 до 1,65 Тл.

$$f_4\left(\underline{R}_{m1},\underline{R}_{m2},\dot{\Phi}_1,\dot{I}_{30}\right)=\underline{R}_{m1}\left(\dot{\Phi}_1+\dot{\Phi}_2+\dot{\Phi}_3+\dot{\Phi}_4\right)+$$
$$+\underline{R}_{m2}\dot{\Phi}_4-\dot{I}_{13}w_{13}-\dot{I}_{23}'w_{23}-\dot{I}_{30}\left(\underline{k}_{32}w_{23}+w_{33}\right)-\dot{I}_{33}'w_{33}. \quad (45)$$

Матрица Якоби $J\left(\underline{R}_{m1},\underline{R}_{m2},\dot{\Phi}_1,\dot{I}_{30}\right)$, отвечающая вектор-функции $F\left(\underline{R}_{m1},\underline{R}_{m2},\dot{\Phi}_1,\dot{I}_{30}\right)$, имеет вид:

$$J=\begin{bmatrix} \dot{\Phi}_1 & -\dot{\Phi}_2 & \underline{R}_{m1} & \underline{k}_{32}w_{21}+w_{31} \\ 0 & k_{72}\dot{\Phi}_1+\left(k_{72}+1\right)\dot{\Phi}_2-\dot{\Phi}_3 & \underline{R}_{m2}k_{72} & -\underline{k}_{32}w_{21}+\underline{k}_{32}w_{22}-w_{31}+w_{32} \\ 0 & k_{72}\dot{\Phi}_1+k_{72}\dot{\Phi}_2+\left(k_{72}+1\right)\dot{\Phi}_3-\dot{\Phi}_4 & \underline{R}_{m2}k_{72} & -\underline{k}_{32}w_{22}+\underline{k}_{32}w_{23}-w_{32}+w_{33} \\ \dot{\Phi}_1+\dot{\Phi}_2+ +\dot{\Phi}_3+\dot{\Phi}_4 & \dot{\Phi}_4 & \underline{R}_{m1} & -\underline{k}_{32}w_{23}-w_{33} \end{bmatrix}. \quad (46)$$

Для определения неизвестных $X=\left[\underline{R}_{m1}\quad \underline{R}_{m2}\quad \dot{\Phi}_1\quad \dot{I}_{30}\right]^T$ реализуется итерационный цикл

$$X^{<k+1>}=X^{<k>}-\left[J\left(X^{<k>}\right)\right]^{-1}F\left(X^{<k>}\right), \quad (47)$$

где $X^{<k>}=\left[\underline{R}_{m1}{}^{<k>}\quad \underline{R}_{m2}{}^{<k>}\quad \dot{\Phi}_1{}^{<k>}\quad \dot{I}_{30}{}^{<k>}\right]^T$ – k-е приближение метода Ньютона.

3. Для нагрузочного режима или режима КЗ предварительно определяются магнитные потоки магнитопровода и сопротивления фаз обмоток. Оценка производится по следующим формулам, в которых величины должны быть в основных единицах системы СИ:

$$\underline{Z}_1=\frac{1.5U_{1n}{}^2}{S_н}\left(\frac{P_{к12}+P_{к13}-P_{к23}}{S_н}+j\frac{u_{к12}'+u_{к13}'-u_{к23}'}{100}\right); \quad (48)$$

$$u_{к12}'=\sqrt{u_{к12}{}^2-\left(\frac{100P_{к12}}{S_н}\right)^2};\ u_{к13}'=\sqrt{u_{к13}{}^2-\left(\frac{100P_{к13}}{S_н}\right)^2};\ u_{к23}'=\sqrt{u_{к23}{}^2-\left(\frac{100P_{к23}}{S_н}\right)^2}. \quad (49)$$

где U_{1n} – фазное номинальное напряжение первичной обмотки;

$$\dot{\Phi}_2=\frac{\dot{U}_{11}-\dot{I}_{11}\underline{Z}_1}{j\,\omega\,w_{11}};\ \dot{\Phi}_3=\frac{\dot{U}_{12}-\dot{I}_{12}\underline{Z}_1}{j\,\omega\,w_{12}};\ \dot{\Phi}_4=\frac{\dot{U}_{13}-\dot{I}_{13}\underline{Z}_1}{j\,\omega\,w_{13}}. \quad (50)$$

Методом Ньютона решается система уравнений:

$$\begin{cases} \underline{R}_{m1}\dot{\Phi}_1-\underline{R}_{m2}\dot{\Phi}_2+\dot{I}_{11}w_{11}+\dot{I}_{21}'w_{21}+\dot{I}_{30}(\underline{k}_{32}w_{21}+w_{31})+\dot{I}_{31}'w_{31}=0; \\ \underline{R}_{m2}[k_{72}\dot{\Phi}_1+(k_{72}+1)\dot{\Phi}_2-\dot{\Phi}_3]-\dot{I}_{11}w_{11}-\dot{I}_{21}'w_{21}-\dot{I}_{30}(\underline{k}_{32}w_{21}-\underline{k}_{32}w_{22}+; \\ +w_{31}-w_{32})-\dot{I}_{31}'w_{31}+\dot{I}_{12}w_{12}+\dot{I}_{22}'w_{22}+\dot{I}_{32}'w_{32}=0; \\ \underline{R}_{m2}[k_{72}\dot{\Phi}_1+k_{72}\dot{\Phi}_2+(k_{72}+1)\dot{\Phi}_3-\dot{\Phi}_4]-\dot{I}_{12}w_{12}-\dot{I}_{22}'w_{22}- \\ -\dot{I}_{30}(\underline{k}_{32}w_{22}-\underline{k}_{32}w_{23}+w_{32}-w_{33})-\dot{I}_{32}'w_{32}+\dot{I}_{13}w_{13}+\dot{I}_{23}'w_{23}+\dot{I}_{33}'w_{33}=0; \\ \underline{R}_{m1}(\dot{\Phi}_1+\dot{\Phi}_2+\dot{\Phi}_3+\dot{\Phi}_4)+\underline{R}_{m2}\dot{\Phi}_4-\dot{I}_{13}w_{13}-\dot{I}_{23}'w_{23}-\dot{I}_{30}(\underline{k}_{32}w_{23}+w_{33})-\dot{I}_{33}'w_{33}=0. \end{cases} \quad (51)$$

Для этого в соответствии с системой уравнений (51) составляется вектор-функция $F\left(\underline{R}_{m1},\underline{R}_{m2},\dot{\Phi}_1,\dot{I}_{30}\right)$ с матрицей Якоби $J\left(\underline{R}_{m1},\underline{R}_{m2},\dot{\Phi}_1,\dot{I}_{30}\right)$ и организуется итерационный процесс, описанный выше.

4. Уточнение полученных величин осуществляется по следующим формулам:

$$\underline{Z}_{21}=\frac{\dot{U}_{21}-j\,\omega\,w_{21}\dot{\Phi}_2}{\dot{I}_{21}'+\underline{k}_{32}\dot{I}_{30}};\ \underline{Z}_{22}=\frac{\dot{U}_{22}-j\,\omega\,w_{22}\dot{\Phi}_3}{\dot{I}_{22}'+\underline{k}_{32}\dot{I}_{30}};\ \underline{Z}_{23}=\frac{\dot{U}_{23}-j\,\omega\,w_{23}\dot{\Phi}_4}{\dot{I}_{23}'+\underline{k}_{32}\dot{I}_{30}};\tag{52}$$

$$\underline{Z}_{31}=\frac{\dot{U}_{31}-j\,\omega\,w_{31}\dot{\Phi}_2}{\dot{I}_{31}'+\dot{I}_{30}};\ \underline{Z}_{32}=\frac{\dot{U}_{32}-j\,\omega\,w_{32}\dot{\Phi}_3}{\dot{I}_{32}'+\dot{I}_{30}};\ \underline{Z}_{33}=\frac{\dot{U}_{33}-j\,\omega\,w_{23}\dot{\Phi}_4}{\dot{I}_{33}'+\dot{I}_{30}};\tag{53}$$

$$\underline{Z}_{11}=\underline{Z}_1;\ \underline{Z}_{12}=\underline{Z}_1;\ \underline{Z}_{13}=\underline{Z}_1\tag{54}$$

с повторным решением системы четырех уравнений аналогично предыдущему пункту.

5. Определение параметров решетчатой схемы замещения осуществляется путем составления матрицы обобщенных сопротивлений $\underline{\mathbf{Z}}_T$ и решением матричного уравнения относительно токов:

$$\underline{Z}_T=\begin{bmatrix}\underline{Z}_Z & \underline{Z}_\omega\\ \underline{Z}_W & \underline{Z}_R\end{bmatrix};\ \underline{Z}_Z=\begin{bmatrix}\underline{Z}_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & \underline{Z}_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & \underline{Z}_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & \underline{Z}_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{Z}_{22} & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{Z}_{23} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{Z}_{31} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{Z}_{32} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{Z}_{33}\end{bmatrix};\tag{55}$$

$$\underline{Z}_\omega=\begin{bmatrix}0 & j\omega w_{11} & 0 & 0\\ 0 & 0 & j\omega w_{12} & 0\\ 0 & 0 & 0 & j\omega w_{13}\\ 0 & j\omega w_{21} & 0 & 0\\ 0 & 0 & j\omega w_{22} & 0\\ 0 & 0 & 0 & j\omega w_{23}\\ 0 & j\omega w_{31} & 0 & 0\\ 0 & 0 & j\omega w_{32} & 0\\ 0 & 0 & 0 & j\omega w_{33}\end{bmatrix};\ \underline{Z}_R=\begin{bmatrix}\underline{R}_{m1} & -\underline{R}_{m2} & 0 & 0\\ k_{72}\underline{R}_{m2} & (k_{72}+1)\underline{R}_{m2} & -\underline{R}_{m2} & 0\\ k_{72}\underline{R}_{m2} & k_{72}\underline{R}_{m2} & (k_{72}+1)\underline{R}_{m2} & -\underline{R}_{m2}\\ \underline{R}_{m1} & \underline{R}_{m1} & \underline{R}_{m1} & \underline{R}_{m1}+\underline{R}_{m2}\end{bmatrix}\tag{56}$$

$$\underline{Z}_W=\begin{bmatrix}w_{11} & 0 & 0 & w_{21} & 0 & 0 & w_{31} & 0 & 0\\ -w_{11} & w_{12} & 0 & -w_{21} & w_{22} & 0 & -w_{31} & w_{32} & 0\\ 0 & -w_{12} & w_{13} & 0 & -w_{22} & w_{23} & 0 & -w_{32} & w_{33}\\ 0 & 0 & -w_{13} & 0 & 0 & -w_{23} & 0 & 0 & -w_{33}\end{bmatrix};\tag{57}$$

$$\dot{I}_T=\underline{Z}_T^{-1}U_T,\tag{58}$$

где $\dot{I}_T=\begin{bmatrix}\dot{I}_{11} & \dot{I}_{12} & \dot{I}_{13} & \dot{I}_{21} & \dot{I}_{22} & \dot{I}_{23} & \dot{\Phi}_1 & \dot{\Phi}_2 & \dot{\Phi}_3 & \dot{\Phi}_4\end{bmatrix}^T$ – вектор токов и магнитных потоков; $\dot{U}_T=\begin{bmatrix}\dot{U}_{11} & \dot{U}_{12} & \dot{U}_{13} & \dot{U}_{21} & \dot{U}_{22} & \dot{U}_{23} & 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}^T$ – вектор напряжений катушек трансформатора.

Из матрицы $\underline{D}=\underline{Z}_T^{-1}$ образуется матрица решетчатой схемы [6]:

$$\underline{Y} = \begin{bmatrix} -\underline{D} & \underline{D} \\ \underline{D} & -\underline{D} \end{bmatrix}. \tag{59}$$

Коэффициенты матрицы $\underline{Y}$ представляют собой проводимости ветвей полносвязной решетчатой схемы замещения (без соединений обмоток), и проводимость ветви между концами катушек *i*, *k* равна значению элемента матрицы $\underline{Y}_{ik}$. Учет схем соединения обмоток производится путем добавления в шунты проводимостей ветвей с заземленными концами и сложения проводимостей параллельных ветвей. Ветви между соединяемыми друг с другом концами катушек игнорируются.

Проводимости шунтов итоговой схемы определяются следующими соотношениями:

$$\underline{y}_{k0} = \sum_{i=10}^{12} \underline{Y}_{k\,i} + \underline{Y}_{k,6} + \underline{Y}_{k,13},\ k = 1\ldots3; \tag{60}$$

$$\underline{y}_{k0} = \sum_{i=10}^{12} \left(\underline{Y}_{k\,i} + \underline{Y}_{k+10,\,i}\right) + \underline{Y}_{k,6} + \underline{Y}_{k,13} + \underline{Y}_{k+10,6} + \underline{Y}_{k+10,13},\ k = 4\ldots5; \tag{61}$$

$$\underline{y}_{k0} = \sum_{i=10}^{12} \left(\underline{Y}_{k+1,\,i} + \underline{Y}_{k+11,\,i}\right) + \underline{Y}_{k+1,6} + \underline{Y}_{k+1,13} + \underline{Y}_{k+11,6} + \underline{Y}_{k+11,13},\ k = 6\ldots7; \tag{62}$$

$$\underline{y}_{80} = \sum_{i=10}^{12} \left(\underline{Y}_{9,\,i} + \underline{Y}_{16,\,i}\right) + \underline{Y}_{9,6} + \underline{Y}_{9,13} + \underline{Y}_{16,6} + \underline{Y}_{16,13}, \tag{63}$$

где $\underline{y}_{ik}$ – проводимости ветвей между узлами *i*, *k* итоговой решетчатой схемы (номера на рисунке 1), $\underline{Y}_{ik}$ – элемент строки *i* столбца *k* матрицы $\underline{Y}$ (при отсчете строк и столбцов от единицы).

В итоговой схеме проводимости ветвей между узлами определяются следующим образом:

$$\underline{y}_{1k} = \underline{Y}_{1k},\ k = 2\ldots3;\ \underline{y}_{i\,k} = \underline{Y}_{i\,k} + \underline{Y}_{i,k+10},\ i=1\ldots3,\ k = 4\ldots5; \tag{64}$$

$$\underline{y}_{i\,k} = \underline{Y}_{i,k+1} + \underline{Y}_{i,k+11},\ i=1\ldots3,\ k = 6\ldots7;\ \underline{y}_{i,8} = \underline{Y}_{i,9} + \underline{Y}_{i,16},\ i=1\ldots3; \tag{65}$$

$$\underline{y}_{2,3} = \underline{Y}_{2,3};\ \underline{y}_{4,5} = \underline{Y}_{4,5} + \underline{Y}_{14,5} + \underline{Y}_{4,15} + \underline{Y}_{14,15}; \tag{66}$$

$$\underline{y}_{i,k} = \underline{Y}_{i,k+1} + \underline{Y}_{i,k+11} + \underline{Y}_{i+10,k+1} + \underline{Y}_{i+10,k+11},\ i=4\ldots5,\ k = 6\ldots7; \tag{67}$$

$$\underline{y}_{i,8} = \underline{Y}_{i,9} + \underline{Y}_{i,16} + \underline{Y}_{i+10,9} + \underline{Y}_{i+10,16},\ i=4\ldots5;\ \underline{y}_{6,7} = \underline{Y}_{7,8} + \underline{Y}_{7,18} + \underline{Y}_{17,8} + \underline{Y}_{17,18}; \tag{68}$$

$$\underline{y}_{i,8} = \underline{Y}_{i+1,9} + \underline{Y}_{i+1,16} + \underline{Y}_{i+11,9} + \underline{Y}_{i+11,16},\ i=6\ldots7. \tag{69}$$

Общее количество ветвей итоговой решетчатой схемы равно 28.

Для проверки представленной методики идентификации параметров трансформатора применен четырехступенчатый метод расчетов с использованием программного комплекса Fazonord, разработанного в ИрГУПСе:

получение измерительной информации на основе компьютерного моделирования, для этого выполняются расчеты режима по исходной, «правильной» модели трансформатора;

параметрическая идентификация трансформатора по предложенной методике;

составление решетчатой схемы из *RL*-элементов;

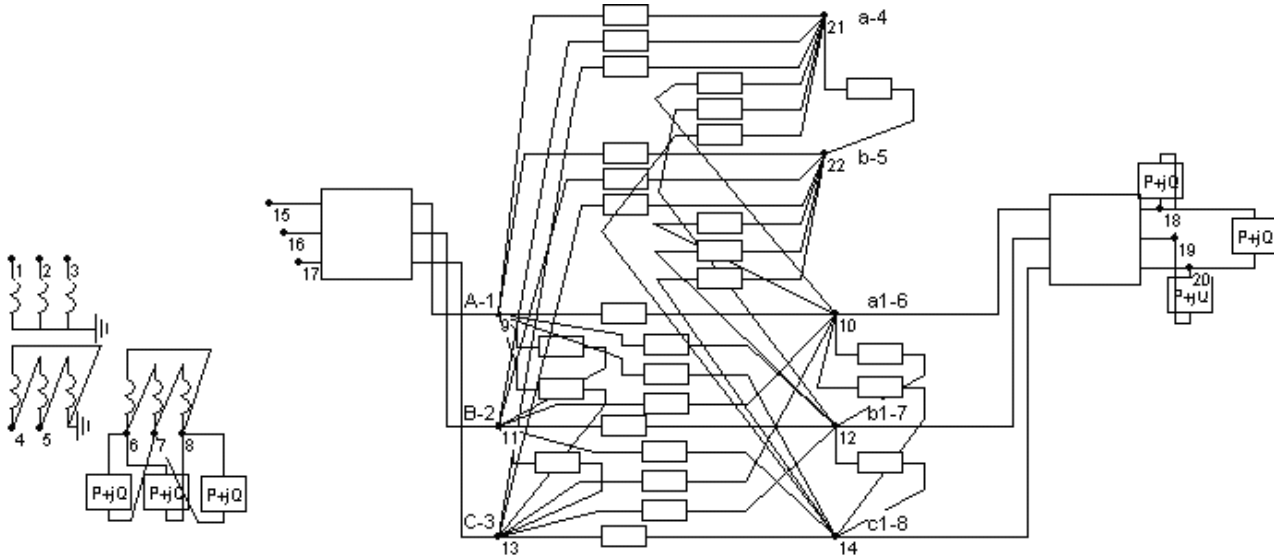
расчет режимов идентифицированной модели и сравнение полученных данных с результатами по «правильной» схеме.

В качестве примера рассмотрен трансформатор ТДТНЖ-40000-230/27,5/11 Y/D с заземленной нейтралью первичной обмотки и заземленной фазой С тяговой обмотки.

На рисунке 2 показана расчетная схема ПК Fazonord с исходной, «правильной» моделью трансформатора и с решетчатой схемой замещения, полученной на основе идентификации.

Узлы 1 – 3 и 15 – 17 объявлены балансирующими с симметричной системой напряжений 132,8 кВ. Дополнительные модели трехфазных линий длиной 0,01 км слева и справа от решетчатой схемы добавлены для удобства оперирования и не вносят какого-либо вклада в ре-

жим работы устройства. Нагрузки включены между узлами районной обмотки и в узлах тяговой обмотки. Поскольку вторичная обмотка изолирована от земли и ее потенциал является неопределенным, что приводит к произвольным потенциалам узлов 6 – 8 и 18 – 20, рассчитывается режим при заземлении узлов 8 и 20 на землю через шунт 1 С. Этот режим соответствует однофазному замыканию на землю в сети с изолированной нейтралью.



а б

Рисунок 2 – Расчетная схема ПК Fazonord

В результате расчетов по описанному выше алгоритму получены параметры решетчатой схемы замещения (рисунок 2,б). В таблицах 1 – 4 приведены сравнительные расчеты режимов холостого хода и нагрузочного режима по «правильной» модели и по решетчатой схеме.

Таблица 1 – Режим первичной обмотки при холостом ходе (нумерация узлов по рисунку 2)

Параметр	Узлы		Различие	Узлы		Различие	Узлы		Различие
	1	15		2	16		3	17	
Напряжение, кВ	132,8	132,8	–	132,8	132,8	–	132,8	132,8	–
Угол, град.	0,0	0,0	–	-120,0	-120,0	–	120,0	120,0	–
Ток, А	1,22	1,21	-0,8 %	0,89	0,98	10,1 %	1,23	1,23	0 %
Ток, град.	-90,5	-95,2	-4,7°	158,5	157,4	-1,1°	47,8	52,4	4,6°

Активная мощность, потребляемая трансформатором «правильной» модели, равна 65,8 кВт, активная мощность, потребляемая решетчатой схемой, равна 64,4 кВт. Реактивные мощности соответственно равны 434,2 и 439,6 квар, что практически соответствует току холостого хода трансформатора 1,1 %.

Таблица 2 – Режим вторичных обмоток при холостом ходе (нумерация узлов по рисунку 2)

Параметр	Узлы		Различие	Узлы		Различие	Узлы		Различие	Узлы		Различие
	4	21		5	22		6	18		7	19	
Напряжение, кВ	27,461	27,424	-0,1 %	27,462	27,426	-0,1%	10,984	10,969	-0,1 %	10,985	10,970	-0,1 %
Угол, град.	0,0	0,0	0,0	-60,0	-60,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-60,0	-60,0	0,0

Таблица 3 – Режим первичной обмотки при включении нагрузки (нумерация узлов по рисунку 2)

Параметр	Узлы		Различие	Узлы		Различие	Узлы		Различие
	1	15		2	16		3	17	
Напряжение, кВ	132,8	132,8	–	132,8	132,8	–	132,8	132,8	–
Угол, град.	0,0	0,0	–	-120,0	-120,0	–	120,0	120,0	–
Ток, А	40,47	40,44	-0,1 %	26,41	26,38	-0,1 %	53,28	53,22	-0,1 %
Ток, град.	-61,0	-61,0	0°	-137,4	-137,4	0°	90,2	90,2	0°

Таблица 4 – Режим вторичных обмоток при включении нагрузки (нумерация узлов по рисунку 2)

Параметр	Узлы		Раз-лич-ие	Узлы		Раз-лич-ие	Узлы		Раз-лич-ие		Уз-лы	Раз-лич-ие	Узлы		Раз-лич-ие
	4	21		5	22		6	18		7	19		8	20	
Напряжение, кВ	26,288	26,289	0,0 %	26,594	26,595	0,0 %	10,499	10,498	0,0 %	10,620	10,619	0,0%	0	0	–
Угол, град.	-1,3	-1,3	0,0	-63,3	-63,3	0,0°	-1,5	-1,5	0,0	-63,5	-63,6	-0.1°	–	–	–
Ток, А	137,15	137,15	0,0 %	240,78	240,77	0,0 %	181,66	181,67	0,0 %	278,46	278,48	0,0%	276,99	277,16	0,1%
Ток, град.	145,0	145,0	0,0	78,1	78,1	0.0°	-178,9	-178,9	0,0	71,6	71,5	-0,1°	-70,3	-70,3	0,0

Приведенные данные показывают практически полное совпадение режима исходной, «правильной» модели с результатами, полученными на основе использования решетчатой схемы, сформированной на основании предлагаемого алгоритма параметрической идентификации.

Предложенный новый метод параметрической идентификации тяговых трансформаторов отличается от известных использованием фазных координат и построением модели трансформатора в виде решетчатой схемы замещения, элементы которой соединены по схеме полного графа.

Компьютерное моделирование, выполненное применительно к реальному трансформатору, показало высокую точность предложенного метода параметрической идентификации.

Список литературы

1. Гамм, А. З. Статистические методы оценивания состояния электроэнергетических систем [Текст] / А. З. Гамм. – М.: Наука, 1976. – 220 с.

2. Идельчик, В. И. Электрические системы и сети [Текст] / В. И. Идельчик. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.

3. Шелюг, С. Н. Методы адаптивной идентификации параметров схемы замещения элементов электрической сети [Текст]: Автореф. дис... канд. техн. наук – Екатеринбург, 2000. – 23 с.

4. Красовский, А. А. Справочник по теории автоматического управления [Текст] / А. А. Красовский. – М.: Наука, 1987. – 712 с.

5. Шульгин, М. С. Параметрическая идентификация линий электропередачи на основе фазных координат [Текст] / М. С. Шульгин, А. В. Крюков, В. П. Закарюкин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2011. – № 1 (29). – С. 140 – 148.

6. Закарюкин, В. П. Сложнонесимметричные режимы электрических систем [Текст] / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков / Иркутский гос. ун-т. – Иркутск, 2005. – 273 с.

УДК 621.316.97

А. О. Сырецкая, Н. К. Слептерева, К. С. Зуб

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ НА ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЯХ

Приведены результаты измерения составляющих электромагнитных помех на тяговых подстанциях постоянного и переменного тока.

Для обеспечения безаварийной работы оборудования тяговой подстанции производится контроль технического состояния заземляющего устройства в соответствии с руководящими

документами [1]. Определение его параметров осуществляется измерением как электрических величин, так и напряженности магнитного поля, поэтому существует необходимость учета электромагнитных помех на территории тяговой подстанции [2]. Существенно затрудняет процесс измерения тот факт, что на территории подстанции присутствуют электромагнитные поля и постоянного, и переменного тока значительной величины. При этом спектральные составы помех имеют существенные отличия на подстанциях при разных видах тяги. В частности, заземляющее устройство тяговой подстанции переменного тока соединено с фазой С и по нему протекают рабочие токи, создающие значительное электромагнитное поле помехи в широком спектре частот [3, 4].

Для определения необходимых мер по помехозащищенности измерительного оборудования были произведены измерения электромагнитных помех на территории тяговых подстанций Западно-Сибирской железной дороги.

На тяговой подстанции постоянного тока напряженность магнитного поля измерялась в десяти точках у различного оборудования, в том числе у ввода ЛЭП, под фидерами контактной сети, вблизи цепи отсоса, у реактора и выпрямительного устройства.

В качестве чувствительного элемента использовался магнитометр с датчиком на тонких магнитных пленках, диапазон рабочих частот которого 25 – 5000 Гц, коэффициент преобразования – 0,63 А/мВ. Измерительный сигнал с магнитометра подавался через блок согласования на запоминающий осциллограф.

Выделение гармонических составляющих помех производилось с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ). Данный алгоритм имеет наиболее высокое быстродействие, что особенно важно при обработке больших массивов входных данных. Для повышения точности определения спектрального состава количество точек в осциллограмме составляло $2^{13} – 2^{14}$ значений.

Для оценки погрешности применения алгоритма БПФ при определении амплитуды гармонических составляющих предварительно была проведена серия сравнительных измерений уровня электромагнитных помех селективным вольтметром и осциллографом с последующим выделением амплитуды нужной гармоники с применением окна Хемминга. Применение окна Хемминга позволяет значительно снизить уровень боковых лепестков и, с другой стороны, вносит минимальные искажения по амплитуде для основного лепестка спектра. Статистический анализ результатов эксперимента показал, что математическое ожидание относительной погрешности измерения осциллографом составляет 3,73 %, СКО – 2,66 %, а максимальное значение погрешности – 9,2 %. Таким образом, численные методы преобразования результатов измерений в частотную область не вносят значительной погрешности, поэтому для сокращения временных затрат дальнейшие измерения производились осциллографическим методом.

Сравнение векторных составляющих напряженности магнитного поля показало, что наибольшее значение имеет вертикальная составляющая H_z, значения составляющих H_y и H_x определяются расположением датчика относительно токоведущих шин.

В большинстве измеряемых точек величина помехи оказалась стабильной во времени, отклонение от среднего значения не превышало 5 %, что объясняется постоянством нагрузки в высоковольтной части подстанции. В точке, находящейся около ПР2С 60-110, наибольшее влияние оказывает ток, потребляемый нагрузкой, поэтому значение и гармонический состав создаваемой им помехи зависят от режима работы тяговой сети. В точках, находящихся вблизи РИ-110 кВ и понижающего трансформаторного оборудования, гармонический состав помех определяется в основном нечетными гармониками [5]. Вблизи выпрямительного агрегата и реактора преобладают гармоники, кратные 300 Гц, поскольку на тяговой подстанции для преобразования переменного тока в постоянный применяется шестипульсовый выпрямитель.

Для примера на рисунке 1 приведен спектральный состав напряженности магнитного поля вблизи комплектного распределительного устройства наружной установки КРУН

10 кВ (точка 1) и под фидерами контактной сети (точка 10) при двух значениях тяговой нагрузки, а на рисунке 2 – на входе реактора (точка 4).

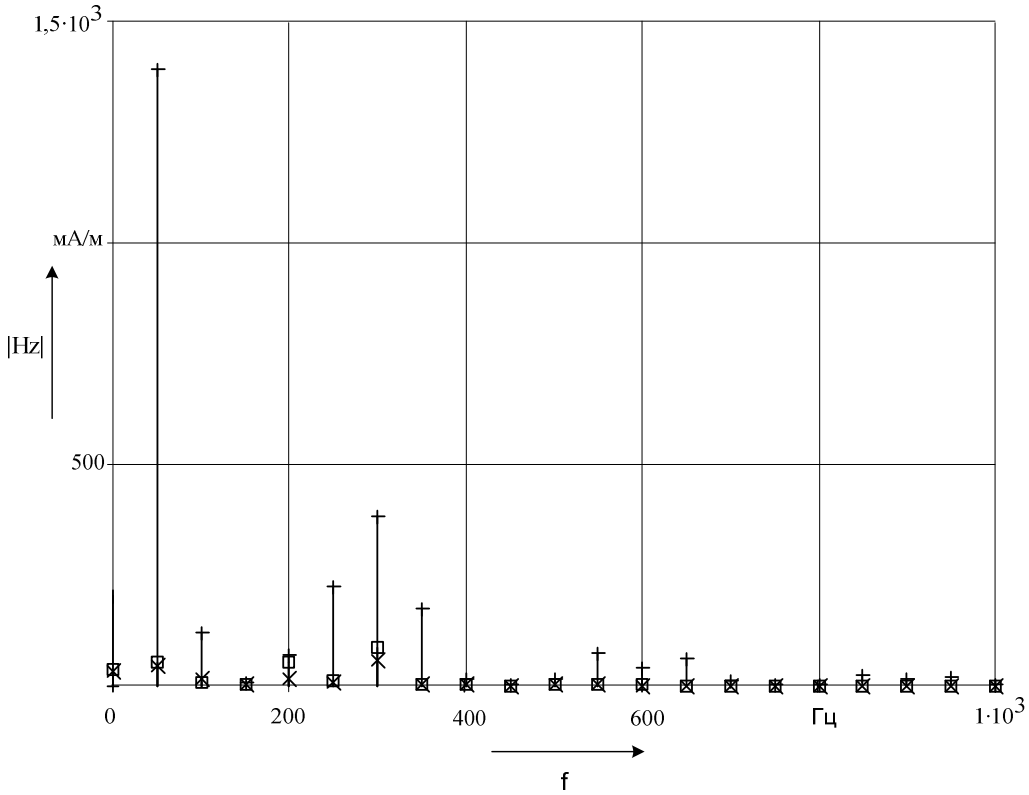


Рисунок 1 – Спектральный состав напряженности магнитного поля
в точках 1 и 10 тяговой подстанции постоянного тока:
– в точке 1; – в точке 10 без нагрузки в контактной сети; – в точке 10 с нагрузкой

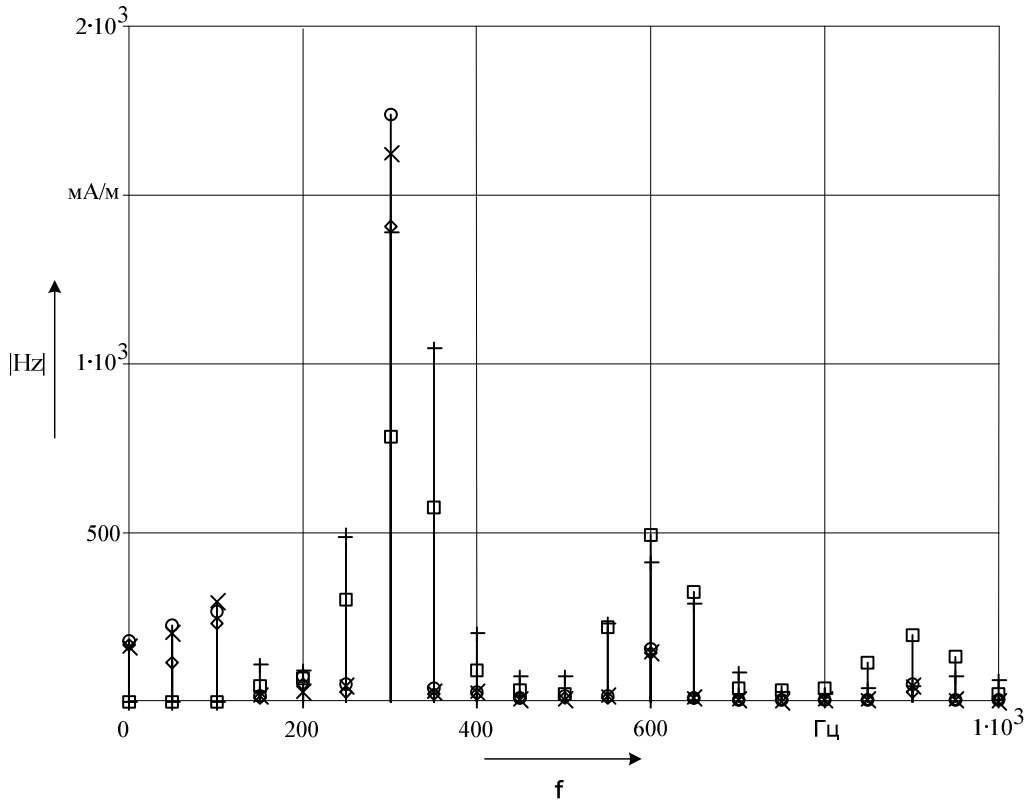


Рисунок 2– Спектральный состав напряженности магнитного поля
в точке 4 тяговой подстанции постоянного тока

По аналогичной методике было произведено экспериментальное исследование параметров электромагнитного поля на территории тяговой подстанции переменного тока.

На рисунке 3 приведены спектральные составляющие напряженности магнитного поля на территории этой подстанции, измеренные в нескольких точках вблизи оборудования со значительными рабочими токами.

Спектральный состав помехи на территории тяговой подстанции переменного тока слабо зависит от точки измерения. Наибольшей амплитуды достигают нечетные гармоники нижней части тонального диапазона до 650 Гц. Однако вблизи отсоса и контактной сети сигнал помехи содержит также и четные гармоники, что обусловлено влиянием выпрямителей электровозов.

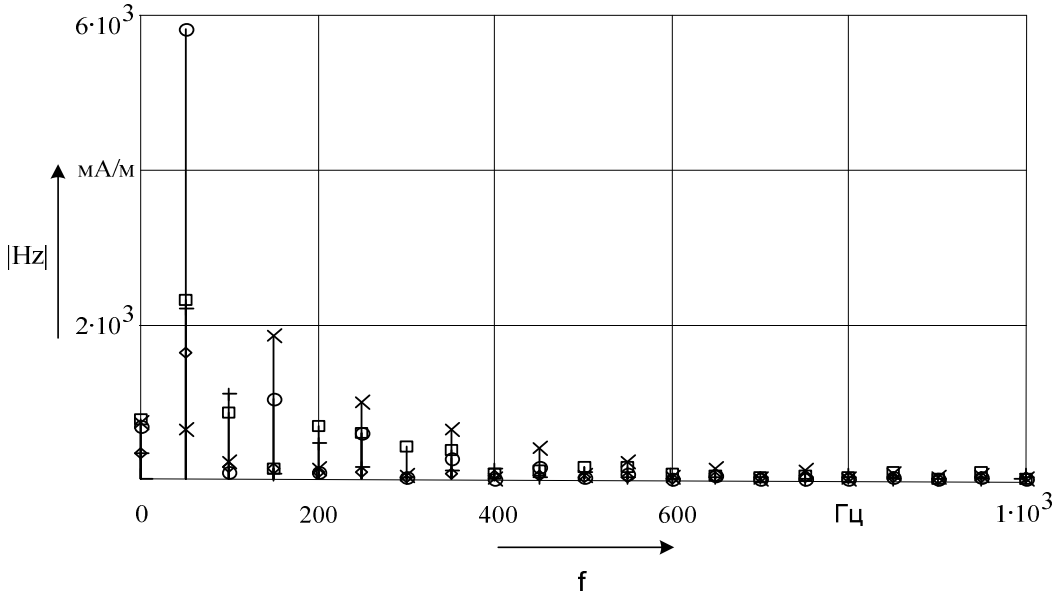


Рисунок 3 – Спектральный состав напряженности магнитного поля на территории тяговой подстанции переменного тока:

♀ – H_z фидера Ф-60; ⊞ – H_x отсоса; ✕ – H_z возле ТП1; ⊥ – H_x возле ТП1; ♀ – H_z возле КРУН – 110кВ

Для получения статистически значимых результатов были проведены многократные измерения напряженности магнитного поля с последующей обработкой результатов измерений статистическими методами. Измерения проводились вблизи фидера Ф-60, поскольку в данной точке помеха достигает наибольшего значения. Для определения степени влияния тока фидера на амплитуду помехи в данной точке во время измерений регистрировался также ток в фидере. Характер зависимости напряженности поля помехи от тока в фидере оказался линейным для составляющих H_z и H_y и модуля напряженности, поэтому можно считать, что помеха в данной точке подстанции формируется током фидера Ф-60. Значения составляющей H_x напряженности магнитного поля в данной точке не зависит от тока фидера, поскольку ее направление совпадает с направлением тока в фазовом проводе, а величина определяется совокупным влиянием близлежащих высоковольтных линий и оборудования подстанции. В силу того, что количественно влияние каждого из объектов подстанции на составляющую H_x помехи в данной точке определить невозможно, дальнейшей обработке подвергались только измерения, выполненные для составляющих H_y и H_z. Для выборки генеральной совокупности при максимальной тяговой нагрузке было произведено 50 измерений каждой из составляющих напряженности поля помехи с интервалом в пять минут. Диаграммы распределения отношения $n_{x/n}$ от величин составляющих H_z и H_y напряженности магнитного поля приведены на рисунках 4 – 6.

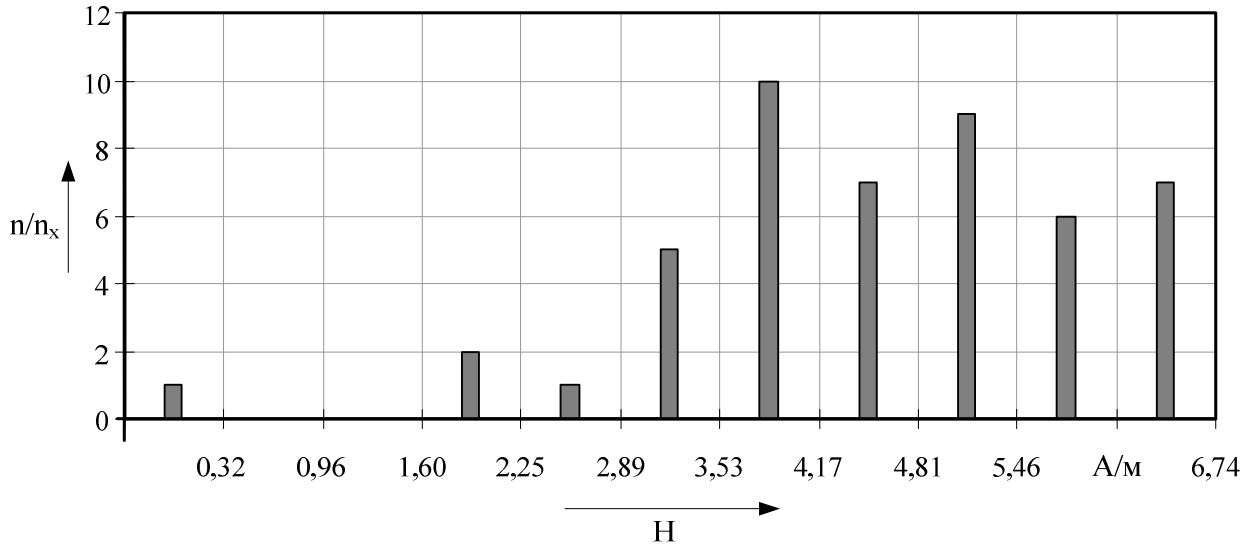


Рисунок 4 – Распределение амплитуд гармоники 50 Гц составляющей H_z напряженности магнитного поля

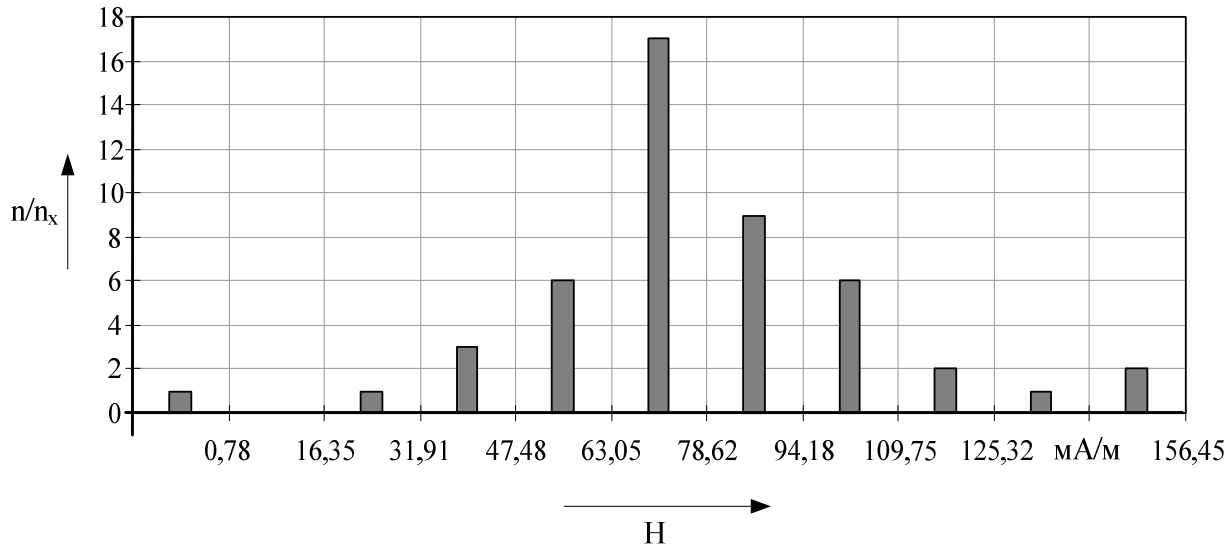


Рисунок 5 – Распределение амплитуд гармоники 550 Гц составляющей H_z напряженности магнитного поля

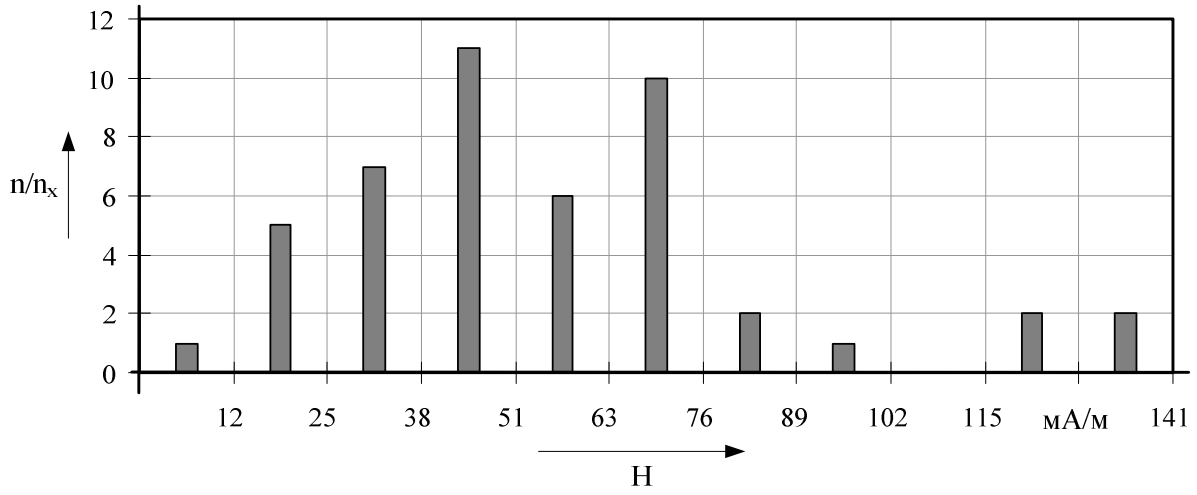


Рисунок 6 – Распределение амплитуд гармоники 450 Гц составляющей H_x напряженности магнитного поля

Для более полного представления всей совокупности экспериментальных данных в целом и выяснения закономерности их изменения были подсчитаны статистические характеристики полученных вариационных рядов. Результаты расчета для некоторых гармонических составляющих приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Статистические характеристики для составляющей H_z напряженности магнитного поля помехи

Статистические характеристики и параметры	Численные значения				
Частота, Гц	50	150	250	550	750
Мат. ожидание, А/м	4,53	1,06	0,45	0,08	0,04
Медиана, А/м	4,67	1,06	0,39	0,07	0,04
Дисперсия, $А^2/м^2$	1794,48	109,39	28,15	0,81	0,21
СКО, А/м	1,34	0,33	0,17	0,03	0,01
Максимальное значение, А/м	6,74	1,96	0,90	0,16	0,07
Минимальное значение, мА/м	320,80	187,10	73,30	0,80	2,50
Коэффициент асимметрии	–0,69	–0,09	0,51	0,28	–0,56
Коэффициент эксцесса	0,85	0,93	0,08	1,35	0,46
Коэффициент вариации	0,30	0,31	0,37	0,36	0,36

Таблица 2 – Статистические характеристики для составляющей H_y напряженности магнитного поля помехи

Статистические характеристики и параметры	Численные значения				
Частота, Гц	50	150	250	350	750
Мат. ожидание, А/м	1,81	0,61	0,18	0,07	0,01
Медиана, А/м	1,94	0,57	0,16	0,06	0,01
Дисперсия, $А^2/м^2$	465,49	77,04	8,25	1,26	0,07
СКО, А/м	0,68	0,28	0,09	0,04	0,01
Максимальное значение, А/м	3,18	1,25	0,38	0,14	0,04
Минимальное значение, мА/м	84,6	14,2	21,4	3	1,1
Коэффициент асимметрии	–0,39	0,36	0,41	0,53	0,88
Коэффициент эксцесс	–0,23	0	–0,6	–0,38	0,71
Коэффициент вариации	0,38	0,46	0,523	0,54	0,58

Для каждого вариационного ряда гармонических составляющих H_z и H_y напряженности магнитного поля была выдвинута гипотеза о нормальном распределении, поскольку значение помехи определяется током в близлежащем оборудовании, т. е. количеством потребленной мощности, которое распределено нормально. Для проверки гипотезы о законе распределения были произведены расчет накопленной вероятности p наблюдения уровня статистического критерия при принятии выдвинутой гипотезы и сравнение с уровнем значимости гипотезы α. В данном методе при p-величине, меньшей выбранного аналитиком критического уровня накопленной вероятности, гипотеза отвергается. Чем меньше p-величина, тем больше оснований отвергнуть нулевую гипотезу. Уровень значимости α принят равным 0,05. Значения мощностей критерия и накопленных вероятностей наблюдения уровня статистического критерия для некоторых частот H_z и H_y – составляющих – приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Проверка гипотезы о законе распределения

Частота, Гц	p (нормальное)		p (равномерное)		(1 – β) при $\alpha = 0{,}05$	
	H_y	H_z	H_y	H_z	H_y	H_z
50	0,421	0,200	0,002	0,001	0,726	0,726
150	0,467	0,829	0,001	$1{,}21 \cdot 10^{-6}$	0,758	0,726
250	0,096	0,055	0,023	$1{,}97 \cdot 10^{-6}$	0,758	0,726
350	0,639509	0,735981	0,141514	0,000232	0,7261	0,6404
450	0,750174	0,918262	0,000538	0,000401	0,6841	0,6404
550	0,599521	0,418678	0,009473	0,000269	0,6841	0,7261

По данным таблицы 3 можно сделать вывод о том, что накопленная вероятность наблюдения уровня статистического критерия при принятии гипотезы о нормальном распределении для каждой из гармонических составляющих помехи превышает выбранный уровень значимости. Мощность критерия для каждой из гипотез не ниже 64 %, таким образом, гипотеза о нормальном распределении амплитуды помехи подтверждена.

По результатам исследования электромагнитных помех можно сделать следующие выводы.

Электромагнитные помехи на тяговых подстанциях постоянного тока обусловлены прежде всего влиянием токов, протекающих в ЛЭП, выпрямительном оборудовании и в фазах; каждый из этих источников имеет свой гармонический состав. Напряженность магнитного поля помехи на частотах 50 и 300 Гц в некоторых точках на территории подстанции достигает 1,5 – 2 А/м.

В диапазонах частот 100 – 150, 450 – 500 и 700 – 800 Гц помехи имеют минимальное значение, в среднем – от 5 до 30 мА/м.

На частотах меньше 50 и выше 950 Гц значения помех не превышают 5 мА/м, в среднем – около 3 мА/м, что делает эти диапазоны наиболее помехозащищенными и пригодными для использования при решении измерительных задач.

Электромагнитные помехи на тяговых подстанциях переменного тока имеют в своем спектральном составе наибольшие амплитуды нечетных гармоник. Напряженность магнитного поля помехи на частоте 50 Гц в некоторых точках на территории подстанции достигает 6,5 – 7 А/м. Наибольшее влияние на значение амплитуды помех оказывает составляющая H_z, поскольку для нее воздействие каждого из объектов подстанции увеличивает результирующую величину, тогда как составляющие H_x и H_y могут и вычитаться в соответствии с принципом суперпозиции.

Для каждой из составляющих помех была подтверждена гипотеза о нормальном распределении при уровне значимости α = 0,05 и вероятности совершить ошибку второго рода β не более 35 %. Расхождение теоретического закона распределения с полученным в результате эксперимента вызвано конечным временем наблюдения и ограниченностью объема данных о процессе. Кроме того, исследуемая выборка не содержит значений помехи в ночное и утреннее время, когда тяговая нагрузка максимальна и минимальна.

В частотном диапазоне от 50 Гц до 1 кГц выделение измерительного сигнала на фоне помехи затруднено, поскольку в данном диапазоне нечетные гармоники в некоторых точках подстанции имеют амплитуду не менее 0,05 А/м, а вблизи отсоса и контактной сети помеха содержит также и четные гармоники амплитудой не менее 0,03 А/м, что составляет 30 и 20 % от амплитуды измерительного сигнала 1 А на глубине 1 м.

Список литературы

1. РД-153-34.0-20.525-00. Методические указания по контролю состояния заземляющих устройств электроустановок [Текст] / СПО «ОРГРЭС». М., – 2000. – 64 с.

2. Комякова, О. О. Гармонический анализ сетевого тока преобразователя, работающего в инверторном режиме, при несимметричном несинусоидальном напряжении питающей сети [Текст] / О. О. Комякова, Т. В. Комякова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2010. – № 4 (4). – С. 55 – 63.

3. Карабанов, М. А. Снижение влияния системы тягового электроснабжения на электропитание нетяговых потребителей в моменты подключения преобразовательных агрегатов [Текст] / М. А. Карабанов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2011. – № 3 (7). – С. 58 – 67.

4. Манусов, В. З. Исследование методов снижения несимметрии загрузки трехфазной сети на тяговых подстанциях скоростных железных дорог переменного тока [Текст] / В. З. Манусов, П. В. Морозов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2012. – № 2(10). – С. 87 – 94.

5. Бадер, М. П. Электромагнитная совместимость: Учебник [Текст] / М. П. Бадер / УМК МПС РФ. – М., 2002. – 638 с.

УДК 681.51

А. Т. Когут

СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ОСНОВЕ ПРИБЛИЖЕННЫХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ВЫНУЖДЕННЫМИ МЕХАНИЧЕСКИМИ КОЛЕБАНИЯМИ ВИБРОСТЕНДОВ

В статье рассматривается применение в вибрационных стендах технической диагностики механических изделий подвижного состава железнодорожного транспорта систем управления механическими колебаниями на основе более эффективных модернизированных нелинейных алгоритмов обратной динамики.

Вибрационный контроль [1 – 4] является одним из основных видов испытаний изделий подвижного состава, поскольку в условиях воздействия вибрационных нагрузок причиной отказа являются различные дефекты, прежде всего в механических узлах. Разработка конструкций объекта на этапе проектирования, имеющих высокие вибропрочность и виброустойчивость, во многом определяются качеством проведения вибрационных испытаний [1].

Вибродиагностические стенды предназначены для проведения проверки изделий на ударную вибропрочность, на воздействие однокомпонентной гармонической, широкополосной случайной и других видов вибраций.

В работе предлагается применение пневматической подвески для обеспечения требуемой формы колебаний подвижной части вибродиагностического стенда. Структурно-функциональная схема вибродиагностического комплекса показана на рисунке 1.

Воздействия на объект – подвижную часть – в каждый дискретный момент времени вычисляются по алгоритмам, хранящимся в программном обеспечении микропроцессорного комплекса, подаются в порты и через цифроаналоговые преобразователи и усилители поступают в исполнительные элементы. Значения входного задающего воздействия подаются на катушку индуктивности электромеханического преобразователя гидравлического усилителя, который обеспечивает работу гидродвигателя и передает усилие $F(t)$ на подвижную часть вибростенда.

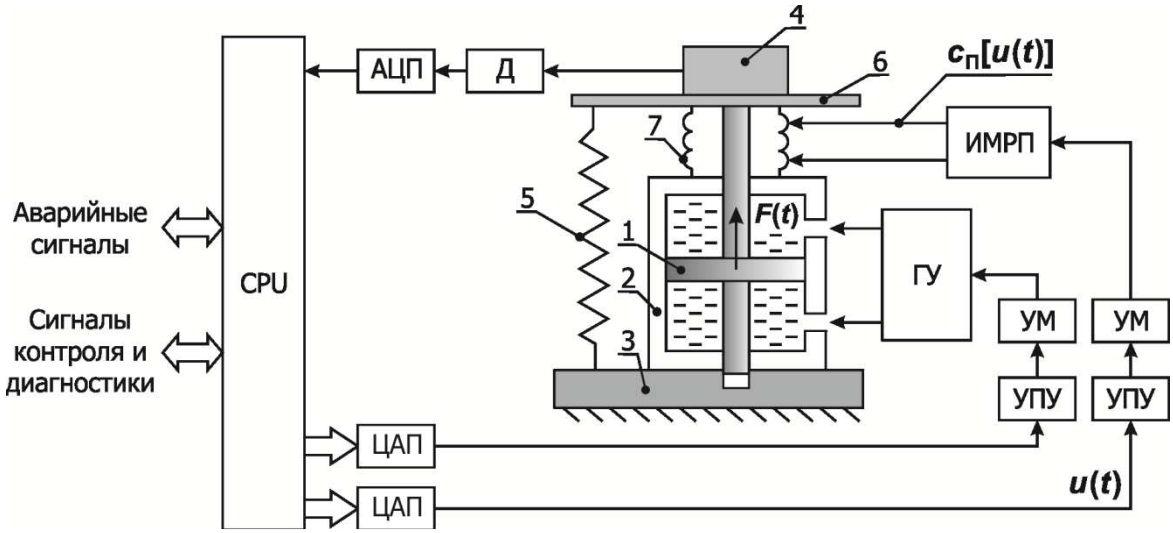


Рисунок 1 – Структурно-функциональная схема вибродиагностического комплекса:
1 – поршень гидродвигателя; 2 – гидродвигатель; 3 – неподвижное основание; 4 – диагностируемое изделие; 5 – упругая подвеска; 6 – стол вибростенда; 7 – пневмоподвеска; CPU – центральный процессор; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ЦАП – цифроаналоговый преобразователь; Д – датчик; ИМРП – исполнительный механизм регулирования жесткости пневмооболочки; У – гидравлический усилитель; УМ – усилитель мощности; УПУ – усилительно-преобразующее устройство; ГУ – гидравлический усилитель

Отклонение центра инерционной массы от положения равновесия $x(t)$ описывается дифференциальным уравнением:

$$m\,\ddot{x}(t)+b\,\dot{x}(t)+c\,x(t)=F(t), \tag{1}$$

где $F(t)$ – входное воздействие (механическое усилие от гидроцилиндра); m – масса подвижной части виброисточника; b, c – суммарные коэффициенты вязкого и жесткого трения.

При проведении вибрационных испытаний изделий одним из основных режимов являются вынужденные одночастотные синусоидальные колебания, поэтому необходимо, чтобы выходная переменная $x(t)$ изменялась по синусоидальному закону, а задающее воздействие имело вид:

$$F(t)=F_m\sin(\omega_B\,t), \tag{2}$$

где F_m – амплитуда; $\omega_в$ – частота вынуждающего воздействия.

В памяти процессора хранятся дискретные значения колебаний вида (2), и в системе формируется дискретный, а после преобразований и непрерывный сигнал задающего воздействия $F(t)$. Процессор также генерирует управляющее воздействие $u(t)$ для приближения колебаний $x(t)$ к требуемому режиму. Усиленный и преобразованный электрический сигнал $u(t)$ подается в исполнительный механизм регулирования давления газа внутри оболочки пневмопружины. Тем самым обеспечивается изменение параметра c в уравнении (1), который можно представить в виде суммы обобщенной жесткости всех упругих пружин, соответствующих положению равновесия c_0 и жесткости пневмоподвески $c_п=c_п[u(t)]$.

Используя выражения (1) и (2), динамическую модель электромеханического объекта будем рассматривать в виде:

$$m\,\ddot{x}(t)+b\,\dot{x}(t)+c_0x(t)+c_п[u(t)]\,x(t)=F_m\sin(\omega_в\,t). \tag{3}$$

Рассмотрим формирование алгоритмов управления пневмоподвеской как синтез траекторных систем при решении задач обратной динамики [5].

В качестве желаемой траектории выберем функцию

$$g(t)=g_m\sin(\omega_B\,t-\pi/2)\,, \tag{4}$$

ее первая и вторая производные имеют вид $\dot{g}(t)=g_m\omega_в\cdot\cos(\omega_в\,t-\pi/2)$ и $\ddot{g}(t)=$ $=-g_m\omega_в^2\sin(\omega_в t-\pi/2)$.

Для решения обратной задачи динамики необходимо из фазовых координат объекта (3) выбрать ту, которая и будет обеспечивать требуемое изменение выходной переменной $g(t)$ по синусоидальному закону. В качестве такой фазовой координаты целесообразно выбирать наблюдаемую переменную, т. е. ускорение перемещения центра масс подвижной части объекта, поэтому необходимо выполнение равенства:

$$\ddot{x}(t)=\ddot{g}(t). \tag{5}$$

Тогда уравнение объекта (3) запишется в виде

$$-mg_m\omega_в^2\sin(\omega_в t-\pi/2)+b\,\dot{x}(t)+c_0x(t)+c_п[u(t)]\,x(t)=F_m\sin(\omega_в\,t)\,. \tag{6}$$

Из равенства (6) релейный алгоритм обратной динамики можно записать в следующей форме:

$$c_П[u(t)]=c_m sign\left[\chi(t)\right]. \tag{7}$$

Здесь и в дальнейшем под $\chi(t)$ понимается

$$\chi(t)=\left(F_m\sin(\omega_B t)+mg_m\omega_B^2\sin(\omega_B t-\pi/2)-b\,x(t)-c_0x(t)\right)\left(x(t)\right)^{-1}. \qquad (8)$$

Результаты имитационного моделирования приведены на рисунках 2 и 3, из которых видно, что после окончания переходного процесса в системе устанавливаются требуемые синусоидальные колебания (см. рисунок 2), но в системе возникают, как это видно из рисунка 3, характерные для релейных систем автоколебания.

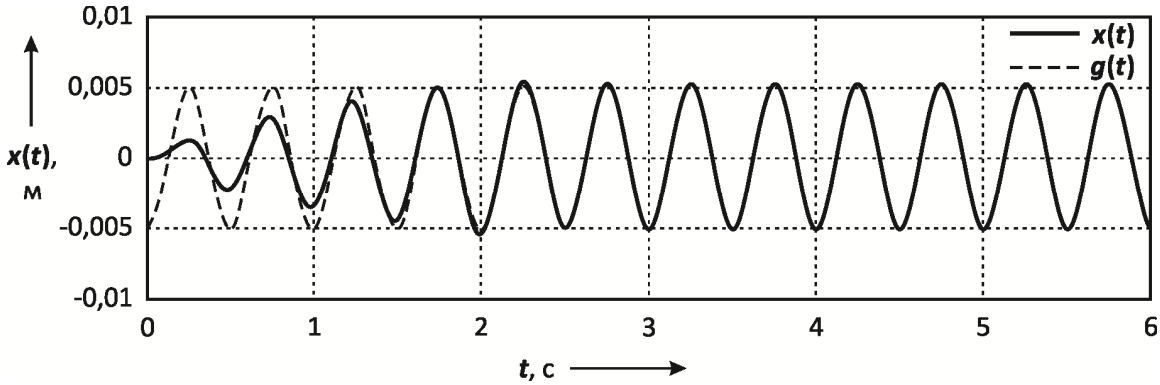


Рисунок 2 – Переходный процесс в системе с релейным алгоритмом обратной динамики

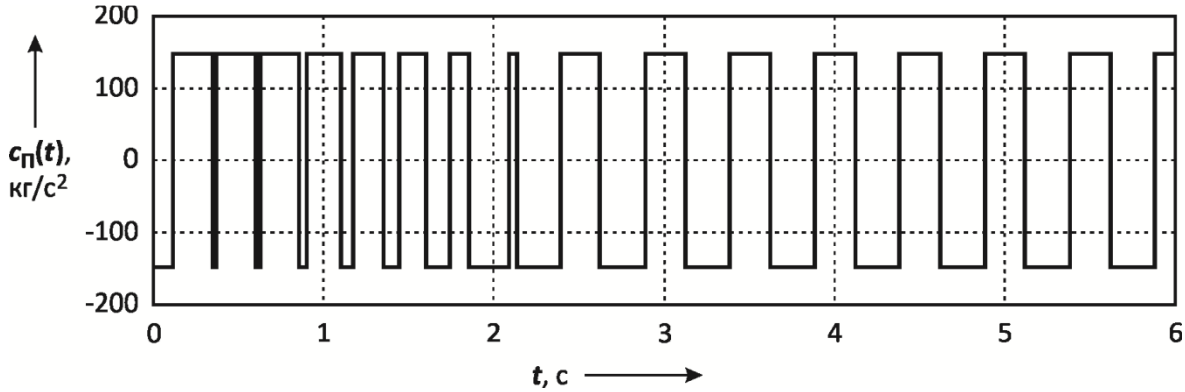


Рисунок 3 – Процесс изменения жесткости пневмоподвески в системе

Формирование $u(t)$ на основе решения обратной задачи динамики связано со сложностью определения обратной для знаковой функции $\mathrm{sign}[\cdot]$. Вместо релейной характеристики предлагается использовать ее гладкую аппроксимацию

$$\tilde{c}_{\Pi}[u(t)]=\varphi(u(t))=c_m\mathrm{th}[\beta u(t)] \quad \text{при} \quad \beta\to\infty. \qquad (9)$$

При формировании управляющего воздействия с использованием метода первого порядка П1 [6] аппроксимация функции $\varphi(u(t))$ запишется при $\tau\to 0$ в виде следующего линейного отрезка ряда Тейлора:

$$c_{\Pi}[u(t)]=\varphi(u(t-\tau))+\varphi'(u(t-\tau))\cdot\Delta u(t). \qquad (10)$$

Величина разности $\Delta u(t)$ представлена в виде:

$$\Delta u(t)=u(t)-u(t-\tau). \qquad (11)$$

Подставим выражение (10) в модель виброисточника (6) и, учитывая аналитическое выражение для первой производной $\varphi'(u(t-\tau))$ и формулу разности (11), запишем управляющее воздействие в виде:

$$u(t)=u(t-\tau)+(c_m\beta)^{-1}\cdot \mathrm{ch}^2(\beta u(t-\tau))\left[\chi(t)-c_m\mathrm{th}(\beta u(t-\tau))\right], \qquad (12)$$

где $\chi(t)$ вычисляется по формуле (8).

Выражение (12) является дискретным алгоритмом управления первого порядка. Используя при $\tau\to 0$ приближенное определение производной

$$\dot{u}(t)=\frac{u(t)-u(t-\tau)}{\tau}, \qquad (13)$$

получим непрерывный аналог

$$\dot{u}(t)=\frac{1}{\tau}(c_m\beta)^{-1}\cdot \mathrm{ch}^2(\beta u(t-\tau))\left[\chi(t)-c_m\mathrm{th}(\beta u(t-\tau))\right]. \qquad (14)$$

Рассмотрим формирование управляющего воздействия с использованием метода второго порядка [6]. Тогда аппроксимация функции $\varphi(u(t))$ при $\tau\to 0$ запишется в форме:

$$c_{\text{п}}[u(t)]=\varphi(u(t-\tau))+\left[\varphi'(u(t-\tau))+0.5\varphi''(u(t-\tau))\delta(t)\right]\cdot\Delta u(t). \qquad (15)$$

Сигнал $\delta(t)$ выбираем в виде:

$$\delta(t)=\tilde{u}(t)-u(t-\tau), \qquad (16)$$

где значение управляющего воздействия $\tilde{u}(t)$ определяется регулятором, в котором реализован метод первого порядка П1.

С учетом аналитических выражений для первой и второй производных получим равенство для определения управляющего воздействия:

$$u(t)=u(t-\tau)+\left[\frac{c_m\beta\left[1-\beta\cdot\mathrm{th}(\beta u(t-\tau)\delta)\right]}{\mathrm{ch}^2(\beta u(t-\tau))}\right]^{-1}\left(\chi(t)-c_m\mathrm{th}(\beta u(t-\tau))\right). \qquad (17)$$

Уравнение (17) является вычислительной схемой дискретного алгоритма управления второго порядка.

Аналогично выражению (17) непрерывный алгоритм управления второго порядка будет иметь вид:

$$\dot{u}(t)=\frac{1}{\tau}\left[\frac{c_m\beta\left[1-\beta\cdot\mathrm{th}(\beta u(t-\tau)\delta\right]}{\mathrm{ch}^2(\beta u(t-\tau))}\right]^{-1}\left(\chi(t)-c_m\mathrm{th}(\beta u(t-\tau))\right). \qquad (18)$$

Эффективность полученных с применением методики полиномиальной аппроксимации дискретных и непрерывных приближенных алгоритмов управления первого и второго порядков необходимо проверить с помощью имитационного моделирования.

Для сравнительного анализа непрерывных алгоритмов (14) и (18) формирования управляющих воздействий были построены области устойчивости $\left(u(0);\ x(0)\right)$ для замкнутых систем при различных начальных отклонениях по координате $x(0)$ и по управлению $u(0)$, которые приведены на рисунке 4.

Из визуального анализа следует, что система, в которой реализован алгоритм второго порядка, характеризуется более широкой областью устойчивости.

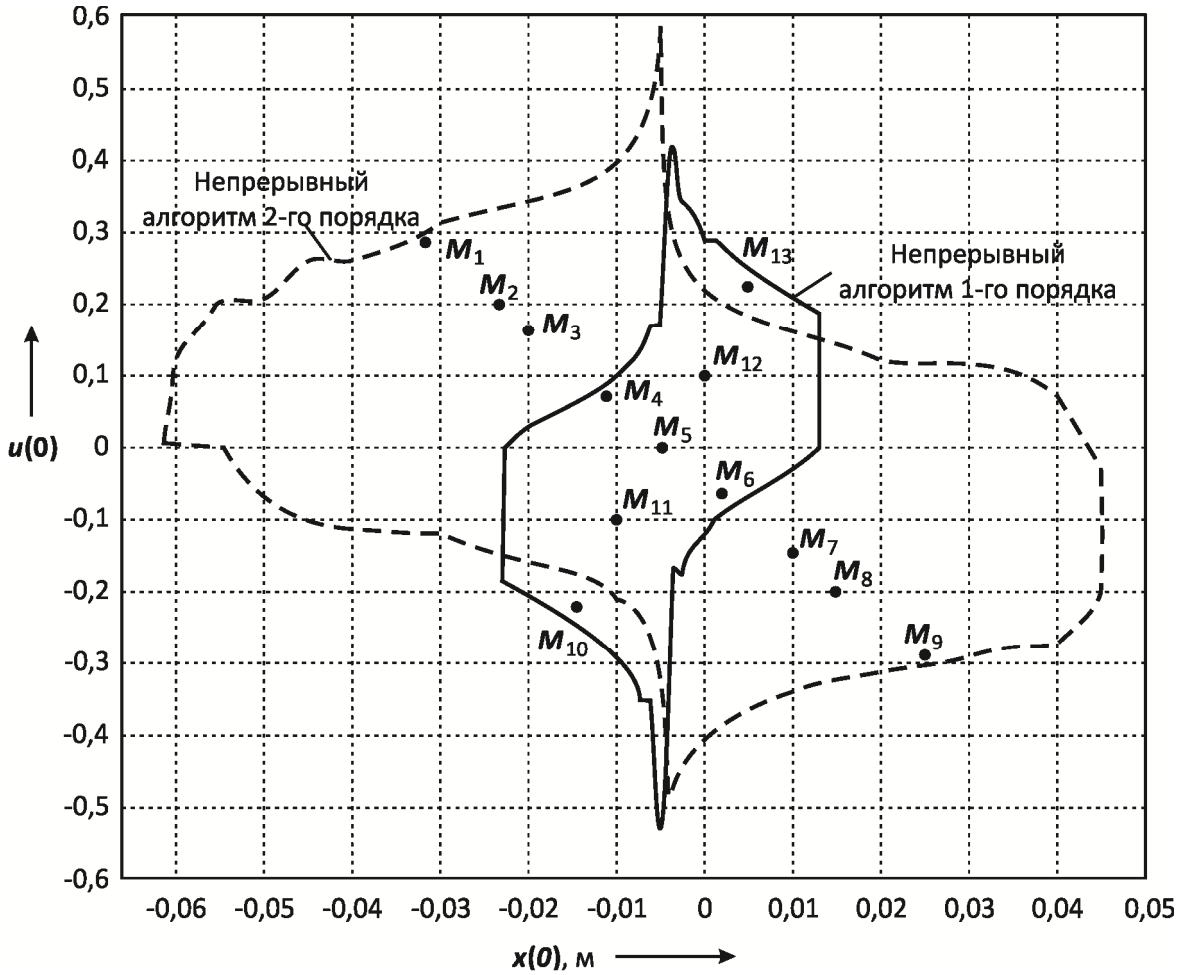


Рисунок 4 – Области устойчивости системы с непрерывными алгоритмами первого и второго порядка

Результаты моделирования переходных режимов в виде процессов изменения жесткости пневмоподвески в некоторых точках для систем с алгоритмами первого и второго порядка приведены на рисунках 5 и 6.

Для более полного анализа выделим на рисунке 4 несколько точек $M_i(u_i, x_i)$, $i = \overline{1, 13}$, координаты которых соответствуют начальным приближениям по управлению $u(0) = u_i$ и по координате $x(0) = x_i$ и получим переходные процессы системы в данных точках.

Алгоритмы полиномиальной аппроксимации оказались более эффективными, так как они не только расширяют область устойчивости системы, но и изменяют характер протекания переходных и установившихся процессов изменения управления $u(t)$ и жесткости пневмоподвески $c_п(t)$.

Для управления жесткостью пневмоподвески $c_п(t)$ в вибродиагностическом комплексе в качестве центрального процессора, усилительных и преобразующих устройств (АЦП и ЦАП) предлагается использовать технические средства (как аппаратные, так и программные) диагностического комплекса «Прогноз-1», достаточно широко применяемого при диагностировании устройств железнодорожного транспорта [3].

Из визуального анализа следует, что система, в которой реализован алгоритм второго порядка, характеризуется более широкой областью устойчивости.

Результаты моделирования переходных режимов в виде процессов изменения жесткости пневмоподвески в некоторых точках для систем с алгоритмами первого и второго порядка приведены на рисунках 5 и 6.

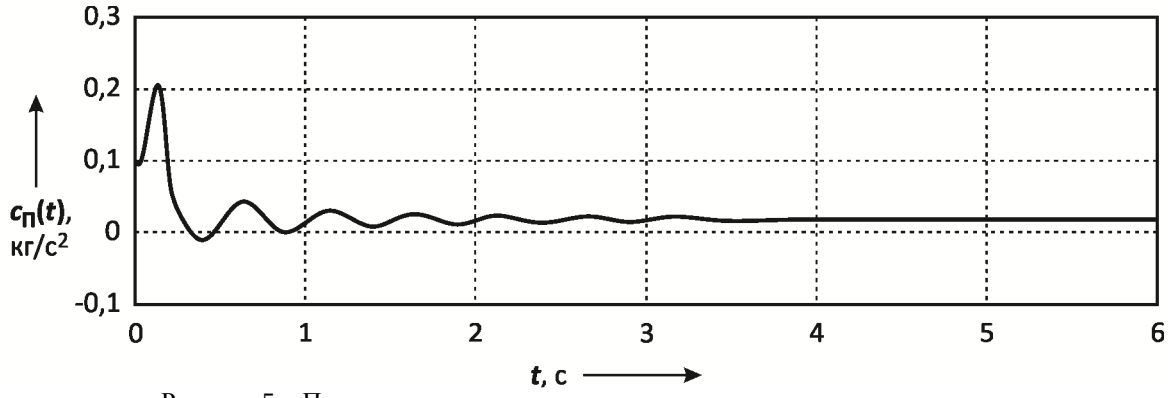


Рисунок 5 – Процесс изменения жесткости пневмоподвески в системе с алгоритмом первого порядка в точке $M_4(0,07;-0,012)$

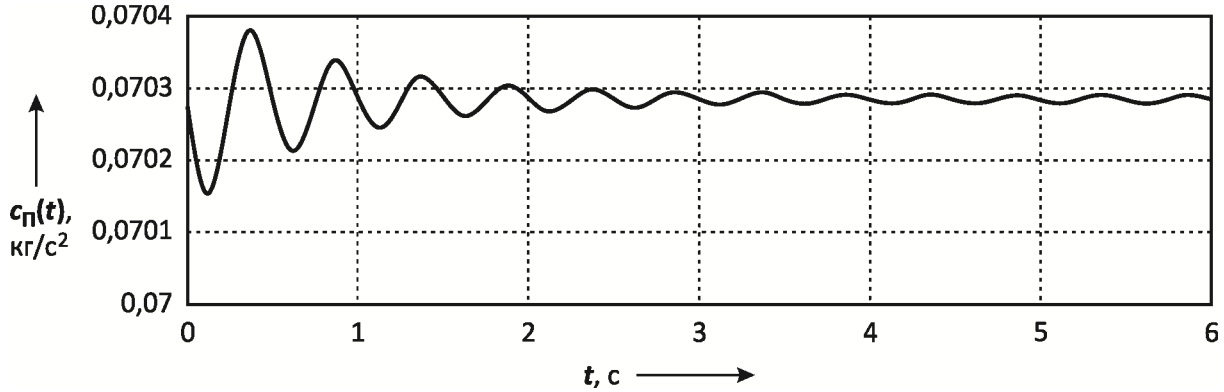


Рисунок 6 – Процесс изменения жесткости пневмоподвески в системе с алгоритмом второго порядка в точке $M_4(0,07;-0,012)$

Комплекс «Прогноз-1М» предназначен для определения технического состояния подшипников качения и зубчатых передач редукторных, буксовых, моторных и других узлов основных и вспомогательных машин подвижного состава путем обработки сигналов вибрации и частоты вращения.

Исследования, проведенные совместно с НИИ технологии, контроля и диагностики железнодорожного транспорта, подтвердили эффективность предлагаемых алгоритмов управления. Программное обеспечение разработанной системы принято в опытную эксплуатацию.

Список литературы

1. Алексеев, А. А. Идентификация и диагностика систем [Текст] / А. А. Алексеев, Ю. А. Кораблев, М. Ю. Шестопалов. – М.: Академия, 2009. – 352 с.

2. Ананьевский, И. М. Методы управления нелинейными механическими системами [Текст] / И. М. Ананьевский, Ф. Л. Черноусько, С. А. Решмин. – М.: Физматлит, 2006. – 328 с.

3. Молчанов, В. В. Новые технологии и оборудование контроля и диагностирования железнодорожной техники [Текст] / В. В. Молчанов, В. Г. Шахов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – № 4. – С. 116 – 120.

4. Ражковский, А. А. Технологический процесс контоля качества продукции при ремонте подвижного состава [Текст] / А. А. Ражковский, А. Г. Петракова, Т. Г. Бунькова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – № 2. – С. 42 – 48.

5. Пупков, К. А. Методы классической и современной теории автоматического управления. Синтез регуляторов систем автоматического управления [Текст] / К. А. Пупков, Н. Д. Егупов / МГТУ им. Н. Э. Баумана. – М., 2004. – Т. 3. – 616 с.

6. Когут, А. Т. Полиномиальная аппроксимация в некоторых задачах оптимизации и управления [Текст] / А. Т. Когут / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2003. – 243 с.

УДК 621.317

С. Н. Чижма, А. А. Лаврухин

АДАПТИВНЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ В ТРЕХФАЗНЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Описан метод определения прямой и обратной последовательностей основной гармоники напряжений и токов в трехфазных сетях систем электроснабжения, основанный на преобразовании Кларка и адаптивной фильтрации.

Несимметрия напряжений – состояние системы энергоснабжения трехфазного переменного тока, в которой среднеквадратические значения основных составляющих междуфазных напряжений или углы сдвига фаз между основными составляющими междуфазных напряжений не равны между собой (ГОСТ 13109-97). ГОСТ Р51317.4.30-2008 рекомендует оценивать несимметрию по величинам прямой и обратной последовательностей токов и напряжений, полученным с использованием метода симметричных составляющих.

В РД 153-34.0-15.502-2002 рекомендуется также определять величины прямой, обратной и нулевой последовательностей и коэффициенты несимметрии как напряжений, так и токов, а также мощности последовательностей для оценки параметров сети, в частности, дополнительных потерь мощности.

Наличие гармонических составляющих сигнала приводит к формированию дополнительных составляющих прямой и обратной последовательностей. Настоящая работа посвящена описанию метода определения прямой и обратной последовательностей основной гармоники, основанного на преобразовании Кларка и использовании адаптивных полосовых фильтров.

Преимуществом методов, альтернативных методу симметричных составляющих, в первую очередь является использование более простых матриц преобразований, но с сохранением возможности идентификации режима. Например, преобразование Кларка [1] дает возможность проводить измерения при изменении частоты сети, легко идентифицировать вид короткого замыкания, а также позволяет достаточно просто определять симметричные составляющие, сформированные высшими гармониками.

Векторы прямой и обратной последовательностей основной гармоники вращаются в противоположные стороны. Это свойство можно использовать для реализации алгоритма определения прямой и обратной последовательностей основной гармоники.

В соответствии с методом симметричных составляющих мгновенные значения прямой и обратной последовательностей соответственно, $x_{abc}^{+} = [x_a^{+} \quad x_b^{+} \quad x_c^{+}]^{\mathrm{T}}$ и $x_{abc}^{-} = [x_a^{-} \quad x_b^{-} \quad x_c^{-}]^{\mathrm{T}}$, определяются по следующим формулам [2]:

$$\begin{cases} x_{abc}^{+} = T_{+} \cdot x_{abc}; \\ x_{abc}^{-} = T_{-} \cdot x_{abc}, \end{cases} \tag{1}$$

где

$$T_{+} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ a^2 & 1 & a \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix}; \quad T_{-} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & a^2 & a \\ a & 1 & a^2 \\ a^2 & a & 1 \end{bmatrix}. \tag{2}$$

Здесь и далее обозначения «+» и «–» соответствуют прямой и обратной последовательностям.

Используя преобразование Кларка, векторы напряжения можно перевести из *abc*- в αβ-систему в соответствии с выражением:

$$x_{\alpha\beta} = [x_\alpha \quad x_\beta]^{\mathrm{T}} = T_{\alpha\beta} \cdot x_{abc}\,, \tag{3}$$

где

$$T_{\alpha\beta} = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}. \tag{4}$$

Мгновенные значения прямой и обратной последовательностей напряжения в αβ-системе могут быть вычислены так:

$$x^{+}_{\alpha\beta} = T_{\alpha\beta} \cdot x^{+}_{abc} = T_{\alpha\beta} \cdot T_{+} \cdot [T_{\alpha\beta}]^{\mathrm{T}} x_{\alpha\beta} = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} 1 & -q \\ q & 1 \end{bmatrix} x_{\alpha\beta}\,; \tag{5}$$

$$x^{-}_{\alpha\beta} = T_{\alpha\beta} \cdot x^{-}_{abc} = T_{\alpha\beta} \cdot T_{-} \cdot [T_{\alpha\beta}]^{\mathrm{T}} x_{\alpha\beta} = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} 1 & q \\ -q & 1 \end{bmatrix} x_{\alpha\beta}\,, \tag{6}$$

где $q = e^{-j\frac{\pi}{2}}$ – оператор сдвига во временной области, сдвигающий фазу сигнала на –90°. Для определения прямой и обратной последовательностей требуются устройства, сдвигающие фазу сигнала на –90°, в качестве которых можно использовать интеграторы. Функциональная схема такого устройства представлена на рисунке 1, где ППК и ОПК – прямое и обратное преобразования Кларка; ФАПЧ – система фазовой автоподстройки частоты; ФПП и ФОП – фильтры прямой и обратной последовательностей.

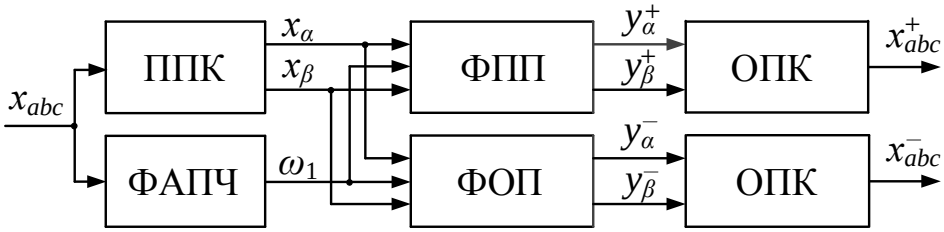


Рисунок 1 – Функциональная схема детектора прямой и обратной последовательностей

Для определения прямой и обратной последовательностей основной гармоники можно использовать фильтры нижних частот, однако в этом случае могут возникнуть погрешности вследствие наличия субгармоник и постоянной составляющей сигнала, появляющейся из-за нелинейных нагрузок. Лучший эффект для выделения основной гармоники дает применение полосно-пропускающих фильтров, настроенных на основную гармонику. Применение таких же фильтров для высших гармоник позволит определить последовательности, создаваемые этими гармониками.

Реальные сигналы в трехфазных сетях содержат, как правило, прямые и обратные последовательности основной частоты и высшие гармоники. Для сигналов, содержащих высшие гармоники, представим эти сигналы в виде [6]:

$$\underline{x}_{\alpha\beta}(t) = x_\alpha(t) + jx_\beta(t) = \sum_{n=1,3,\ldots}^{\infty}(\underline{X}^{+}_{n} e^{jn\omega_1 t} + (\underline{X}^{-}_{n}) e^{-jn\omega_1 t})\,, \tag{7}$$

где n – порядок гармоники; нижнее подчеркивание – знак векторной величины, записанной в комплексном виде; $\omega_1 = 2\pi f_1$ – частота основной гармоники. Ввиду малого влияния четных гармоник в реальных сетях электроснабжения рассматриваются только нечетные гармоники.

В том случае, если искомые (положительная, отрицательная) последовательности $\underline{y}^{+}_{\alpha\beta 1}$ и $\underline{y}^{-}_{\alpha\beta 1}$ определяются как выходные сигналы контуров с отрицательной обратной связью, входами которых являются исходные сигналы $\underline{x}_{\alpha\beta}$, соответствующие ошибки искомых последо-

вательностей $\underline{\varepsilon}^{+}_{\alpha\beta} = \underline{x}_{\alpha\beta} - \underline{y}^{+}_{\alpha\beta}$ и $\underline{\varepsilon}^{-}_{\alpha\beta} = \underline{x}_{\alpha\beta} - \underline{y}^{-}_{\alpha\beta}$ в контурах обратной связи должны быть минимизированы. Сигналы показаны на рисунке 2, где использованы обозначения: УВПП и УВОП – устройства выделения прямой и обратной последовательностей. Общую ошибку $\varepsilon_{\alpha\beta}$ по аналогии с сигналами (7) запишем в виде суммы гармонических составляющих:

$$\underline{\varepsilon}_{\alpha\beta}(t) = \varepsilon_{\alpha}(t) + j\varepsilon_{\beta}(t) = \sum_{n=1,3,...}^{\infty}(\underline{E}^{+}_{n}e^{jn\omega_1 t} + (\underline{E}^{-}_{n})e^{-jn\omega_1 t}). \quad (8)$$

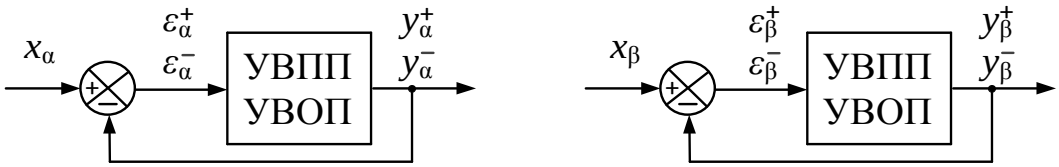


Рисунок 2 – Схемы определения прямых и обратных последовательностей в αβ-системе

Будем считать, что частота основной гармоники ω_1 известна, например, определяется с использованием ФАПЧ. Умножим сигнал $\underline{\varepsilon}_{\alpha\beta}(t)$ на вращающиеся единичные векторы $e^{-j\omega_1 t}$ и $e^{j\omega_1 t}$ (что эквивалентно переходу в синхронную *dq*-систему координат, вращающуюся с частотой основной гармоники), в результате чего компоненты, соответствующие прямой и обратной последовательностям основной гармоники, будут выделены в виде:

$$\underline{\varepsilon}_{\alpha\beta}(t)e^{-j\omega_1 t} = \underline{E}^{+}_{1} + \sum_{n=1,3..}^{\infty}(\underline{E}^{+}_{n}e^{j(n-1)\omega_1 t} + \underline{E}^{-}_{n}e^{-j(n+1)\omega_1 t}); \quad (9)$$

$$\underline{\varepsilon}_{\alpha\beta}(t)e^{j\omega_1 t} = \underline{E}^{-}_{1} + \sum_{n=1,3..}^{\infty}(\underline{E}^{+}_{n}e^{j(n-1)\omega_1 t} + \underline{E}^{-}_{n}e^{-j(n+1)\omega_1 t}). \quad (10)$$

Как можно заметить, при вычислении последовательностей основной гармоники соответствующие им ошибки в синхронной *dq*-системе координат являются постоянными составляющими [4]. Постоянная ошибка в системе с отрицательной обратной связью устраняется с помощью интегратора. Используя преобразование Лапласа, переведем описание системы из временной в комплексную область, при этом работа преобразователя будет описываться выражениями:

$$\underline{y}^{+}_{\alpha\beta 1}(p + j\omega_1) = \underline{\varepsilon}^{+}_{\alpha\beta}(p + j\omega_1)\frac{K_I}{p}; \quad (11)$$

$$\underline{y}^{-}_{\alpha\beta 1}(p - j\omega_1) = \underline{\varepsilon}^{-}_{\alpha\beta}(p - j\omega_1)\frac{K_I}{p}. \quad (12)$$

Для повышения точности определения последовательностей в условиях, когда частота ω_1 известна не точно, вместо идеального интегратора с передаточной функцией K_I/p применяется звено $(K_I\omega_b)/(p-\omega_b)$. Параметр ω_b определяет добротность фильтра и допустимый диапазон изменения частоты основной гармоники. Выражения (11) и (12) в этом случае, после замены p на $p - j\omega_1$ и $p + j\omega_1$ соответственно, примут вид:

$$\underline{y}^{+}_{\alpha\beta 1}(p) = \underline{\varepsilon}_{\alpha\beta}(p)\frac{K_I}{p - j\omega_1 + \omega_b}; \quad (13)$$

$$\underline{y}^{-}_{\alpha\beta 1}(p) = \underline{\varepsilon}_{\alpha\beta}(p)\frac{K_I}{p - j\omega_1 + \omega_b}. \quad (14)$$

Перепишем уравнения (13), (14) в пространстве переменных состояния:

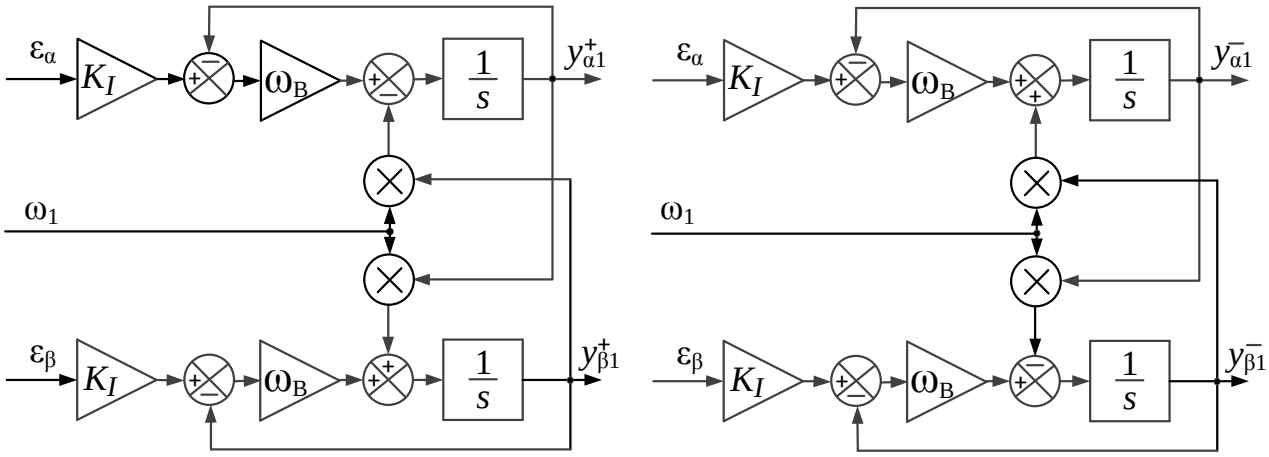
$$y_{\alpha 1}^{+}(p)=\frac{1}{p}\left[\omega_b\left(K_I\varepsilon_\alpha(p)-y_{\alpha 1}^{+}(p)\right)-\omega_1 y_{\beta 1}^{+}(p)\right]; \quad (15)$$

$$y_{\beta 1}^{+}(p)=\frac{1}{p}\left[\omega_b\left(K_I\varepsilon_\beta(p)-y_{\beta 1}^{+}(p)\right)+\omega_1 y_{\alpha 1}^{+}(p)\right]; \quad (16)$$

$$y_{\alpha 1}^{-}(p)=\frac{1}{p}\left[\omega_b\left(K_I\varepsilon_\alpha(p)-y_{\alpha 1}^{-}(p)\right)+\omega_1 y_{\beta 1}^{-}(p)\right]; \quad (17)$$

$$y_{\beta 1}^{-}(p)=\frac{1}{p}\left[\omega_b\left(K_I\varepsilon_\beta(p)-y_{\beta 1}^{-}(p)\right)-\omega_1 y_{\alpha 1}^{-}(p)\right]. \quad (18)$$

Структурная схема системы, реализующей эти выражения, показана на рисунке 3.



а б

Рисунок 3 – Схемы устройств выделения прямой (а) и обратной (б) последовательностей с расширенными частотными характеристиками

Решение системы, составленной из уравнений (15) – (18) при допущении, что $\omega_b << \omega_1$, примет следующий вид:

$$y_{\alpha 1}^{+}(p)=\frac{K\omega_b p}{p^2+2\omega_b p+\omega_1^2}\varepsilon_\alpha(p)+\frac{-K\omega_b\omega_1}{p^2+2\omega_b p+\omega_1^2}\varepsilon_\beta(p); \quad (19)$$

$$y_{\beta 1}^{+}(p)=\frac{K\omega_b\omega_1}{p^2+2\omega_b p+\omega_1^2}\varepsilon_\alpha(p)+\frac{K\omega_b p}{p^2+2\omega_b p+\omega_1^2}\varepsilon_\beta(p); \quad (20)$$

$$y_{\alpha 1}^{-}(p)=\frac{K\omega_b p}{p^2+2\omega_b p+\omega_1^2}\varepsilon_\alpha(p)+\frac{K\omega_b\omega_1}{p^2+2\omega_b p+\omega_1^2}\varepsilon_\beta(p); \quad (21)$$

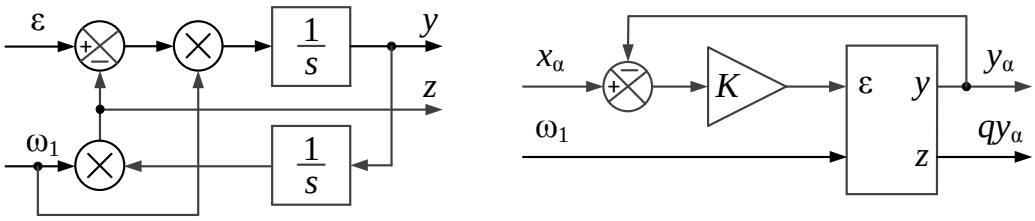
$$y_{\beta 1}^{-}(p)=\frac{-K\omega_b\omega_1}{p^2+2\omega_b p+\omega_1^2}\varepsilon_\alpha(p)+\frac{K\omega_b p}{p^2+2\omega_b p+\omega_1^2}\varepsilon_\beta(p). \quad (22)$$

Для реализации полосно-пропускающих фильтров в соответствии с представленными выражениями можно использовать интегратор амплитуды сигнала, настроенный на частоту основной гармоники, схема которого приведена на рисунке 4,а, а передаточная функция имеет вид:

$$W(p)=\frac{\omega_1 p}{p^2+\omega_1^2}, \quad (23)$$

где ω_1 – резонансная частота, равная 50 Гц.

Дополнив схему обратной связью (рисунок 4,б), получаем полосно-пропускающий фильтр (ППФ), настроенный на частоту ω_1.



а б

Рисунок 4 – Структурная схема интегратора (а) и ППФ (б)

Передаточные функции ППФ по первому (основному) выходу y_α и второму (имеющему задержку по фазе –90°) определяются выражениями:

$$W_{\text{ППФ}}(p) = \frac{y_\alpha}{x_\alpha} = \frac{K\omega_1 p}{p^2 + K\omega_1 p + \omega_1^2}; \tag{24}$$

$$W_{\text{ППФ-q}}(p) = \frac{qy_\alpha}{x_\alpha} = \frac{K\omega_1^2}{p^2 + K\omega_1 p + \omega_1^2}. \tag{25}$$

Устройство, схема которого представлена на рисунке 4, имеет ряд особенностей, которые позволяют его использовать для контроля характеристик напряжения энергосистемы:

если значения ω_1 и K выбраны должным образом, то y_α будет стремиться к синусоидальному виду и будет соответствовать основной составляющей x_α;

сигнал qy_α будет сдвинут по фазе на –90° от x_α, что может быть использовано для определения симметричных составляющих в трехфазных системах;

частота резонанса ППФ может быть установлена как начальная частота ФАПЧ в случае применения адаптации к изменению частоты входного сигнала, которую необходимо использовать в сетях электроснабжения.

Как можно заметить, полученные передаточные функции (24) и (25) структурно имеют такой же вид, как и передаточные функции (19) – (22), соответствующие схемам выделения прямой и обратной последовательностей. Поэтому структурная схема устройства получения последовательностей может быть составлена на основе ППФ, как это показано на рисунке 5.

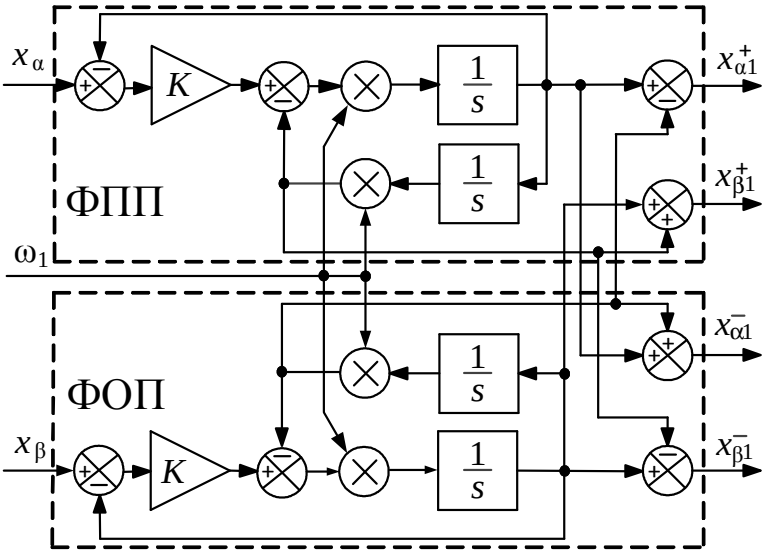


Рисунок 5 – Структурная схема устройства для определения прямой (а) и обратной (б) последовательностей на базе ППФ и преобразователей Кларка

В устройстве использованы один прямой и два обратных преобразователя Кларка, два фильтра и четыре сумматора. В предложенной схеме легко осуществляется синхронизация с частотой входного сигнала при различных искажениях, в том числе при наличии высших гармоник. Расчет симметричных составляющих в $\alpha\beta$-системе делает возможным использование только двух ППФ, что уменьшает вычислительную нагрузку по сравнению с расчетами в *abc*-системе, где необходимы три ППФ.

Частотные характеристики для устройств выделения прямой и обратной последовательностей при двух значениях $\omega_в$ представлены на рисунке 6. Ширина полосы пропускания фильтра увеличивается при уменьшении значения $\omega_в$, что позволяет повысить устойчивость при небольших изменениях частоты относительно ее определенного с помощью ФАПЧ значения.

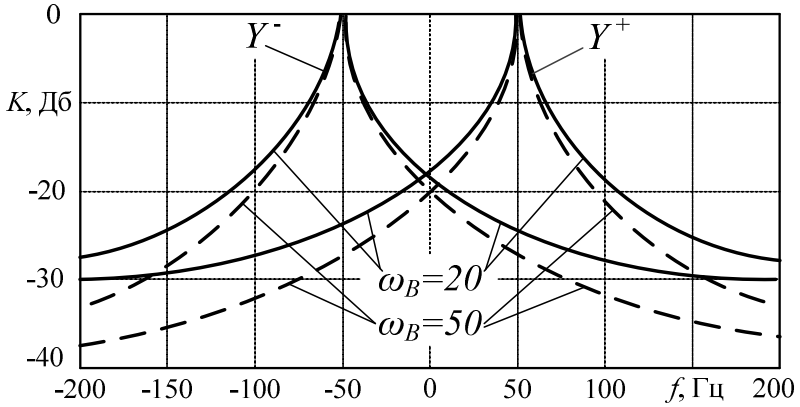


Рисунок 6 – АЧХ устройства для определения прямой и обратной последовательностей при двух различных параметрах $\omega_в$

Можно заметить, что оба фильтра – прямой и обратной последовательностей – имеют единичное усиление и нулевой частотный сдвиг на центральной частоте. Уменьшая ширину частотного диапазона ω_b, увеличивая коэффициент затухания для других составляющих частот, увеличиваем быстродействие системы. Изменение этого параметра является компромиссом, поэтому при практической реализации необходим подбор ω_b.

Для определения параметров устройства контроля симметричных составляющих было проведено моделирование при сбалансированных и несимметричных условиях энергосистемы и девиации частоты. Главной целью исследования является определение погрешностей и быстродействия системы.

Работа системы при симметричном режиме. Процесс изменения амплитуды трехфазного сигнала, прямой и обратной последовательностей при симметричном режиме работы показан на рисунке 7. Моделируется сбалансированное искажение, при котором сигнал увеличивается до 140 % от номинального значения. Особенность сбалансированных искажений – отсутствие обратной последовательности напряжений энергосистемы во время искажения [5].

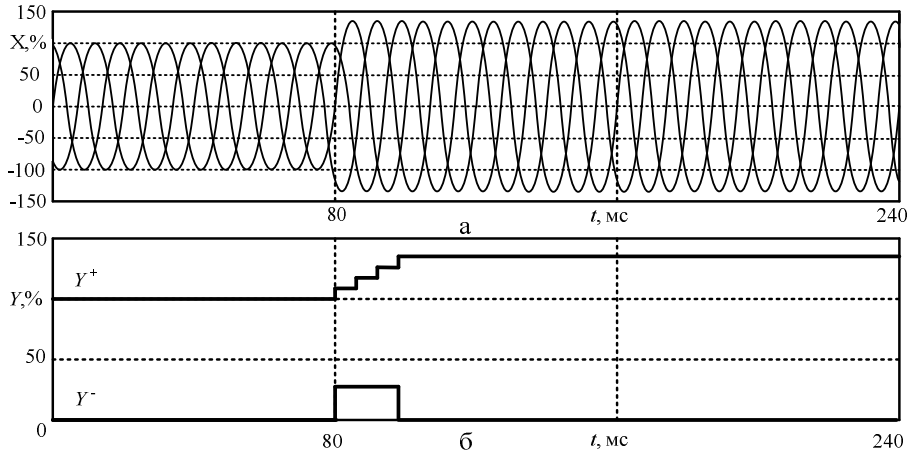


Рисунок 7 – Результаты моделирования системы при сбалансированном искажении; увеличение амплитуды входного трехфазного сигнала (а); прямая и обратная последовательности (б)

Работа системы при несимметричном режиме. Работа устройства контроля симметричных составляющих в ситуации неуравновешенных условий энергосистемы представлена на рисунке 8. В этой ситуации амплитуда двух напряжений энергосистемы уменьшилась, а в их фазах произошел скачок. Как показано на рисунке 8,а, в этой ситуации появляется обратная последовательность. Небольшой переходный процесс наблюдается в форме волны прямой последовательности, в то время как немного более длительные колебания появляются в форме волны обратной последовательности.

Работа системы при отклонении частоты. На рисунке 8,б показано снижение частоты на 3 Гц в момент времени, соответствующий 80 мс. Это снижение обрабатывается ФАПЧ, который приблизительно за три периода основной частоты обнаруживает новое значение частоты.

Разработан метод определения прямой и обратной последовательностей основной гармоники на основании преобразования Кларка.

Предложена структура адаптивных фильтров прямой и обратной последовательностей основной гармоники, обладающих высокой разрешающей способностью.

Составлена математическая модель и проведено моделирование метода и системы определения прямой и обратной последовательностей основной гармоники, которое показало удовлетворительные статические и динамические характеристики.

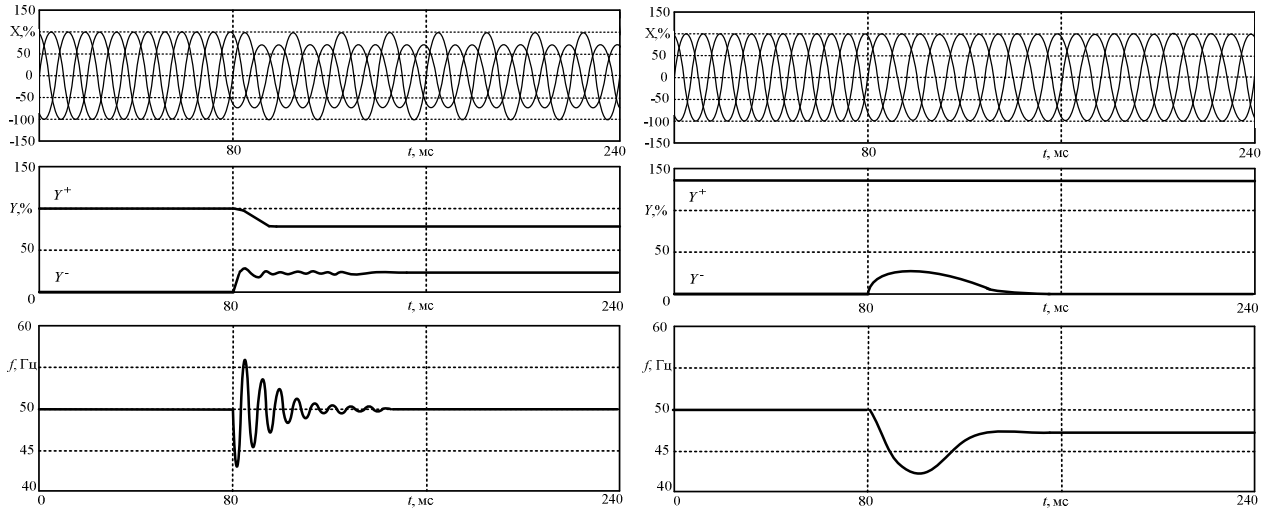


Рисунок 8 – Результаты моделирования: а – при появлении несимметрии; б – при изменении частоты; верхний график – входной сигнал, средний график – выходной сигнал, нижний график – выходной сигнал ФАПЧ

Список литературы

1. Clarke, E. Circuit Analysis of A-C Power Systems [Текст] / E. Clarke. – Vol. I // Symetricaland Related Componentes, John Wiley and Sons, 1943.

2. Bollen, M. Signal processing of power quality disturbances [Текст] / M. Bollen, I. Gu // Wiley Interscience. – 2006. – 882 p.

3. Kazmierkowski, M. P. Automatic control of converter-fed drivers [Текст] / M. P. Kazmierkowski, H. Tunia // PWN-polish scientific publishers. – Amsterdam, 1994. – 559 p.

4. Wang, F. High performance stationary frame filters for symmetrical sequences or harmonics separation under a variety of grid conditions [Текст] / F. Wang, M. Benhabib and others // IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2009. – P. 1570 – 1576.

5. Rodriguez, P. Grid synchronization of power converters using multiple second order generalized integrators [Текст] / P. Rodriguez, A. Luna and others / IEEE Industrial Electronics Conference (IECON), 2008. – P. 755 – 760.

УДК 625.143.482

В. В. Атапин

ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ УСЛОВИЙ И РЕЗЕРВА ПОПЕРЕЧНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ В КРИВЫХ УЧАСТКАХ БЕССТЫКОВОГО ПУТИ ПРИ ОТСТУПЛЕНИЯХ ОТ НОРМ СОДЕРЖАНИЯ В ПЛАНЕ

В статье рассматривается пример реализации методики оценки условий и резерва поперечной устойчивости в кривых участках бесстыкового пути при отступлениях от норм содержания в плане. Приводятся результаты исследований данной методики, описывается ее положительный эффект.

Методика оценки условий и резерва поперечной устойчивости в кривых участках бесстыкового пути при отступлениях от норм содержания в плане подробно описана в статье [1]. Сущность данной методики заключается в следующем.

Известно, что кривизна железнодорожного пути и соответствующий ей радиус кривой оказывают влияние на поперечную устойчивость бесстыкового пути в процессе эксплуатации. Кроме того, в статье [1] доказано и обосновано, что принятые до настоящего времени в качестве единственного показателя оценки состояния пути в плане и разграниченные по установленным скоростям движения поездов разности смежных стрел изгиба при различных расстояниях между их вершинами на ленте не могут быть использованы для определения и оценки условий и резерва поперечной устойчивости бесстыкового пути. Это связано прежде всего с тем, что данный показатель был определен еще до 1957 г. и установлен для загруженного звеньевого пути как показатель плавности движения поездов в сечении, где боковые и рамные силы ведущей оси экипажа взаимодействуют с рельсом. Использование только этого показателя для оценки условий и резерва поперечной устойчивости бесстыкового пути в кривых участках неправильно и некорректно по следующим причинам:

экспериментально доказано, что расчетным сечением для бесстыкового пути является незагруженный путь, и это отражено во всех технических указания (ТУ);

полученные нормы превышений температур [Δt_y] экспериментально установлены также для незагруженного пути и приняты как функция от радиуса кривых [2] и др.

Известно, что в настоящее время кривизна железнодорожного пути и соответствующий ей радиус кривой измеряются путеизмерительными средствами, в основном вагонами-путеизмерителями. Однако кривизна, получаемая данными средствами, является текущей (мгновенной) и не может быть использована для оценки условий устойчивости бесстыкового пути в кривых участках пути. Необходимо использовать ее осредненные значения.

Таким образом, в результате проведенного исследования было установлено [1], что для оценки и резерва поперечной устойчивости в кривых участках бесстыкового пути при отступлениях от норм содержания в плане необходимо использовать значения кривизны железнодорожного пути, осредненные на длине, равной 4 и 20 м.

Кривизна, осредненная в кривых на длине 20 м и называемая базовой длиной, объясняется тем, что она формируется в процессе укладки рельсошпальной решетки и поддерживается рихтовкой в процессе эксплуатации пути по показаниям вагонов-путеизмерителей. При этой кривизне формируется начальное напряженное состояние рельсовых плетей и происходит его изменение при изменении температуры рельсовых плетей в процессе эксплуатации. Именно поэтому базовую кривизну можно считать как систему отсчета, относительно которой можно определять изменение кривизны на локальных участках при текущем содержании пути. Длина осреднения кривизны 20 м обосновывается также базой вагонов-путеизмерителей (17 м), принятой по конструктивным соображениям, длиной хорды для измерения вагоном-путеизмерителем параметров кривых (21,5 м), а также пересчетом замеренных значений параметров кривых к хорде длиной 20 м.

Кривизна, осредненная в кривых на длине 4 м и называемая длиной короткой неровности, экспериментально обосновывается и доказывается в исследованиях венгерских ученых, получивших значения длины упругих изгибов рельсошпальной решетки в плоскости пути при нагреве рельсовых плетей в кривых различных радиусов [1, 3]. Именно поэтому на данной длине происходит начальное зарождение и развитие отступлений в плане, а значит, и необходимость осреднения измеренной (мгновенной) кривизны и выявления данных неровностей с целью дальнейшего определения условий и резерва поперечной устойчивости.

Следовательно, для определения и оценки условий и резерва поперечной устойчивости в кривых участках бесстыкового пути при отступлениях от норм содержания в плане первоначально с помощью путеизмерительных средств непрерывно измеряют кривизну рельсовых плетей в плоскости железнодорожного пути.

Далее на основании измеренной (мгновенной) кривизны определяют осредненную кривизну в пределах круговой кривой на базовой длине, т. е. на длине 20 м, и осредненную кривизну на заданной длине короткой неровности, т. е. на длине 4 м.

Затем определяют максимальные по амплитуде значения осредненной кривизны в пределах круговой кривой на базовой длине и максимальные значения осредненной кривизны в пределах круговой кривой на заданной длине короткой неровности.

Далее вычисляют для каждой круговой кривой расчетную минимальную температуру закрепления рельсовых плетей (*min* $t_з$) по формуле:

$$\min t_з = t_{\max} - [\Delta t_у]. \quad (1)$$

Потом, зная, что максимальное значение кривизны, осредненной на длине короткой неровности, т. е. на длине 4 м, является местом с наименьшим значением радиуса кривой и ослабляющим поперечную устойчивость пути, а максимальное значение осредненной кривизны на длине 20 м – базой для отсчета, рассчитывают отклонение фактической температуры закрепления рельсовых плетей от первоначальной ($\Delta t_{рих}$) по формулам:

$$\Delta t_{рих} = K_{эп} \cdot 9360(K_{КН} - K_{БДН}) = K_{эп} \cdot 9360(K_{4м} - K_{20м}) \quad (2)$$

или

$$\Delta t_{рих} = K_{эп} \cdot 9360\left(\frac{1}{R_{КН}} - \frac{1}{R_{БДН}}\right) = K_{эп} \cdot 9360\left(\frac{1}{R_{4м}} - \frac{1}{R_{20м}}\right), \quad (3)$$

где $K_{эп}$ – коэффициент, учитывающий количество шпал на один километр пути. Принимается равным единице при $R \leq 1200$ м и 0,92 при $R > 1200$ м.

Далее определяют новую фактическую температуру закрепления рельсовых плетей ($t_{о.рих}$) по формуле:

$$t_{о.рих} = t_з - \Delta t_{рих}. \quad (4)$$

Затем проверяют условие устойчивости круговой кривой

$$t_{о.рих} \geq \min t_з \quad (5)$$

и находят температурный резерв поперечной устойчивости бесстыкового пути в пределах круговой кривой ($\Delta\Delta t_{рих}$) по формуле:

$$\Delta\Delta t_{рих} = t_{о.рих} - \min t_з. \quad (6)$$

Затем судят о состоянии рельсошпальной решетки бесстыкового железнодорожного пути.

Рассмотрим пример реализации данной методики.

Место укладки кривой: направление Рязань – Инза, участок Воеводской – Качелай Куйбышевской железной дороги, путь – 1,655 км; административная структура – ПЧ-20/ ПЧУ-3/ПД-3/ПДБ-3; установленные скорости – 100/80/60 км/ч. Конструкция пути: рельсовые плети из рельсов Р65, шпалы железобетонные, балласт щебеночный, рельсовые плети уложены и закреплены на шпалах при температуре $t_з$ = 34 ºС, радиус кривой по паспорту ($R_п$) – 649 м, ожидаемая летняя температура для оценки резерва поперечной устойчивости бесстыкового пути $t_{ож} = t_{max}$ = 58 ºС, допускаемое повышение температуры рельсовых плетей (из таблицы П.2.1 [1]) $[\Delta t_у]$ = 44 ºС, интервалы осреднения кривизны (мгновенной) пути – 4 и 20 м. Все данные взяты по состоянию на июнь 2012 г.

Первоначально непрерывно измеряют кривизну (мгновенную) рельсовых плетей в плоскости пути с помощью вагона-путеизмерителя КВЛ-П2.1. Замеренная кривизна рельсовых плетей приведена на рисунке 1.

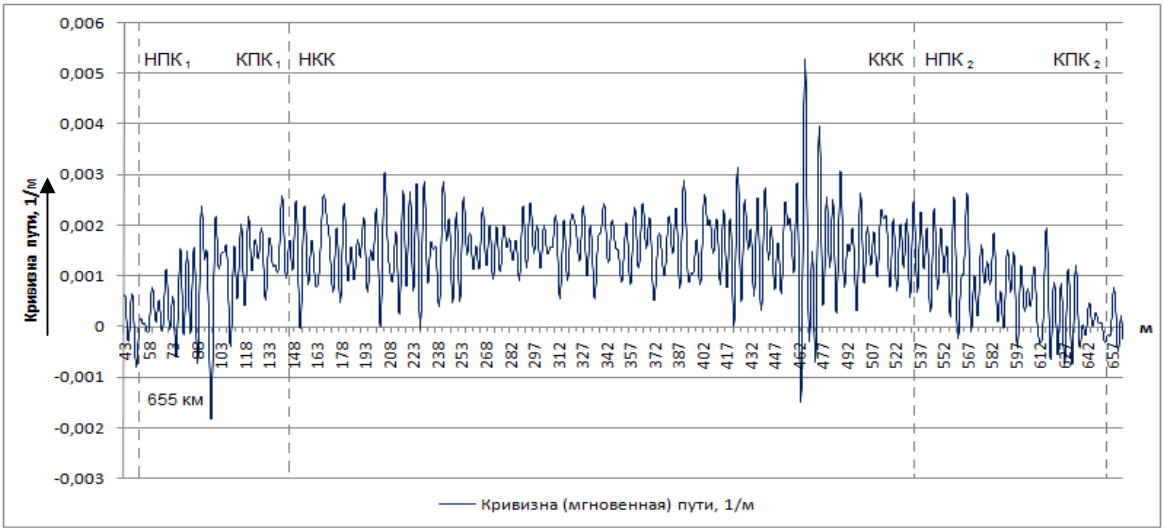


Рисунок 1 – Кривизна (мгновенная) рельсовых плетей в плоскости пути, измеренная на участке Воеводское – Качелай (путь 1) с помощью вагона-путеизмерителя КВЛ-П2.1

Определяют осредненную кривизну рельсовых плетей на длине короткой неровности, т. е. на длине 4 м, и осредненную кривизну рельсовых плетей на длине базовой неровности, т. е. на длине 20 м (рисунок 2).

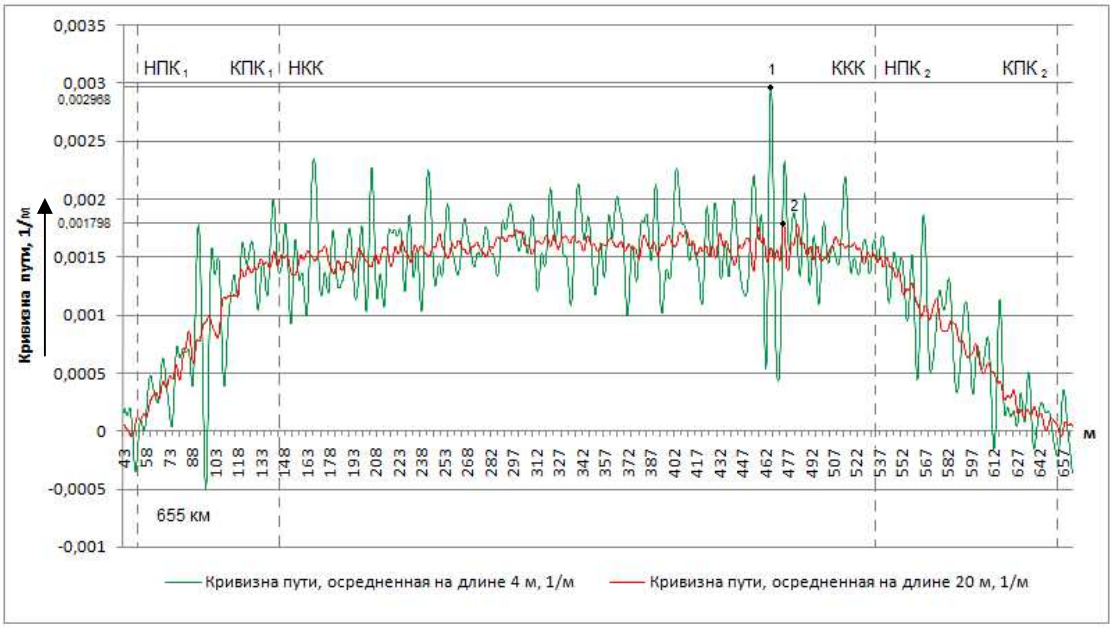


Рисунок 2 – Кривизна рельсовых плетей в плоскости пути, полученная путем осреднения мгновенной кривизны на длине 4 и 20 м на участке Воеводское – Качелай (путь 1)

Зная, что на поперечную устойчивость бесстыкового пути при отступлениях от норм содержания в плане оказывают влияние места с наибольшей кривизной или наименьшим значением радиуса, определим данные места [4]. Максимальная кривизна рельсовых плетей в пределах круговой кривой при осреднении на длине 4 м ($K_{4м}$) находится в точке 1 и равна 0,002968 1/м (см. рисунок 2), что соответствует радиусу $R_{4м}$, полученному по данной кривизне, равному 337 м (рисунок 3). Максимальная кривизна рельсовых плетей в пределах круговой кривой при осреднении на длине 20 м ($K_{20м}$) находится в точке 2 и равна 0,001798 1/м (см. рисунок 2), что соответствует радиусу $R_{20м}$, полученному по данной кривизне, равному 556 м (см. рисунок 3).

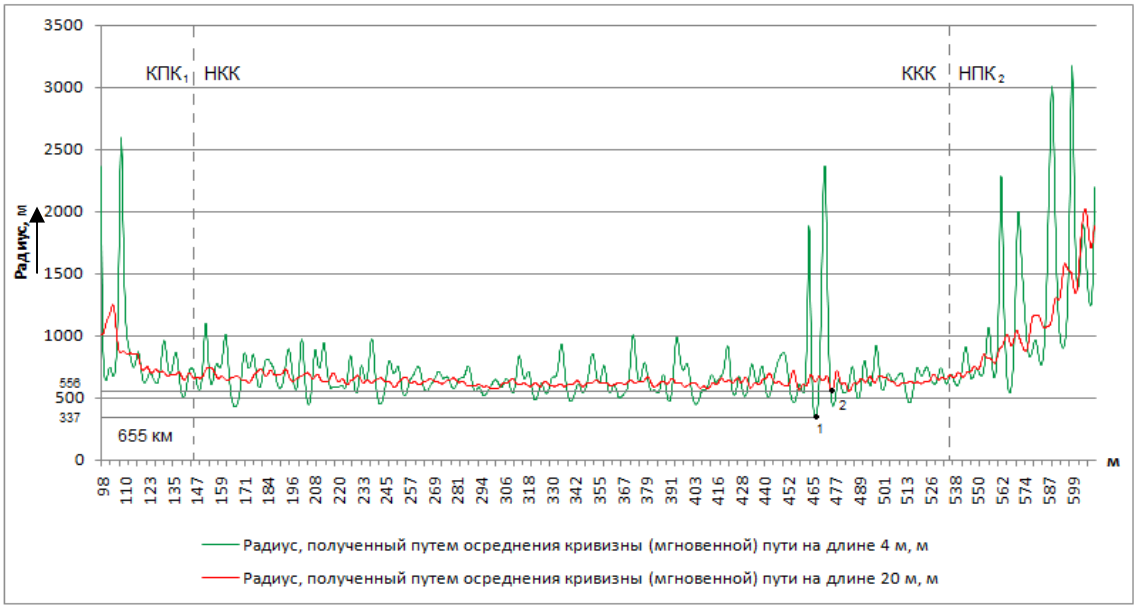


Рисунок 3 – Радиус круговой кривой, полученный по кривизне рельсовых плетей, осредненной на длине 4 и 20 м, на участке Воеводское – Качелай (путь 1)

Далее определяют для рассматриваемой круговой кривой расчетную минимальную температуру закрепления рельсовых плетей по формуле (1):

$$\min t_з = 58 - 44 = 14\,(°C).$$

Затем определяют отклонение фактической температуры закрепления рельсовых плетей в пределах круговой кривой по следующим формулам (2):

$$\Delta t_{рих} = 1 \cdot 9360(0,002968 - 0,001798) = 11,0\ \ (°C)$$

или

$$\Delta t_{рих} = 1 \cdot 9360(\frac{1}{337} - \frac{1}{556}) = 11,0\ \ (°C).$$

Определяют новую фактическую температуру закрепления рельсовых плетей в пределах круговой кривой по формуле (3):

$$t_{о.рих} = 34 - 11 = 23\ \ (°C).$$

А затем проверяют условие устойчивости круговой кривой, исходя из неравенства (5):

23 (°C) > 14 (°C), условие выполняется.

Далее вычисляют температурный резерв поперечной устойчивости бесстыкового пути в пределах круговой кривой, определяемый по формуле (6),

$$\Delta\Delta t_{рих} = 23 - 14 = 9\ \ (°C)$$

и судят о состоянии рельсошпальной решетки бесстыкового железнодорожного пути.

В данном примере наглядно видно, что условие устойчивости в пределах исследуемой круговой кривой выполняется, температурный резерв $\Delta\Delta t_{рих}$ составляет 9 °С. К тому же, положительный эффект данной методики заключается и в том, что определение осредненной кривизны на длине 4 м (длина короткой неровности) способствует выявлению реально существующего участка (места) кривой с наибольшей кривизной (т. е. с наименьшим радиусом), которая оказывает непосредственное воздействие на поперечную устойчивость бесстыкового пути, а определение осредненной кривизны на длине 20 м является базой для отсчета максимальной кривизны.

Помимо этого примера в таблице 1 представлены результаты исследований других кривых Куйбышевской железной дороги, в которых на основании данной методики была произведена проверка условия устойчивости бесстыкового пути и подсчитан температурный резерв.

Таблица 1 – Результаты исследований

Номер п/п	Участок	$R_п$, м	Осредненная кривизна пути, 1/м		$t_з$, °С	min $t_з$, °С	$\Delta t_{рих}$, °С	$t_{о.рих}$, °С	Условие устойчивости $t_{о.рих} \geq$ min $t_з$	$\Delta\Delta t_{рих}$, °С
			$К_{4м}$	$К_{20м}$						
1	Октябрьск – Правая Волга (1 путь)	615	0,002316	0,001884	34	18	4,0	30,0	30,0 > 18 (выполн.)	12,0
2	Балашейка – Новообразцовое (1 путь)	504	0,002803	0,002106	36	20	6,5	29,5	29,5 > 20 (выполн.)	9,5
3	Вырыпаевка – Базарная (путь 1)	654	0,002853	0,001766	33	15	10,2	22,8	22,8 > 15 (выполн.)	7,8
4	Барыш – Поливаново (путь 1)	1081	0,001917	0,001181	35	9	6,9	28,1	28,1 > 9 (выполн.)	19,1
5	Вырыпаевка – Базарная (путь 1)	599	0,002319	0,001826	33	16	4,6	28,4	28,4 > 16 (выполн.)	12,4
6	Кузоватово – Безводовка (путь 2)	852	0,002359	0,001395	35	11	9,0	26,0	26,0 > 11 (выполн.)	15,0
7	Кузоватово – Безводовка (путь 2)	1070	0,002618	0,001181	35	9	13,4	21,6	21,6 > 9 (выполн.)	12,6
8	Безводовка – Рачейка (путь 2)	943	0,002347	0,001243	32	13	10,3	21,7	21,7 > 13 (выполн.)	8,7
9	Рачейка – Балашейка (путь 2)	739	0,002521	0,001579	34	15	8,8	25,2	25,2 > 15 (выполн.)	10,2
10	Балашейка – Новообразцовое (путь 2)	600	0,002905	0,002002	35	18	8,4	26,6	26,6 > 18 (выполн.)	8,6

Таким образом, на основании полученных результатов исследования можно сделать вывод о том, что использование представленной методики помогает достаточно легко и просто определить состояние рельсовых плетей в кривых участках бесстыкового железнодорожного пути при отступлениях от норм содержания в плане, а точнее:

– рассчитать отклонение фактической температуры закрепления рельсовых плетей от первоначальной;

– вычислить новую фактическую температуру закрепления рельсовых плетей;

– проверить условие устойчивости бесстыкового железнодорожного пути;

– определить температурный резерв устойчивости.

Кроме того, применение данной методики на всем полигоне бесстыкового железнодорожного пути позволит не только заблаговременно определять с точностью до метра то место, где произошло ослабление поперечной устойчивости бесстыкового пути, и осуществлять постоянный контроль за изменениями фактической температуры закрепления рельсовых плетей при отступлениях от норм содержания в плане, но и решать с ее помощью следующие задачи:

– выделять и ранжировать участки с отступлениями от норм содержания в плане по степени опасности;

– принимать в случае необходимости меры по устранению ослабления поперечной устойчивости бесстыкового пути;

– накапливать полученную информацию и на основании ее делать прогноз о состоянии рельсовых плетей бесстыкового железнодорожного пути и др.

Список литературы

1. Атапин, В. В. Методика оценки условий и резерва поперечной устойчивости в кривых участках бесстыкового пути при отступлениях от норм содержания в плане [Текст] / В. В. Атапин / Вестник транспорта Поволжья. – 2012. – Вып. 1 (24). – С. 47 – 52.

2. Технические указания по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути [Текст] / МПС России. – М.: Транспорт, 2000. – 96 с.

3. Надь, И. Исследования явлений, вызываемых температурными напряжениями в бесстыковом пути [Текст]: Пер. с венг./ И. Надь. – М., 1976.

4. Ершов, В. В. Устойчивость бесстыкового пути при отступлениях от норм содержания [Текст] / В. В. Ершов // Путь и путевое хозяйство. – 2008. – № 3 – С. 13 – 15.

УДК 625.143:620.19

В. П. Кутовой, А. П. Шабанов, М. М. Шакиртов

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЕРШИНЫ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ В ГОЛОВКЕ РЕЛЬСА

Рассмотрена возможность развития усталостных трещин в поле внешних сжимающих напряжений. Построена конечноэлементная модель, имеющая узкий трещиноподобный дефект с вершинами, очерченными по окружности, которая нагружалась пульсирующей сжимающей нагрузкой. Анализировалось напряженно-деформированное состояние в вершине этого дефекта по истечению каждого полуцикла нагружения. Показано, что такая нагрузка вызывает в исследуемой области симметричный цикл нагружения с существенными сжимающими и растягивающими напряжениями. В процессе роста количества циклов нагружения абсолютная величина этих напряжений увеличивается. Полученные результаты позволяют построить возможные схемы развития контактно-усталостных и усталостных повреждений в рельсах.

Наиболее опасные дефекты, возникающие в процессе эксплуатации рельса, имеют усталостный и контактно-усталостный характер. Как правило, эти трещины появляются в тех зонах рельса, которые нагружены преимущественно сжимающими напряжениями. К таким повреждениям можно отнести, например, трещины по рисункам 11, 21 и другие в работах [1,2] (рисунки 1, 2).

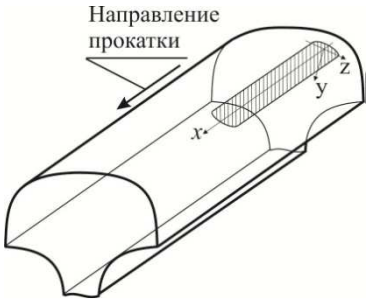


Рисунок 1 – Продольная подповерхностная трещина по рисунку 11 располагается на глубине около 10 мм и развивается в направлении прокатки

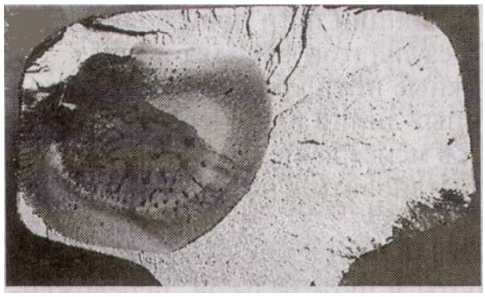


Рисунок 2 – Поперечная трещина по рисунку 21 занимает ту часть головки рельса, в которой действуют максимальные сжимающие напряжения от поперечного изгиба

В настоящее время не существует адекватных и непротиворечивых теорий, объясняющих механизмы возникновения и развития этих дефектов. В основу существующих моделей положены классические представления механики разрушения, согласно которым усталостная трещина может развиваться, если в цикле внешней нагрузки обязательно присутствуют растягивающие нормальные напряжения. Поэтому, в частности, чтобы объяснить причину возникновения и развития дефекта по рисунку 21, предлагается наряду со сжимающими циклическими напряжениями от контактного взаимодействия и незначительными растягивающими напряжениями от обратного изгиба (которые из за малости не могут быть причиной возникновения и развития дефекта этого типа) учитывать постоянные или медленно меняющиеся остаточные напряжения от закалки и наклепа или продольные напряжения от сезонного изменения температуры. Между тем авторитетно показано [3,4], что учет таких напряжений не может являться причиной возникновения дефектов этого типа, их величина лишь несущественно влияет на скорость распространения усталостных трещин.

Еще труднее объяснить с позиций классической механики разрушения возникновение и развитие одиннадцатого дефекта. Растягивающих напряжений, действующих перпендикулярно направлению такой трещины, нет. Поэтому основной причиной формирования повреждений этого типа некоторые авторы считают развитие трещины по механизму второй моды: от касательных напряжений, действующих в продольном направлении от вертикального давления, сил трения, тяги и пр. или в поперечном направлении от вертикального и бокового давления колеса в кривых. Существует также мнение, что дефект по рисунку 21 тоже может развиваться по второй моде от касательных напряжений. Между тем экспериментальные исследования развития трещин смешанного типа (когда инициатор трещины нагружался таким образом, что он испытывал сдвиговые деформации как в плоскости, так и из плоскости образца) доказали, что усталостные трещины не могут развиваться по механизмам второй или третьей моды. Каким бы образом ни нагружался образец, траектория распространения дефекта развернется таким образом, что плоскость трещины сориентируется перпендикулярно направлению действия внешней нагрузки, т. е. усталостная трещина является трещиной нормального отрыва. По этой причине гипотезы о развитии дефекта по рисункам 11 или 21 в результате действия касательных напряжений противоречат экспериментальным данным.

В настоящей статье предложен иной взгляд на эту проблему: основной причиной возникновения и развития контактно-усталостных трещин в головке железнодорожного рельса являются циклически изменяющиеся сжимающие напряжения.

В классической механике разрушения предполагается, что сжимающие напряжения не влияют на характер разрушения и скорость роста усталостной трещины. Считается, что если в цикле внешней нагрузки σ_∞ имеется отрицательный компонент, то на обратном ходе цикла нагружения (когда внешние напряжения стремятся к минимальному значению σ_{min}) берега трещины смыкаются и она закрывается на всю длину. Поэтому такое воздействие на конструкцию рассматривается как пульсирующий цикл от напряжений $\sigma_\infty = 0$ до напряжений

$\sigma_\infty = \sigma_{max}$. И значит, какие бы ни были сжимающие напряжения $\sigma_\infty = \sigma_{min}$, при постоянном значении σ_{max} процессы накопления усталостных повреждений должны быть неизменными.

Однако данные экспериментов, в которых исследовалось влияние уровня сжимающих напряжений на процессы развития усталостного разрушения, показывают, что величина сжимающих напряжений существенно влияет на скорость роста усталостной трещины. Более того, доказано [5], что трещина может развиваться, даже если в цикле внешней нагрузки нет растягивающих напряжений. Предложен механизм [5], позволяющий объяснить развитие усталостной трещины, помещенной в поле внешних сжимающих напряжений. Этот механизм сводится к следующим позициям. Вершина реальной усталостной трещины имеет пусть малый, но конечный радиус кривизны. Если образец, располагающий таким дефектом, нагружен внешними сжимающими напряжениями σ_∞, не превышающими предела пропорциональности материала образца, то трещина закроется, но не на всю длину: около ее вершины будет присутствовать зона, в которой берега дефекта не смыкаются. Зафиксируем трещину в момент, когда $\sigma_\infty = \sigma_{min}$. Отметим ключевые положения. Основная часть материала конструкции работает упруго. Зоны пластических деформаций, возникшие в окрестности вершин дефекта, имеют ничтожно малые размеры по отношению к размерам образца. Существенно, что чем больше абсолютная величина σ_{min}, тем на большей длине трещина закрывается, тем больше размеры пластической зоны и выше уровень пластических деформаций. Однако никогда трещина не будет закрыта по всей длине. При разгрузке упругие деформации, запасенные в основном массиве конструкции, воздействуют на пластическую зону, расположенную в окрестности носика трещины, таким образом, что эта зона будет нагружаться растягивающими напряжениями. Это обстоятельство может быть причиной развития усталостной трещины, помещенной в поле внешних сжимающих напряжений. Эти положения подтверждаются экспериментально [6].

Целью настоящей работы является численное моделирование процессов, происходящих в вершине трещиноподобного дефекта, нагруженного циклически меняющимися сжимающими напряжениями.

Конечноэлементная модель трещиновидного дефекта. В качестве объекта исследования рассматривалась прямоугольная пластинка шириной 200 мм и высотой 100 мм, имеющая центральный узкий разрез размерами $2l$ = 100мм на 0,2 мм. Вершины разреза закруглены по окружности радиусом ρ = 0,1 мм. Поскольку такая пластинка имеет две оси симметрии, для оптимизации расчетов предлагается исследовать ее четвертую часть, как это показано на рисунке 3. По длинной стороне перпендикулярно направлению разреза прикладывались сжимающие напряжения σ_∞. Диаграмма растяжения материала пластинки моделировалась кусочно-линейной функцией. Модуль продольной упругости E_1 = 200 ГПа, предел текучести $\sigma_т$ = =355 МПа, тангенциальный модуль упругости E_2 = 1,54 ГПа. Материал считается абсолютно прочным. Коэффициент Пуассона принят равным 0,3. Задача решалась с учетом возможности появления больших упругопластических деформаций в предположении, что образец находится в условиях плоского напряженного состояния.

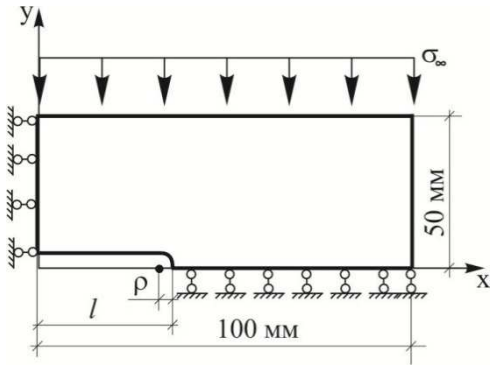
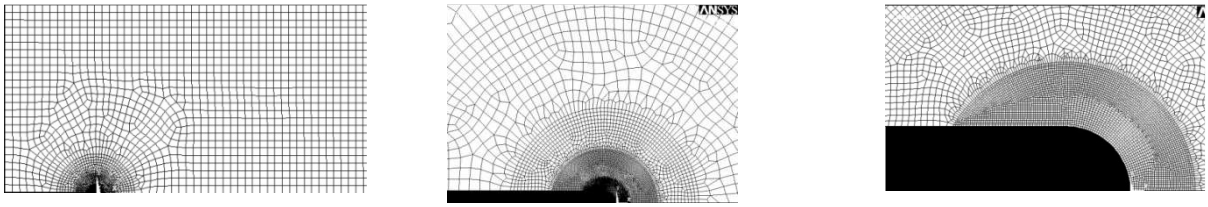


Рисунок 3 – Расчетная схема модели

Такая модель имеет свои особенности. Узкий дефект обусловливает значительную концентрацию напряжений в его вершине. Необходимость исследования очень малой по отношению к габаритным размерам образца области, непосредственно примыкающей к вершине трещины, определяет необходимость построения конечноэлементной сетки по полю модели с элементами, размеры которых в разных областях образца должны различаться на несколько порядков. Для этой цели был использован прием создания вложенных областей, внутри каж-

дой из которых размер конечного элемента уменьшался в 2 – 4 раза (рисунок 4). Существенно, что область образца, примыкающая непосредственно к носику дефекта, разбивались по концентрическим окружностям. Таким способом было создано пять областей локализаций со своим размером конечного элемента. При этом по контуру вершины дефекта располагалось около 40 элементов с размером порядка 0,005 мм. Такое построение модели позволяет с приемлемой точностью получать поля упругопластических напряжений и деформаций в зонах, непосредственно примыкающих к вершине разреза.



а б в

Рисунок 4 – Вид конечноэлементной модели: а – общий вид;
б – увеличенная область, примыкающая к вершине разреза; в – вид вершины разреза

Для оценки точности любого конечноэлементного расчета обычно используется известное теоретическое решение задачи, имея которое определяют, например, напряжения в какой-либо точке образца. Затем та же задача решается численно, в результате чего в той же точке образца определяются напряжения, которые сравниваются с точным решением. Однако таким образом оценить погрешность упругопластического расчета довольно сложно, поскольку ее точного решения, выраженного через простые соотношения, как правило, не существует. Однако имеется исключение – формула, полученная Г. Нейбером для антиплоского сдвига, прямоугольной полосы с эллиптическим боковым вырезом. Существенно, что в этом случае материал пластины имеет нелинейную упругую диаграмму растяжения. Результат такого решения – зависимость, которая связывает коэффициенты концентрации при линейном и нелинейном деформировании образца с концентраторами:

$$k_e^2 = k_\sigma \cdot k_\varepsilon , \qquad (1)$$

здесь: k_e – коэффициент концентрации напряжений в предположении, что материал образца деформируется линейно (упруго); k_σ и k_ε – коэффициенты концентрации соответственно для напряжений и деформаций, если материал деформируется нелинейно (неупруго).

В самой постановке соотношение (1) получено для весьма узкой специфической задачи. Вопрос, можно ли распространить это соотношение на весь класс нелинейных упругих задач и, самое главное, на упругопластическое деформирование, до сих пор не закрыт. Вместе с тем экспериментальное исследование растяжения прямоугольной пластинки с круглым отверстием за пределом текучести, выполненной из алюминиевого сплава Д16Т, дало практически точное выполнение вышеуказанного соотношения [7].

Оценка точности созданной конечноэлементной модели выполнялась на растянутой пластине, расчетная схема которой представлена на рисунке 3, с использованием соотношения (1). Результаты сравнения решений, полученных теоретически и в результате численного расчета, различаются не более чем на 10 %, что можно признать приемлемым для упругопластического расчета.

Созданная конечноэлементная модель нагружалась циклическими напряжениями по сжимающему пульсирующему циклу (σ_{max} = 0). Для первого нагружения с амплитудой 50 МПа реализовано пять циклов нагружения. Для двух других с амплитудой 75 и 100 МПа рассмотрено 10 циклов. В процессе расчета через каждый полуцикл нагружения в вершине трещины фиксировались напряжения типа σ_y, а также длина пластической зоны на продолжении этой трещины. Результаты расчета представлены в таблице.

Результаты расчета

Номер цикла	σ_{min} = –101МПа			σ_{min} = –151МПа			σ_{min} = –201МПа		
	σ_∞ (МПа)	σ_y (МПа)	длина пластической зоны (мм)	σ_∞ (МПа)	σ_y (МПа)	длина пластической зоны (мм)	σ_∞ (МПа)	σ_y (МПа)	длина пластической зоны (мм)
1	0	0	–	0	0	–	0	0	–
	-101	-905	9,87	-151	-1050	12,83	-201	-1207	16,8
2	0	1131	9,87	0	1392	12,83	0	1648	16,8
	-101	-1240	9,87	-151	-1508	12,83	-201	-1752	16,8
3	0	1366	9,87	0	1682	12,83	0	1969	16,8
	-101	-1464	9,87	-151	-1792	12,83	-201	-2066	16,8
4	0	1568	9,87	0	1920	12,83	0	2236	16,8
	-101	-1667	9,87	-151	-2016	12,83	-201	-2325	16,8
5	0	1750	9,87	0	2137	12,83	0	2476	16,8
	-101	-1828	9,87	-151	-2224	12,83	-201	-2561	16,8
6	0	1914	9,87	0	2340	12,83	0	2699	16,8
	-101			-151	-2422	12,83	-201	-2781	16,8
7	0			0	2521	12,83	0	2916	16,8
	-101			-151	-2599	12,83	-201	-3004	16,8
8	0			0	2703	12,83	0	3135	16,8
	-101			-151	-2781	12,83	-201	-3233	16,8
9	0			0	2870	12,83	0	3352	16,8
	-101			-151	-2948	12,83	-201	-3467	16,8
10	0			0	3023	12,83	0	3565	16,8
	-101			-151	-3113	12,83	-201	-3699	16,8

Главный вывод конечноэлементного расчета состоит в том, что в конце каждого цикла нагружения (когда внешняя нагрузка достигает нулевого значения) в вершине трещиновидного дефекта возникают значительные растягивающие напряжения. При этом с каждым новым циклом абсолютные значения таких напряжений увеличиваются. Если свести значения напряжений в вершине трещины на один график, то просматривается уверенная тенденция к росту таких напряжений (рисунок 5). На графиках рисунка 5 круглыми маркерами отмечено положительное напряжение по окончании каждого цикла нагружения, квадратными – абсолютные значения отрицательного напряжения, соответствующего полуциклам нагружения. Следовательно, можно сделать вывод: при отрицательном пульсирующем цикле внешней нагрузки в вершине трещиновидного дефекта реализуется симметричный цикл нагружения. Положительные напряжения, возникающие в вершине трещины в результате такого воздействия, могут быть причиной его развития. Интересно, что если на первом цикле нагружения растягивающие напряжения не достигли необходимой для разрушения материала величины, то в результате последующих циклических воздействий эти напряжения увеличиваются до необходимых значений, которые в конце концов приведут к росту трещины. Еще один факт, который требует дальнейшего исследования: несмотря на рост напряжений в процессе циклического нагружения размер пластической зоны, возникшей в вершине трещины, оставался неизменным и составил для указанных выше циклов соответственно 9,87; 12,8 и 16,8 мм, т. е. размеры пластической зоны зависят только от геометрии дефекта и уровня внешней нагрузки.

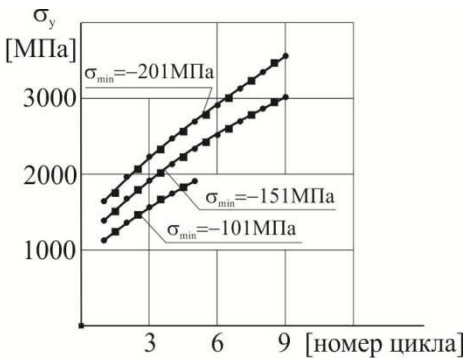


Рисунок 5 – Изменение абсолютных значений нормальных напряжений в вершине трещиновидного дефекта для различных значений амплитуды цикла нагружения при увеличении числа циклов нагружения

На основании изложенного можно сделать выводы.

1. При воздействии на конструкцию переменной сжимающей нагрузки, в которой существует внутренние дефекты, напряжения в их вершинах изменяются по симметричному циклу. При этом амплитуда такого цикла тем больше, чем больше уровень внешней нагрузки (см. рисунок 5). Этим обстоятельством можно объяснить тот факт, что дефект по рисунку 11 чаще всего встречается на рабочей грани наружной нитки в кривых участках пути [1,2]: именно наружный рельс в отличие от внутреннего находится в более жестких эксплуатационных условиях – со стороны колесной пары кроме вертикальной действует еще боковая центробежная нагрузка.

2. Результаты численного эксперимента позволяют предложить возможную схему возникновения и развития одиннадцатого дефекта, он будет появляться в подповерхностном слое рельса на глубине от 3 мм и более, так как именно в этой зоне интенсивность напряжений от контактного взаимодействия, т. е. склонность рельсовой стали к пластическому деформированию, является наибольшей. Возникновению такого дефекта способствуют неметаллические включения или полости, если они располагаются на необходимой глубине. Далее эта трещина будет развиваться в виде плоской ленты в подповерхностном слое на одной глубине. В зонах головки рельса, примыкающих к кончикам дефекта в процессе прокатки колесной пары, формируются области отрицательных пластических деформаций. Отметим, что, вероятно, при съезде колеса с дефекта на отдающем конце трещины уровень пластических деформаций значительно выше, чем при наезде (на принимающем конце трещины). После съезда колеса с дефекта за счет энергии, которая запасена в упруго работающей части рельса, на пластические зоны в вершинах трещины действуют растягивающие напряжения, которые приводят к росту трещины. При этом увеличение ее длины будет тем больше, чем больше величина пластических деформаций: трещина будет расти преимущественно в направлении движения экипажа.

3. Если в процессе своего развития дефект по рисунку 11 встретит различного рода неоднородности (жесткие, мягкие включения или полости), то возможна трансформация трещины: она либо выйдет на поверхность головки рельса, либо повернется внутрь рельса, превратившись в дефект по рисунку 21. В последнем случае процесс развития этого дефекта в виде дисковой трещины затронет ту часть головки, на которую осуществляется боковое давление (если, конечно, этот процесс распространяется в рельсе, уложенном в кривой). Это можно объяснить тем, что, во-первых, именно в этой части рельса находится одиннадцатый дефект, являющийся инициатором развития поперечной трещины, а, во-вторых, здесь действуют максимальные сжимающие напряжения от вертикального и бокового изгиба, которые запускают механизм развития трещин, помещенных в поле переменных сжимающих напряжений. На рисунке 2 отчетливо видно, что трещина распространилась на ту часть рельса, которая в процессе эксплуатации испытывала максимальные сжимающие напряжения.

4. Циклические сжимающие напряжения могут являться причиной возникновения и развития других дефектов.

Список литературы

1. Нормативно-техническая документация. Каталог дефектов рельсов. НТД/ЦП-2-93 [Текст]. – М.: Транспорт, 1993. – 51с.

2. Шур, Е. А. Повреждения рельсов [Текст] / Е.А. Шур. – М.: Интекст, 2012. – 192 с.

3. Вериго, М. Ф. Еще раз о причинах и механизмах контактно-усталостных отказов рельсов [Текст] / М. Ф. Вериго // Вестник ВНИИЖТа. – М., 2001. – № 5. – С. 21 – 26.

4. Ахметзянов, М. Х. Исследование причин развития поперечных усталостных трещин в железнодорожных рельсах (дефект 21) [Текст] / М. Х. Ахметзянов, П. Г. Суровин // Экспериментально-расчетные методы исследования задач прочности: Сб. науч. тр. /Сибирский гос. ун-т путей сообщения. – Новосибирск, 2002. – С. 4 – 9.

5. Шабанов, А. П. О механизме роста усталостной трещины в поле внешних сжимающих напряжений [Текст] / А. П. Шабанов // ПМТФ. – Т. 46. – № 6. – С. 108 – 115.

6. Попелюх, А. И. Влияние структуры сталей на процесс их разрушения при воздействии циклической сжимающей нагрузки [Текст] / А. И. Попелюх, А. М. Теплых, А. Д. Головин // Деформирование и разрушение структурно-неоднородных сред и конструкций: Тез. докл. II всерос. конф. /Новосибирский гос. техн. ун-т. – Новосибирск, 2011. – С. 84.

7. Александров, А. Я. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела [Текст] / А. Я. Александров, М. Х. Ахметзянов. – М.: Наука, 1973. – 576 с.

УДК 625.12:624.131.53

Ю. П. Смолин

ДИНАМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОЕЗДОВ НА ЗЕМЛЯНОЕ ПОЛОТНО

Исследованы уровни вибрации в земляном полотне при движении поездов. Произведен анализ записанных акселерограмм и установлены ускорения колебаний по поперечному сечению насыпи. Произведены расчеты устойчивости насыпей с учетом воздействия поездной нагрузки.

Строительство железных дорог в районах Западной и Восточной Сибири сопряжено с суровым климатом, сложными геологическими и гидрогеологическими условиями. Трассы этих дорог большей частью пролегают по болотам, затапливаемым поймам рек, вечномерзлым грунтам. Покровные грунты, находясь в переувлажненном состоянии, обладают повышенной сжимаемостью и низкой прочностью. Учитывая недостаток традиционного для строительства материала, отсыпку насыпей в основном осуществляли и будут в дальнейшем осуществлять распространенными в этих районах мелкими и пылеватыми песками.

На снижение прочности и устойчивости мелких и пылеватых песков некоторое влияние оказывает вибродинамическое воздействие от поездной нагрузки. До настоящего времени учеными было проведено большое количество натурных и теоретических исследований влияния динамических нагрузок на устойчивость земляного полотна, которые показали, что при проектировании земляного полотна необходимо учитывать динамическую составляющую поездной нагрузки.

В действующем СП 32-104-98 «Проектирование земляного полотна железных дорог колеи 1520 мм» для ориентировочных расчетов устойчивости насыпей с учетом динамики регламентируются две методики: методика, по которой статическая поездная нагрузка увеличивается на величину интегрального коэффициента, и методика, согласно которой в расчет устойчивости насыпей вводятся динамические параметры прочности грунта насыпи. Эти методы оценки динамической устойчивости железнодорожных насыпей не в полной мере отражают реально действующее вибродинамическое воздействие поездной нагрузки на песчаную насыпь. Так, в нормах не учитывается:

– как изменяются вертикальные и горизонтальные параметры колебаний грунта в поперечном и продольном направлениях и по глубине насыпи;

– как на параметры колебаний грунта влияет встреча поездов на двухпутных насыпях;

– какие частоты преобладают в нестационарном колебательном процессе;

– как распределяются величины параметров колебания в подтопленных насыпях и насыпях на слабых основаниях;

– какова связь параметров колебаний с поездной нагрузкой и скоростью подвижного состава.

Без учета указанных выше закономерностей при проектировании земляного полотна проектировщики не имеют возможности в полной мере оценить устойчивость насыпей применительно к их реальному вибрационному состоянию. В этой связи по рекомендациям дей-

ствующих норм при проведении расчетов можно либо слишком завысить коэффициент устойчивости откоса насыпи, что приведет к необоснованному перерасходу строительных материалов и увеличению трудозатрат, либо недооценить устойчивость насыпи.

В связи со строительством железнодорожной линии Сургут – Уренгой и отсутствием традиционного материала для отсыпки насыпи было запланировано отсыпать земляное полотно из мелкого и пылеватого песка. Линия проходит по слабым водонасыщенным грунтам и болотам. Проектирование дороги по заданию ЦУКС МПС осуществляла проектная организация «Сибгипротранс», в план проектирования которой были включены вопросы исследования прочности и устойчивости мелких и пылеватых песков в насыпях от воздействия поездов. Исследование перечисленных выше вопросов позволило запроектировать более надежное земляное железнодорожное полотно.

Натурные исследования динамики при движении поездов проводились лабораторией «Геология, основания и фундаменты» НИИЖТа – СГУПСа совместно с проектным отделом «Земляное полотно» Сибгипротранса.

Целью полевых исследований явилось изучение режима колебаний в песчаном земляном полотне от подвижного состава на однопутных и двухпутных участках железных дорог, в том числе на слабых и заторфованных основаниях.

Для натурных опытов были выбраны песчаные насыпи на двухпутных участках дороги по линии Камень – Алтайская и на однопутных участках по линиям Тюмень – Тобольск, Сургут – Ноябрьская. На рисунке 1 представлен однопутной поперечный профиль железнодорожной насыпи (опытного участка) неподалеку от станции Ульт-Ягун, сооруженный на болоте из мелких и пылеватых песков. На этом поперечнике показано расположение шурфов и скважин, в которых устанавливались датчики виброперемещений. До начала проведения исследований опытная насыпь эксплуатировалась уже более 35 лет.

Для выполнения экспериментальных исследований использовалась широко известная отечественная сейсмоаппаратура ВИ6-6ТН, в комплект которой входят индуктивные датчики ускорения, виброперемещения и давления. Сейсмодатчики виброперемещений и ускорений устанавливались в герметичные кассеты, что позволило помещать их в грунт на любую глубину, в том числе ниже уровня грунтовых вод. Кассеты с датчиками ускорений и виброперемещений устанавливались в шурфах и скважинах. Шурфы отрывали только до уровня грунтовых вод, а ниже этой отметки кассету с датчиками погружали специальным задавливающим устройством, снабженным вибратором.

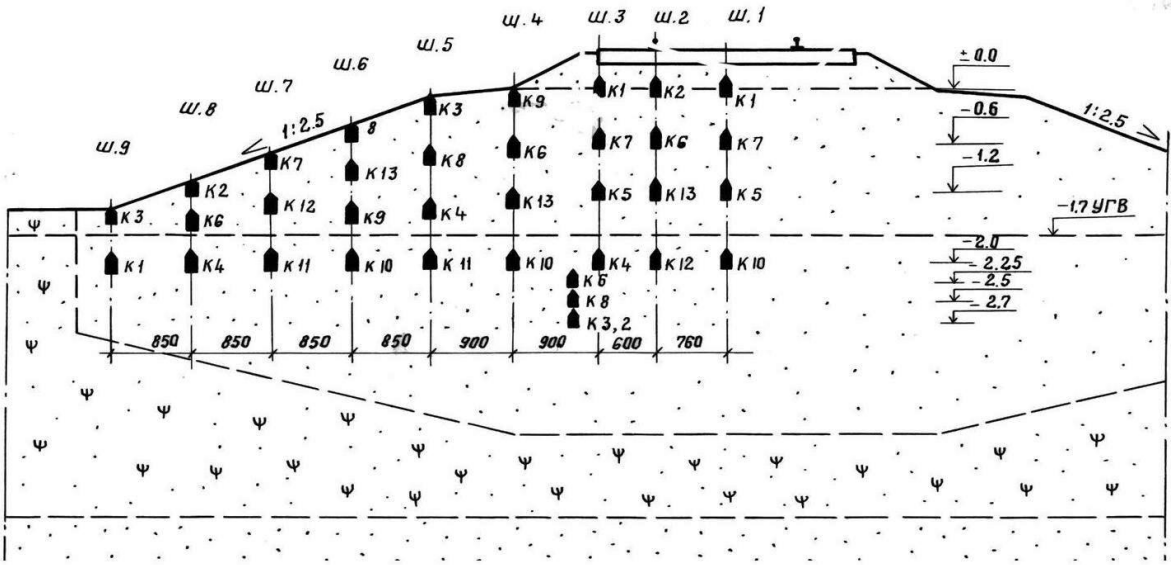


Рисунок 1 – Сечение насыпи с установленными датчиками виброперемещения

При записи осциллограмм учитывались поездные нагрузки по известному весу единиц подвижного состава: локомотива, наливных и пассажирских вагонов, цементовозов, порожних

платформ. Также для выполнения экспериментов отделением путевой части специально выделялся локомотив ТЭМ-2 с вагонами, который двигался по насыпи с различной скоростью. Скорость движения остальных поездов определялась с помощью записанных осциллограмм. Зная расстояние между колесными парами локомотивов и вагонов и скорость движения ленты, вычисляли скорость движения поезда. На всех опытных участках в различных точках земляного полотна было записано несколько сот осциллограмм виброперемещений и ускорений. Запись производилась при различных скоростях движения поездов и нагрузках на оси вагонов.

При обработке осциллограмм виброперемещений использовалась методика гармонического анализа, по которой строились амплитудно-частотные спектры в зависимости от поездной нагрузки, скорости поезда как на двухпутных, так и на однопутных участках железнодорожного земляного полотна (рисунок 2).

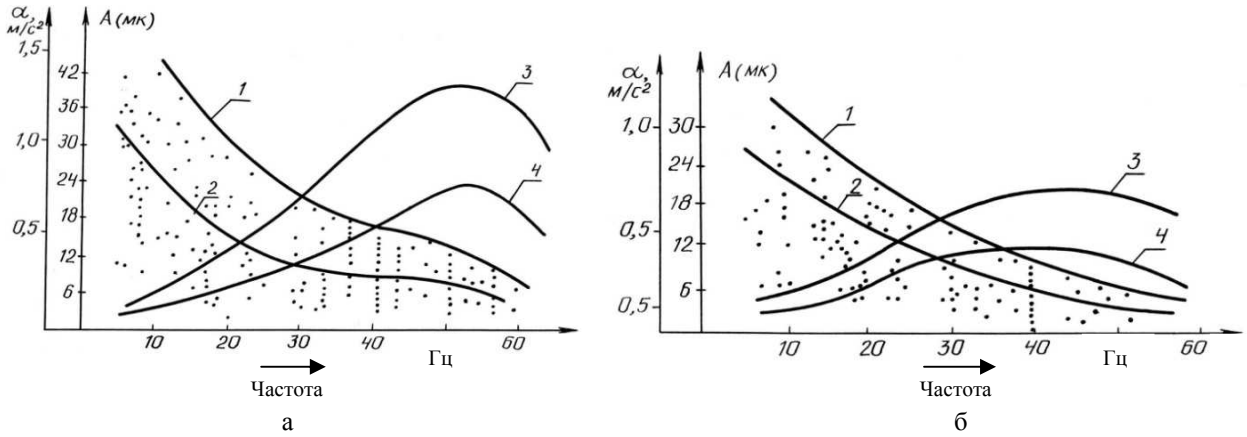


Рисунок 2 – Амплитудно-частотный спектр вертикальных колебаний в междупутье двухпутной насыпи на глубине 0,5 м от уровня основной площадки: а – при встрече поездов; б – при движении поезда по одному пути; 1 – максимальная амплитуда; 2 – средняя амплитуда; 3 – максимальное ускорение; 4 – среднее ускорение

Расчетные параметры колебаний были определены методом регрессивного анализа. Для выявления функции регрессии, наилучшим образом описывающей зависимость амплитуды от частоты, было опробовано несколько подходящих функций. Наилучшей по тесноте связи оказалась экспоненциальная функция вида:

$$A_{x,z} = 16A^0_{x,z} f^2 e^{-\delta f}, \tag{1}$$

где A_x, A_z – амплитуда вертикальных и горизонтальных колебаний соответственно, мк;

A^0_x, A^0_z – начальная амплитуда вертикальных и горизонтальных колебаний, мк;

δ – параметр затухания амплитуды по частоте колебаний;

f – частота колебаний, Гц.

Ускорения колебаний вычислялись как вторая производная от амплитуды смещения колебаний. Вычисленные вертикальные и горизонтальные составляющие ускорения наносились на поперечные сечения насыпей (рисунки 3, 4).

Аппроксимация экспериментальных данных об амплитуде колебаний позволила получить следующие выражения для модулей ускорения колебаний выше (2) и ниже (3) уровня грунтовых вод:

$$a = a_0 \cdot e^{-M_1 \cdot z} \cdot L_1(t); \tag{2}$$

$$a = ka_0 \cdot e^{-M_2 \cdot (0,18h+)z} \cdot L_2(t), \tag{3}$$

где a_0 – модуль ускорения колебаний в начале координат, м/с^2;

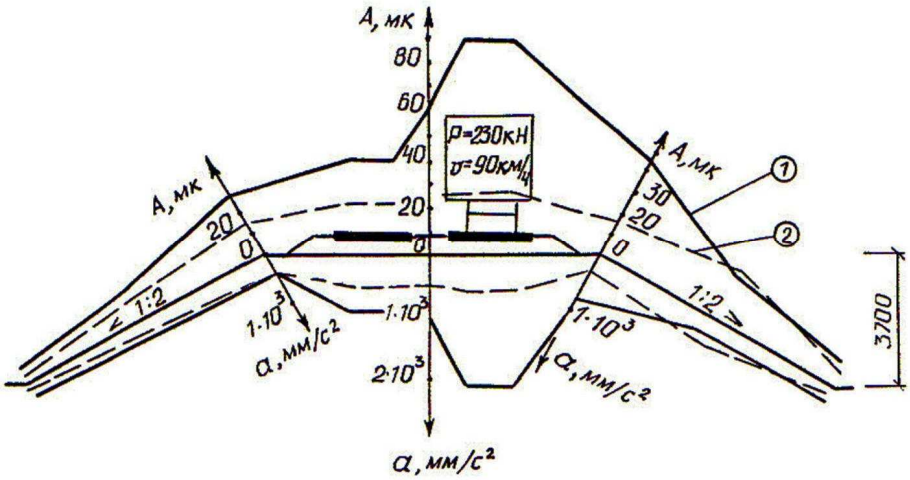
L_1(t), L_2(t) – полиномы Лагранжа;

M_1, M_2 – параметры экспоненты для точек, расположенных выше (M_1 = 0,48) и ниже (M_2 = = 0,34) уровня грунтовых вод;

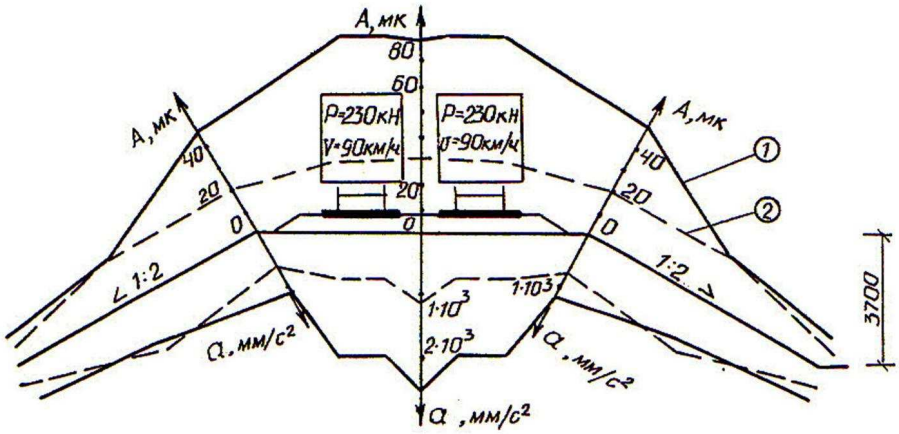
k = 2 – переходной коэффициент, определяющий скачок модуля ускорения в точке пересечения оси пути с уровнем грунтовой воды;

h – расстояние от уровня основной площадки до уровня грунтовых вод, м;

z – глубина расположения рассматриваемой точки, м.



а



б

Рисунок 3 – Распределение максимальной вертикальной и горизонтальной амплитуды и ускорения колебаний при прохождении поездов: а – по одному пути; б – при встрече поездов; 1, 2 – горизонтально и вертикально направленные колебания

Величина a_0 аппроксимирована функцией и вычисляется в зависимости от скорости поезда, поездной нагрузки и частоты колебаний (принято f = 30 Гц),

$$a_0 = B_0 f^2 VP\sqrt{\left(28e^{-2\delta_z f} + 7,3^{-2\delta_x f}\right)}10^{-8}, \tag{4}$$

где B_0 – коэффициент, равный единице в уровне основной площадки, м.·ч/кН·км;

V, P – скорость поезда и нагрузка на ось подвижного состава.

Далее подсчитывались средние значения относительных ускорений $a_{ср}$ в каждом вертикальном створе отдельно выше и ниже уровня грунтовых вод. Полученные $a_{ср}$ справедливы как для однопутной, так и для двухпутной насыпи при прохождении одного состава или при встрече поездов. С достаточной для практических целей точностью они аппроксимированы полиномом Лагранжа:

при прохождении поезда по одному пути –

$$\begin{aligned} L_1(t) = 0,01\cdot[&-0,833\cdot(t-1)\cdot(t-2)\cdot(t-3)\cdot(t-4)\cdot(t-5)+5,08\cdot t\cdot(t-2)\cdot(t-3)\cdot(t-4)\cdot(t-5)-\\ &-14,7\cdot t\cdot(t-1)\cdot(t-3)\cdot(t-4)\cdot(t-5)+19,6\cdot t\cdot(t-1)\cdot(t-4)\cdot(t-5)-\\ &-6,71\cdot t\cdot(t-1)\cdot(t-2)\cdot(t-3)\cdot(t-5)+1,01\cdot t\cdot(t-1)\cdot(t-2)\cdot(t-3)\cdot(t-4)] \end{aligned} \tag{5}$$

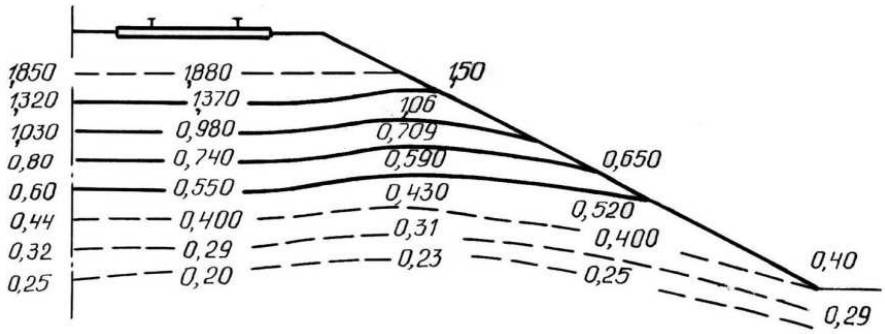
при встрече поездов –

$$L_2(t) = 0,01 \cdot [-0,833 \cdot (t-1) \cdot (t-2) \cdot (t-3) \cdot (t-4) \cdot (t-5) + 3,71 \cdot t \cdot (t-2) \cdot (t-3) \cdot (t-4) \cdot (t-5) - \\ -9,0 \cdot t \cdot (t-1) \cdot (t-3) \cdot (t-4) \cdot (t-5) + 10,3 \cdot t \cdot (t-1) \cdot (t-4) \cdot (t-5) - \\ -4,25 \cdot t \cdot (t-1) \cdot (t-2) \cdot (t-3) \cdot (t-5) + 0,617 \cdot t \cdot (t-1) \cdot (t-2) \cdot (t-3) \cdot (t-4)] \quad (6)$$

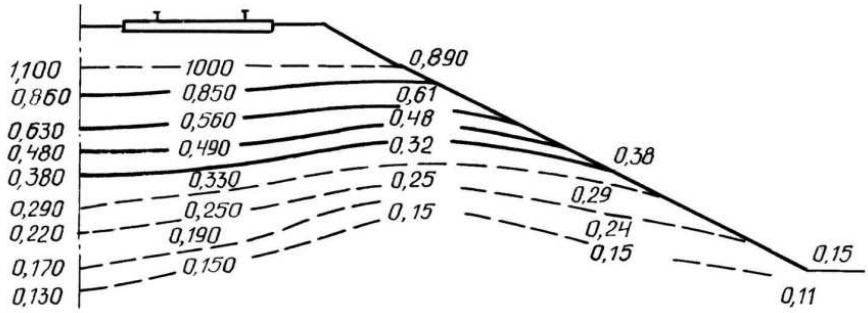
где t выражается через расстояние от оси железнодорожного пути x:

$$t = \frac{x}{2,84}, \quad (7)$$

где x – расстояние от оси пути до рассматриваемой точки, м.



а



б

Рисунок 4 – Изолинии результирующих ускорений, замеренных в теле насыпи при встрече поездов при f = 40 Гц: а – максимальные ускорения, м/с^2; б – средние ускорения; (——— – экспериментальные изолинии; - - - - - - – расчетные изолинии)

Удельная сила инерции колебания грунта, от которой зависит устойчивость земляного полотна, определяется формулой:

$$i = \rho a = \frac{\gamma a}{g}, \quad (8)$$

где ρ, γ – плотность и удельный вес грунта соответственно, кН/м^3;

a – модуль ускорения колебаний в рассматриваемой точке земляного полотна, м/с^2;

g – ускорение силы тяжести, м/с^2.

Расчетные значения модуля ускорений колебаний определяются выражением:

$$a = k^1 a^н, \quad (9)$$

где k^1 – коэффициент запаса, зависящий от среднеквадратического отклонения амплитуды ускорения колебаний (при доверительной вероятности 0,98 → k^1 = 2,32).

При встрече поездов на двухпутной насыпи опытами зафиксировано, что амплитуда колебаний увеличивается в среднем примерно в 1,2 раза. При этом происходит некоторое смещение максимальной плотности амплитуды колебаний в диапазон частот 35 Гц.

Установленные на основании опытных данных функции использовались в разработанных методиках расчета устойчивости земляного полотна по методу теории предельного равновесия грунтов.

Одним из основных вопросов проектирования земляного сооружения является вопрос о расчете общей устойчивости его откосов, при этом необходимо знать предполагаемую линию скольжения, по которой будет происходить потеря устойчивости насыпи. По приближенным методам проверки устойчивости откосов на сдвиг принимают фиксированные криволинейные, прямолинейные и другие поверхности скольжения.

Для уточнения линий скольжения песчаной насыпи были проведены лабораторные опыты на моделях в лотке длиной 3,0 м, шириной 1,5 м и высотой 1,8 м. В результате проведенных опытов области призм обрушения можно представить в виде трех основных зон, как это имеет место в теории предельного равновесия. Опыты показали, что в песках не наблюдается традиционно принятая в расчетах круглоцилиндрическая поверхность скольжения.

При динамическом воздействии поездов на пески дополнительно уменьшаются его прочностные характеристики, что также оказывает влияние на прочность и устойчивость земляного полотна.

Для выяснения, в какой мере динамика оказывает влияние на прочностные характеристики песчаных грунтов, были проведены опыты по определению прочностных характеристик грунтов на специально сконструированном для этой цели безынерционном стабилометре (рисунок 5).

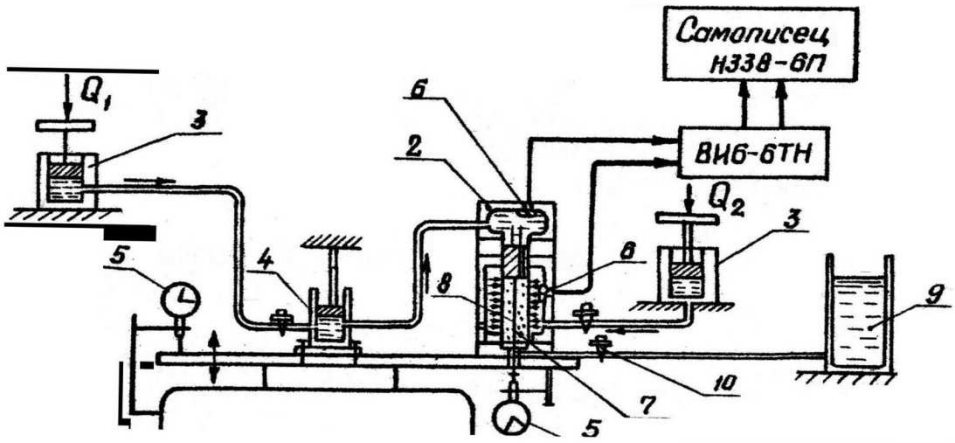


Рисунок 5 – Схема безынерционного стабилометра на базе вибростенда ВЭДС-200А для исследования прочности песков при воздействии на них динамических нагрузок: 1 – вибростенд; 2 – стабилометр; 3 – плунжерная пара; 4 – поршень; 5 – индикатор; 6 – датчик давления; 7 – образец грунта; 8 – медицинская игла; 9 – цилиндр с водой; 10 – запорный кран

Опыты проводились при статических и динамических нагрузках аналогично исследованиям критических ускорений, однако в отличие от исследований критических ускорений образец опытного грунта вначале обжимался гидростатическим давлением 20 кПа, а затем разрушался возрастающим осевым давлением при постоянном динамическом воздействии. Опыты показали, что угол внутреннего трения при динамике в сравнении со статическим его значением уменьшается примерно на 2 – 4 %. При оценке устойчивости откосов насыпей в расчет необходимо принимать расчетные динамические характеристики прочностных свойств песчаного грунта, что также будет приводить, в дополнение к динамическим силам, к уменьшению устойчивости откоса насыпи.

Экспериментально установленные максимальные значения горизонтальных и вертикальных ускорений колебаний позволили вычислить максимальные векторы результирующих ускорений. Что касается направления этих ускорений, то оно, в силу диссипативности направлений, остается неопределенным. В таком случае при оценке устойчивости земляного полотна железной дороги предполагается принимать наиболее неблагоприятные направления инерционных сил, а следовательно, и ускорения колебаний. Рекомендуется принимать направление этих сил по касательной к линиям скольжения. При этом, конечно, оценка устойчивости будет содержать некоторый запас расчета.

Для решения задач устойчивости насыпи на ЭВМ составлены программы с использова-

нием инженерных методов расчета по круглоцилиндрическим поверхностям скольжения, по поверхности скольжения в виде логарифмической спирали и с учетом сложных поверхностей скольжения по теории предельного равновесия (рисунок 6). Во всех расчетных схемах было учтено вибродинамическое воздействие от поездной нагрузки.

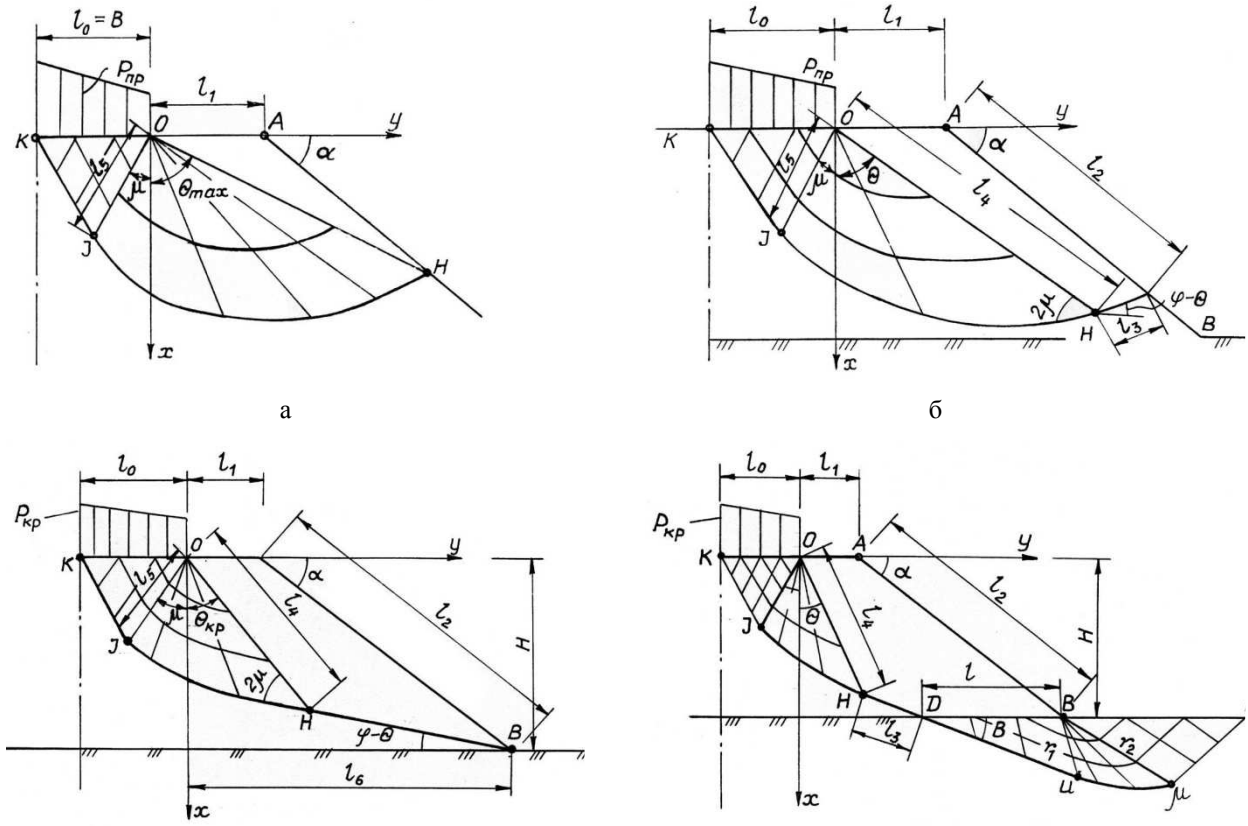


Рисунок 6 – Расчетные схемы при решении задач устойчивости откоса насыпи

Принимая несущую способность насыпи при нулевой скорости поездной нагрузки за 100 %, имеем средний процент снижения предельного давления на 10 – 20 % в зависимости от скорости поезда и осевой нагрузки. Указанные цифры снижения предельной нагрузки могут колебаться в ту или иную сторону в зависимости от рассматриваемого объема обрушающегося откоса. Так, при рассмотрении потери устойчивости откоса в верхней части насыпи в силу наибольших инерционных сил процент снижения предельной нагрузки будет большим, чем при рассмотрении плоскости скольжении с захватом значительных масс грунта насыпи и тем более основания.

Список литературы

1. Соловьев, Ю. И. Современные методы расчета устойчивости земляного полотна железных дорог [Текст] / Ю. И. Соловьев, А. М. Караулов, Ю. П. Смолин / Сибирская гос. акад. путей сообщения. – Новосибирск, 1996. – 86 с.

2. Смолин, Ю. П. Динамический расчет земляного полотна железной дороги [Текст] / Ю. П. Смолин, Ю. И. Соловьев, К. В. Червецов // Вестник СГУПСа / Сибирский гос. ун-т путей сообщения. – Новосибирск, 2002. – Вып. 4. – С. 131 – 138.

3. Смолин, Ю. П. Исследование прочностных характеристик песчаных грунтов при вибрационных воздействиях [Текст] / Ю. П. Смолин, Ю. И. Соловьев // Известия вузов. – Новосибирск, 2001. – № 6. – С.121 – 123.

УДК 625.033:620.178.311.6

В. М. Тихомиров

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ РЕЛЬСА С ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИМ ПОВРЕЖДЕНИЕМ

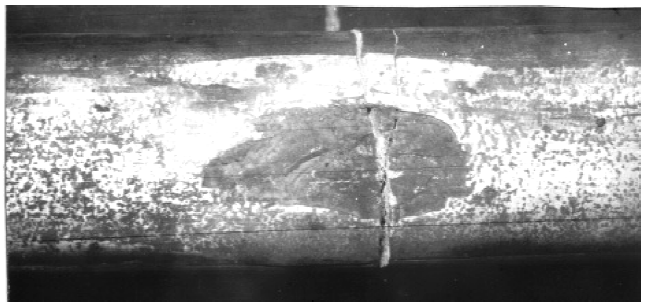
Проведены исследования зарождения и развития усталостной трещины в рельсах с термомеханическим повреждением. На основе циклических испытаний натурных рельсовых проб и численного моделирования напряженно-деформированного состояния рельса с трещиной были определены характеристики трещиностойкости и параметры кинетики развития усталостных трещин в рельсовой стали.

При эксплуатации элементы подвижного состава и верхнего строения пути испытывают воздействие целого спектра периодически меняющихся нагрузок. Для стандартно изготовленных конструкций нагружения такого рода не опасны в течение нормативного периода эксплуатации. Однако наличие заводских или полученных в процессе эксплуатации дефектов, а также различных концентраторов напряжений может стать источником зарождения трещины и привести к усталостному разрушению конструкции. Современные средства дефектоскопии могут выявлять дефекты на ранних стадиях развития усталостных трещин, когда запас живучести рельсов достаточно велик и прямой угрозы безопасности движения нет. Для надежной и безопасной работы железнодорожного транспорта необходимо оценить степень опасности обнаруженного дефекта и рассчитать ресурс поврежденной конструкции. В настоящее время основой таких исследований являются эмпирические данные, которые при смене типа рельса, появлении новых конструкций верхнего строения пути или изменении условий эксплуатации теряют практическую ценность.

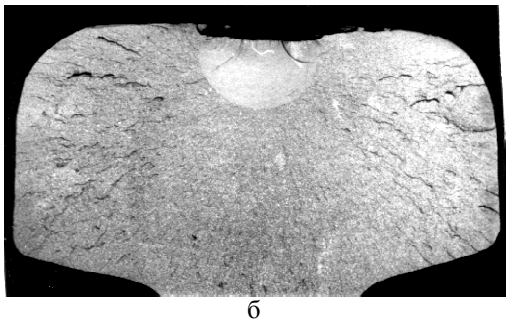
Современное представление о прочности тел с трещинами при статически и циклически меняющихся нагрузках позволяют рассчитать остаточный ресурс конструкции, однако специфические условия деформирования железнодорожного рельса требуют разработки новых методов исследования зарождения и развития усталостных трещин.

В настоящей работе проведен анализ процесса усталостного разрушения железнодорожных рельсов с термомеханическим повреждением (ТМП) с учетом динамических контактных и изгибных деформаций рельса, а также статических нагружений: температурное воздействие при бесстыковом устройстве пути и остаточные напряжения в рельсах, которые являются следствием технологических операций при их изготовлении. По данным исследований, проведенных в работе [1], продольные остаточные напряжения в зоне развития поперечной усталостной трещины меняются от – 300 у поверхности головки рельса до + 330 МПа в средней части. На основе экспериментальных данных и численного моделирования напряженно-деформированного состояния рельса с трещиной были определены характеристики трещиностойкости: критический и пороговый коэффициенты интенсивности напряжений и параметры кинетики развития усталостных трещин в рельсовой стали.

ТМП – весьма распространенный дефект железнодорожных рельсов, который возникает при скольжении колес локомотива. В результате боксования колеса происходит выкрашивание части поверхности рельса на глубину до 2 мм (рисунок 1,а). При этом происходит нагрев поверхности рельса до высокой температуры и охлаждение, которое вызывает изменение структуры металла и появление микротрещин. Данные дефекты в свою очередь являются центрами зарождения поперечной усталостной трещины – дефект 24 по классификации дефектов в рельсах (рисунок 1,б).



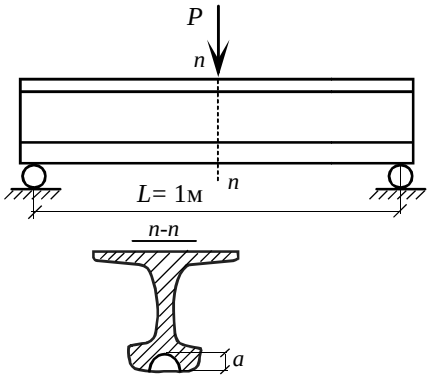
а



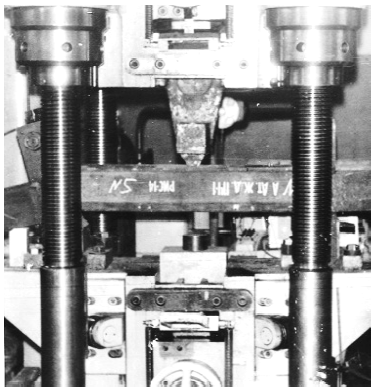
б

Рисунок 1 – Термомеханический дефект 14 (а) и дефект по рисунку 24 (б)

Было проведено испытание рельсовых проб, имеющих термомеханическое повреждение, на гидравлическом пульсаторе ЦДМ-200 (рисунок 2,б). На рисунке 2,а показана схема нагружения образца. Пять рельсовых проб испытывались на циклический изгиб при следующих параметрах нагружения: частота – 300 цикл/мин; коэффициент асимметрии цикла $r = P_{\min}/P_{\max} = 0{,}33$. Максимальное усилие цикла нагружения для каждой пробы варьировалось от 400 до 900 кН.



а

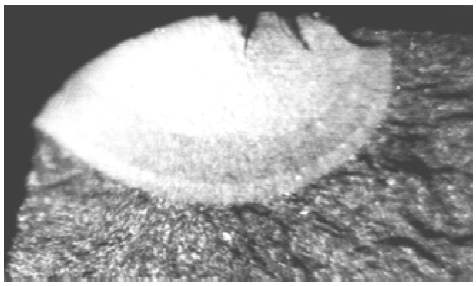


б

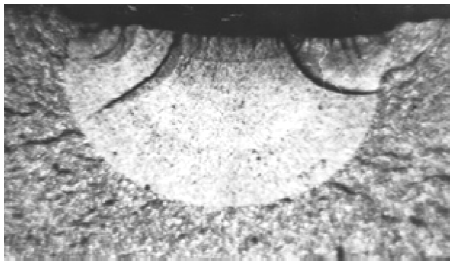
Рисунок 2 – Схема нагружения железнодорожного рельса:
а – модель рельса; б – рельс Р65 на гидравлическом пульсаторе ЦДМ-200

Для того чтобы зафиксировать поэтапное изменение геометрии фронта трещины, применялся способ перегрузки. Для этого максимальная нагрузка на некоторое время повышалась на 20 %.

На рисунке 3 показан типичный вид изломов рельсовых проб, на которых можно видеть поэтапное продвижение усталостных трещин через головку рельса. Трещина зарождалась в различных местах поверхности катания рельса: на выкружке (рисунок 3,а), или на оси симметрии (рисунок 3,б). Можно отметить, что фронт трещины в начальный момент вытянут вдоль поверхности катания, а затем его очертание становится близким к дуге окружности.



а



б

Рисунок 3 – Вид усталостной трещины на изломе рельсовой пробы: а – на выкружке рельса;
б – по оси симметрии рельса

Анализ поверхности изломов позволил выделить одиннадцать этапов продвижения усталостной трещины, по которым была рассчитана скорость средней точки фронта: отношение изменения размера трещины Δa к числу циклов нагружения ΔN, за которое это приращение было получено.

Для этих характерных точек при различных размерах трещины (a = 5,6; 7,1; 9,1; 10,9; 12,0; 14,1 мм) были определены коэффициенты интенсивности напряжений (КИНы) нормального отрыва K_I. На рисунке 4 представлены результаты расчета. На графике черными точками отмечены результаты, полученные методом конечных элементов [2], кружками – методом объемной фотоупругости [3]. Здесь $\sigma_п = 0{,}572\,P$ (МПа) – напряжение в подошве рельса при заданной схеме нагружения (здесь нагрузку P необходимо подставлять в килоньютонах).

Четыре рельсовых пробы разрушились в момент их циклического нагружения. Это позволило определить величину критического КИНа K_{fc} при усталостном разрушении, средняя величина которого K_{fc} составила $37,5\ \text{МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$.

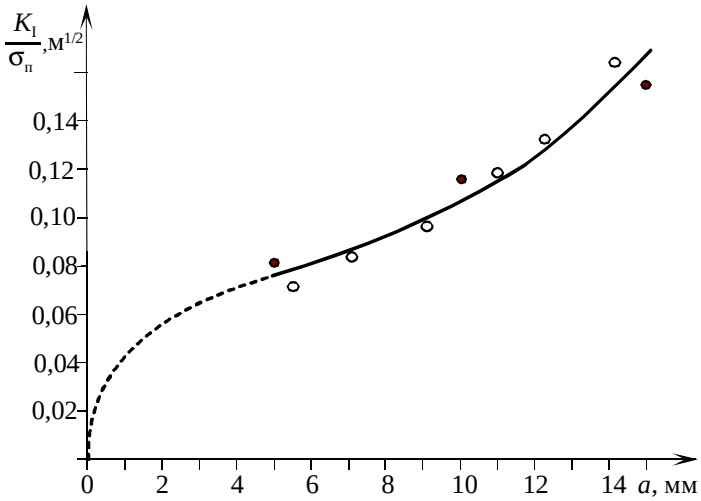


Рисунок 4 – Зависимость КИН нормального отрыва от размера трещины

По экспериментальным и расчетным данным была построена диаграмма кинетического разрушения рельса с термомеханическим повреждением (рисунок 5).

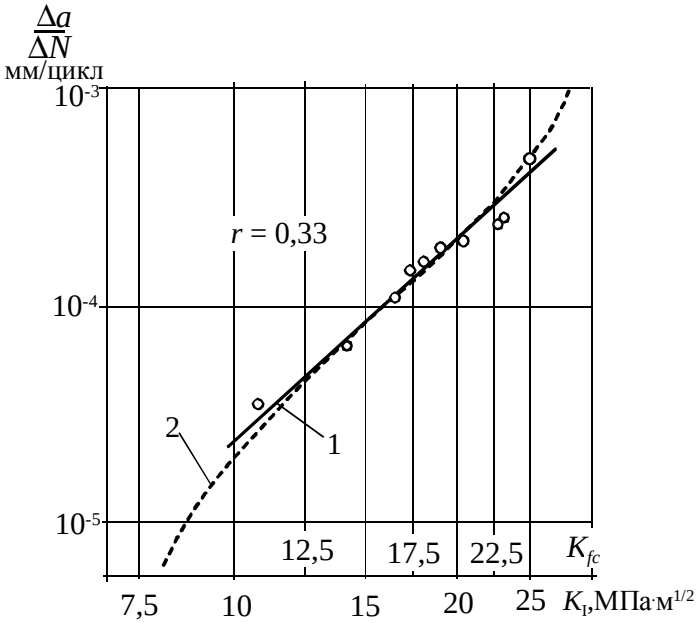


Рисунок 5 – Кинетическая диаграмма роста усталостной трещины в железнодорожном рельсе

Средняя часть кинетической диаграммы разрушения аппроксимируется уравнением Пэриса [4]:

$$\frac{\Delta a}{\Delta N} = C\left(\Delta K_I\right)^m. \qquad (1)$$

На рисунке 5 это кривая 1 с параметрами $C = 5{,}3\cdot10^{-8}$ и $m = 2{,}79$. Данные результаты сопоставимы с подобными характеристиками для термоупрочненной рельсовой стали [5]: $C = 0{,}69\cdot10^{-8}$; $m = 2{,}5$, которые были определены по испытаниям стандартных образцов при коэффициенте асимметрии цикла нагружения $r = 0{,}1$. Повышенная скорость роста трещины в натурном рельсе объясняется, во-первых, большим коэффициентом асимметрии $r = 0{,}33$, во-вторых, влиянием остаточных напряжений, действующих в объемно-закаленных рельсах, из которых были изготовлены пробы для усталостных испытаний.

В работе [6] предложено описывать полные кинетические диаграммы усталостного разрушения, от порогового КИНа K_{th} до критического K_{fc}, следующей зависимостью:

$$\frac{\Delta l}{\Delta N} = C\left(\frac{K_{\max} - K_{th}}{K_{fc} - K_{\max}}\right)^m . \qquad (2)$$

Использование уравнения (2) для аппроксимации экспериментальных данных позволило построить полную диаграмму разрушения (кривая 2 на рисунке 5) и определить значение порогового K_{th} = 7,8 МПа·м$^{1/2}$ и критического КИНа K_{fc} = 32,8 МПа·м$^{1/2}$. Постоянные, входящие в уравнение (2), при этом получились следующие: $C = 2{,}96 \cdot 10^{-4}$; m = 1,78. Небольшое различие между значениями критического КИНа связано с разными способами его определения. Более точное значение получается при непосредственном расчете по параметрам циклического нагружения рельса и графику зависимости КИНа от размера трещины.

Определим критический размер дефекта ($a_{\text{кр}}$), при котором произойдет разрушение рельса. Для этого используем результаты расчета КИНа, представленные на рисунке 5. Здесь необходимо учесть, что рабочее напряжение ($\sigma_{\text{п}}$) в подошве железнодорожного рельса при его обратном изгибе в зависимости от условий эксплуатации с учетом статической составляющей нагрузки (температурные усилия), а также одиночных динамических ударных возмущений $\sigma_{\text{п}}$= 30 ÷200 МПа [7]. В результате, принимая величину критического КИНа K_{fc} = = 42,5 МПа·м$^{1/2}$, получим, что $a_{\text{кр}} \geq$ 18,0 мм. Это подтверждается практикой выхода (разрушения) рельсов по дефекту 24. На рисунке 6 приведена кривая распределения глубины дефекта 24 ($a_{\text{кр}}$) по данным работы [7]. Видно, что минимальный размер, при котором происходило разрушение, – 18 мм, максимальный – 44 мм, который соответствует наиболее благоприятным условиям работы железнодорожного пути, когда $\sigma_{\text{п}}$= 30 МПа.

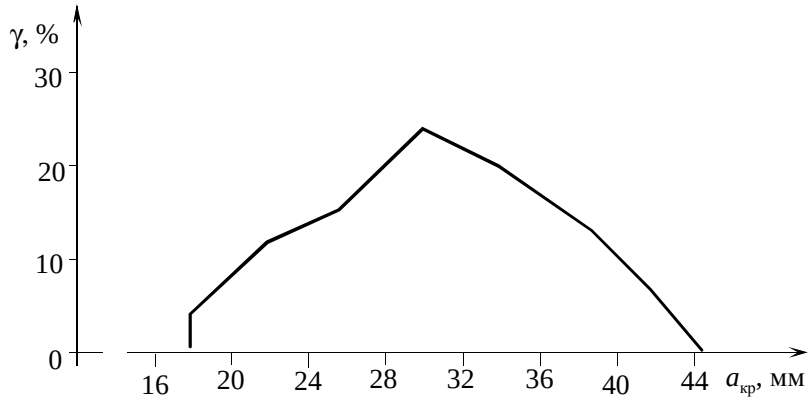


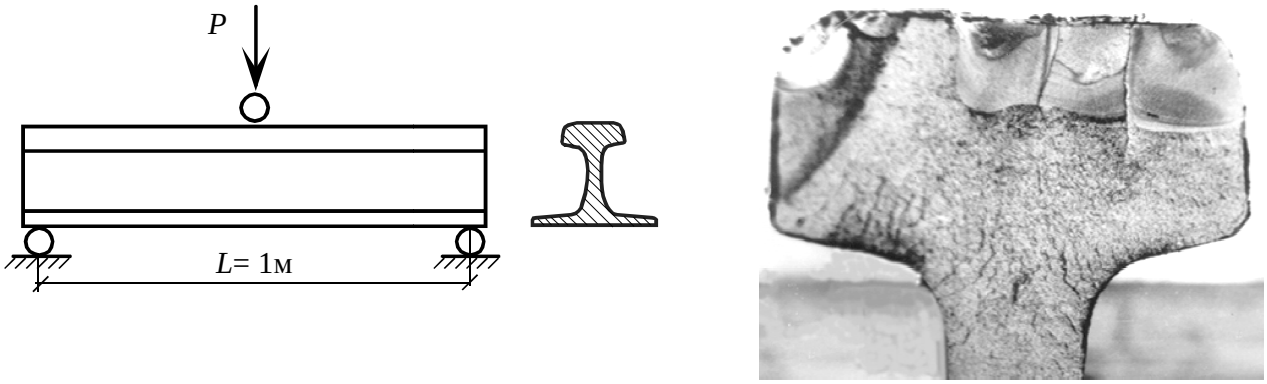
Рисунок 6 – Распределение выхода (в процентах) рельсов в зависимости от размера поперечной трещины

Рассчитаем пороговый размер поперечной трещины (a_{th}), при котором трещина начнет расти от обратного изгиба, считая, что величина порогового КИНа K_{th} = 7,8 МПа·м$^{1/2}$. Здесь необходимо учитывать только амплитуду циклических изгибных напряжений: $\Delta\sigma_{\text{изг}}$ = = 30 ÷80 МПа и величину остаточных напряжений. Получим, что при таких параметрах нагружения величина a_{th} равна примерно 5 – 9 мм.

Так как термомеханическое повреждение рельса по глубине не превышает 2 мм, то зарождение и начальное развитие поперечной усталостной трещины до глубины a_{th} не может происходить от обратного изгиба рельса. Очевидно, процесс роста трещины до порогового размера (a_{th}) связан с циклическим контактным нагружением головки рельса.

С целью изучения влияния контактного взаимодействия колеса и рельса на зарождение и рост усталостной поперечной трещины были проведены испытания двух рельсовых проб, имеющих подобные ТМП. Нагружение образцов производилось по схеме, представленной на рисунке 7,а. При испытании первой пробы нагрузка на головку рельса в зоне ТМП передава-

лась через цилиндр диаметром 60 мм. Параметры циклического нагружения были следующими: P_{max} = 750 кН, P_{min} = 250 кН, что соответствует напряжениям в подошве рельса $\sigma_{п,max} = 400$ МПа и $\sigma_{п,min} = 115$ МПа, частота – 300 цикл/мин. После 250 тыс. циклов нагружения рельс был перевернут головкой вниз и статически разрушен (нагрузка разрушения составила 1380 кН). На поверхности излома была зафиксирована усталостная трещина, глубина которой составила 2 мм. Разрушающая статическая нагрузка рельсовых проб с ТМП, изъятых из пути и не подверженных циклическому нагружению, находилась в пределах от 1700 до 2000 кН без видимых усталостных трещин.



а б

Рисунок 7 – Схема нагружения рельсовой пробы с термомеханическим повреждением (а); вид трещины, выросшей в зоне контактных напряжений (б)

На второй рельсовой пробе были проведены исследования влияния распределения контактных напряжений на зарождение поперечной усталостной трещины. Первоначально давление на головку рельса осуществлялось через накладку из стали марки Ст3 с размерами 100 × 100 мм. В режиме циклически меняющегося нагружения (P_{max} = 700 кН, P_{min} = 200 кН) образец выдержал 1500 тыс. циклов. После чего в перевернутом состоянии образец без разрушения выдержал статическое усилие 1750 кН.

Результаты предыдущих статических испытаний позволили сделать вывод о том, что усталостная трещина не зародилась. При дальнейших циклических испытаниях нагрузка на головку рельса передавалась через цилиндр диаметром 60 мм. Образец был нагружен по следующему режиму: 500 тыс. циклов при P_{max} = 750 кН, P_{min} = 250 кН; 350 тыс. циклов при P_{max} = 700 кН, P_{min} = 200 кН и 200 тыс. циклов и снова 200 тыс. циклов при P_{max} = 750 кН, P_{min} = 250 кН. После этого в перевернутом положении (нагрузка приложена на подошву рельса) образец был разрушен при усилии 90 кН.

Проведенные испытания показывают, что поперечная трещина (дефект 24) зарождается и растет до глубины a_{th} от циклического контактного взаимодействия колеса и рельса.

Список литературы

1. Ахметзянов, М. Х. Определение остаточных напряжений в железнодорожных рельсах [Текст] / М. Х. Ахметзянов, В. А. Кушнеров // Труды НИИЖТа. – Новосибирск. –1967.– Вып. 62. – С. 268 – 284.

2. Ахметзянов, М. Х. Определение коэффициентов интенсивности напряжений при смешанном типе нагружения трещины [Текст] / М. Х. Ахметзянов, В. М. Тихомиров, П. Г. Суровин // Известия вузов. Строительство. – 2003. – № 1. – С. 19 – 25.

3. Тихомиров, В. М. Определение коэффициентов интенсивности напряжений методом фотоупругости в трехмерных задачах механики разрушения [Текст] / В. М. Тихомиров // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2004. – № 2. – С. 94 – 100.

4. Черепанов, Г. П. Механика хрупкого разрушения [Текст] / Г. П. Черепанов. М.: Наука, 1974. – 640 с.

5. Прочность рельсов с трещинами [Текст] / Е. А. Шур, Т. Н. Киселева и др. // Вестник ВНИИЖТа. – 1984. – № 2. – С. 48 – 52.

6. Ярема, С. М. Исследование роста усталостных трещин и кинетические диаграммы усталостного разрушения [Текст] / С. М. Ярема // ФХММ. – 1977. – Т. 13. – № 4. – С. 3 – 23.

7. Расширение сферы применения бесстыкового пути с учетом надежности работы рельсовых плетей [Текст] / Г. С. Хвостик, В. Л. Порошин и др.// Вестник ВНИИЖТа. –1986. – № 8. – С. 45 – 49.

УДК 625.033:539.42

В. М. Тихомиров, П. Г. Суровин

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА РЕЛЬСА С ПОПЕРЕЧНОЙ ТРЕЩИНОЙ В ПОДОШВЕ

В работе рассматривается методика оценки остаточного ресурса рельса, имеющего усталостную трещину в подошве. Получены зависимости коэффициента интенсивности напряжений от размера трещины при действии изгибных, температурных и остаточных напряжений. Проведен анализ трещиностойкости поврежденного рельса Р65 от действия перечисленных усилий. При заданных условиях нагружения рассчитан остаточный ресурс поврежденного рельса. Оценено влияние на скорость роста усталостной трещины усиления опасного сечения накладками.

Коррозионно-усталостные трещины в подошве рельса – весьма опасный дефект. Вид повреждения возникает и развивается на участках пути с раздельным скреплением в местах, где между стальной подкладкой и подошвой рельса уложены резиновые или резинокордные прокладки. Влага, попадающая под прокладку, вызывает коррозию металла под напряжением (остаточные закалочные и температурные напряжения). На подошве образуются каверны, которые вызывают концентрацию изгибных напряжений и, как следствие, – поперечные трещины усталости. Вероятность излома рельса с таким дефектом под локомотивом высока. Около 20 % всех изломов происходит из-за указанного дефекта. При этом наработка разрушенного рельса находится в пределах от 300 до 500 млн т груза [1].

В связи с этим исследование напряженно-деформированного состояния рельсов, имеющих подобный дефект, а также анализ кинетики развития усталостной трещины в подошве имеют большое прикладное значение для железных дорог России.

Рост усталостной трещины можно прогнозировать, используя кинетическую диаграмму разрушения стали, которая описывает зависимость скорости роста трещины dl/dN (l – характерный размер трещины; N – число циклов нагружения) от параметров нагружения. Для того чтобы учесть асимметрию циклического нагружения, которая имеет место при эксплуатации бесстыкового пути, целесообразно применить формулу Пэриса – Формэна [2]:

$$\frac{dl}{dN} = \frac{C\Delta K^{m}}{(1-r)K_{fc} - \Delta K}, \qquad (1)$$

где C, m – постоянные эмпирические коэффициенты, зависящие от материала; K_{max}, K_{min} – максимальное и минимальное значения коэффициента интенсивности напряжения (КИНа); $\Delta K = K_{max} - K_{min}$ – амплитуда изменения КИНа за цикл нагружения; $r = K_{max}/K_{min}$ – коэффициент асимметрии цикла; K_{fc} – критический КИН при усталостном разрушении. Для рельсовой стали $C = 15\cdot10^{-8}$ МПа$^{-3/2}\cdot$м$^{1/4}$, $m = 2{,}5$; $K_{fc} = 35$ МПа$\cdot$м$^{1/2}$ [3].

Зависимость (1) позволяет рассчитать остаточный ресурс рельса $N_{ост}$ – период роста трещины от начального размера l_0 до опасного размера $l_{оп}$, соответствующего излому рельса:

$$N_{ост} = \int_{l_0}^{l_{оп}} \frac{(1-r)K_{fc} - \Delta K(l)}{C\Delta K(l)^m} dl. \quad (2)$$

Момент разрушения дефектного рельса будем определять исходя из силового критерия Ирвина [4]

$$K_{max} \le K_c, \quad (3)$$

где K – КИН для характерной точки фронта трещины; K_c – критический КИН, который определяется из эксперимента, реализующего условия плоской деформации по фронту трещины [5]. Для рельсовой стали критический коэффициент интенсивности напряжений при статическом нагружении K_c – около 55 МПа·м$^{1/2}$ [3].

Обследование изломов поврежденных рельсов показало, что усталостная поперечная трещина имеет эллиптическую форму фронта и располагается в центральной части подошвы, также было зафиксировано направление развития данного дефекта – перпендикулярно продольной оси рельса [1]. В работе [6] экспериментально установлено, что рост усталостных трещин происходит в направлении, перпендикулярном главным растягивающим напряжениям. Следовательно, основной причиной роста поверхностной трещины в подошве необходимо считать его циклический изгиб, осложненный температурным растяжением и остаточными напряжениями.

Анализ напряженно-деформированного состояния был проведен для рельса Р65 с полуэллиптической поверхностной трещиной, расположенной по центру подошвы (рисунок 1,а). Были созданы конечно-элементные модели рельса с различными размерами трещины l и a и проведены расчеты с использованием программного комплекса COSMOS/M отдельно от трех видов нагрузок: единичного изгибающего момента (M = 1 кНм), единичной продольной температурной силы (N = 1 кН) и от продольных остаточных напряжений σ_r = 250 МПа. Величина σ_r была выбрана по данным работы [7].

а б

Рисунок 1 – Расположение трещины в подошве рельса (а); геометрия и характерные размеры трещины (б)

По данным численного анализа был получен коэффициент интенсивности напряжений в точке фронта трещины B (см. рисунок 1,б). Для определения КИНа нормального отрыва использовался метод, предложенный в работе [8]. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Зависимость КИНа от l для КИНа представим в виде:

$$K = f(l) \cdot \sigma\sqrt{\pi l}, \quad (4)$$

где $f(l)$ – поправочная функция; σ – номинальные напряжения, действующие в подошве рельса. Для остаточных напряжений $\sigma = \sigma_r$, при растяжении $\sigma = N/A$, при изгибе $\sigma = M/W$. Здесь A – площадь поперечного сечения; W – момент сопротивления.

Функцию $f(l)$ в виде полинома третьей степени запишем в виде:

$$f(l) = al^3 + bl^2 + cl + d, \quad (5)$$

где *a*, *b*, *c*, *d* – эмпирические коэффициенты, которые определим методом наименьших квадратов (таблица 2).

При линейной постановке задачи КИН от суммы нагрузок равен сумме КИНов, рассчитанных от каждой нагрузки в отдельности. При этом условие прочности (3) примет вид:

$$K_{\max} = K_л + K_N + K_r \le K_с, \quad (6)$$

где $K_л$, K_N , K_r, – КИНы от изгиба под воздействием локомотива, от температурной продольной силы и от остаточных напряжений соответственно.

Исходя из условия (6) были рассчитаны критические изменения температуры $T_{кр}$, при которой произойдет излом рельса. Результаты расчета для разных размеров трещины представлены в таблице 1. При этом максимальный изгибающий момент от воздействия локомотива принимался равным 30 кН·м.

Таблица 1 – Коэффициенты интенсивности напряжений нормального отрыва

Размеры трещины, мм		Коэффициенты интенсивности напряжений, МПа·м$^{1/2}$			$T_{кр}$, град
l	*a*	изгиб	температурное растяжение	остаточные напряжения	
3	1,5	$80\cdot10^{-3}$	$5{,}5\cdot10^{-3}$	11,3	-375
6	4,5	$170\cdot10^{-3}$	$8{,}3\cdot10^{-3}$	17,0	-198
9	7,5	$210\cdot10^{-3}$	$10{,}4\cdot10^{-3}$	21,3	-132
12	10,5	$250\cdot10^{-3}$	$12{,}2\cdot10^{-3}$	25,1	-92
15	13,5	$280\cdot10^{-3}$	$14{,}2\cdot10^{-3}$	29,3	-61
18	16,5	$290\cdot10^{-3}$	$15{,}0\cdot10^{-3}$	30,8	-52
21	19,5	$310\cdot10^{-3}$	$16{,}6\cdot10^{-3}$	34,5	-34

Таблица 2 – Значения коэффициентов *a*, *b*, *c* и *d* в выражении (5)

Вид нагружения	*a*	*b*	*c*	*d*
Остаточные напряжения	18260	-922	16,7	0,42
Температурное растяжение	13150	-781	15,5	0,43
Изгиб	27930	-1590	25,1	0,44

Найдем *опасный* размер дефекта. Будем считать опасным такое состояние рельса, при котором скорость роста трещины такова, что размер дефекта достигает критического размера за время, достаточное для замены рельса. Пусть этот период равен 30 тыс. циклов, что соответствует пропуску примерно 100 поездов. При этом критический размер трещины – это размер, при котором произойдет хрупкий долом рельса под нагрузкой. При этом к условию статического (6) следует добавить еще одно условие циклического разрушения:

$$K_{\max} = K_B + K_N + K_r \le K_{fc}, \quad (7)$$

где $K_в$ –максимальный КИН от воздействия вагонов.

Рассчитаем опасный $l_{оп}$ и критический $l_{кр}$ размеры дефекта при следующих условиях нагружения рельсовой плети: температура рельса – на 40° ниже температуры закрепления (температурное усилие N = 800 кН); максимальный изгибающий момент под локомотивом – 30 кН·м; параметры цикла изгибающего момента от действия грузового вагона следующие: $M_{\max}$ = 20кН·м, $M_{\min}$ = 5кН·м. При этих условиях имеем: напряжения в подошве рельса от изгиба – 69 МПа, температурные растягивающие напряжения – 97 МПа, остаточные напряже-

ния – 250 МПа. Из условия (6) получим размер дефекта $l \leq 19{,}5$ мм, из условия (7) $l \leq 8{,}9$ мм. Из двух значений критическим будет наименьшее $l_{кр} = 8{,}9$ мм.

Численно интегрируя уравнение Пэриса – Формэна (1), получим время развития дефекта. Суммируя время роста трещины, получим опасный размер дефекта, равный 7,5 мм. Рельс с трещиной такого размера следует заменить.

Проведем расчет остаточного ресурса дефектного рельса – период, за который трещина достигнет опасного размера. Предположим, что начальный размер дефекта l_0 составил 2 мм. Из выражения (2) получим, что усталостная трещина в подошве рельса увеличится до 7,5 мм за 2897 тыс. циклов нагружения. Это примерно равно пропуску 9650 поездов, считая в среднем 300 осей в поезде. Теперь зная грузонапряженность участка, среднюю массу поезда и количество поездов, можно определить время развития дефекта в более привычных единицах (часы, сутки). Таким образом, время развития трещины от минимального начального размера до опасного значения составляет менее одной десятой от общего ресурса поврежденного рельса.

Рассмотрим влияние остаточных напряжений и продольной силы на трещиностойкость рельса. Для этого повторим расчеты с разными значениями остаточных напряжений и продольных сил. При этом параметры цикла нагружения изгибающим моментом примем такими же, как и в предыдущем расчете. Результаты расчета критического и опасного размера дефекта в зависимости от величины остаточных напряжений и продольной силы приведены на рисунке 2.

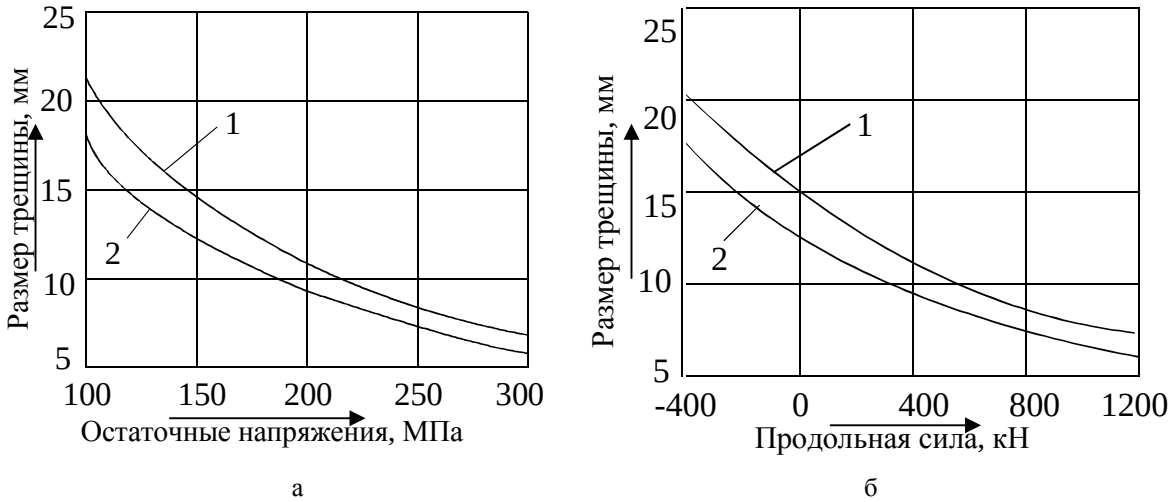


Рисунок 2 – Зависимость критической (кривая 1) и опасной (кривая 2) длины трещины от остаточных напряжений (а) и продольной силы (б)

Как видно, указанные факторы оказывают значительное влияние на прочность поврежденного рельса. Рассмотрим эффективность усиления дефектного рельса накладками. Момент инерции двух накладок составляет 1056 см^4, что в 3,3 раза меньше, чем у рельса. Изгибающий момент разделится в таком же соотношении, поэтому изгибные напряжения, следовательно, и амплитуда изменения КИНа в рельсе, уменьшатся на 23 %. На остаточные напряжения и продольную силу накладки не повлияют. При этом критический размер дефекта увеличится до 9,5 мм, опасный – до 8,2 мм, а остаточный ресурс рельса с трещиной с начальной трещиной 2 мм – до 4735 тыс. циклов. Таким образом, постановка накладок несколько увеличивает критический и опасный размер дефекта, а остаточный ресурс – на 63 % и может быть обоснованной с точки зрения безопасности движения поездов, поскольку в случае излома участок будет работать как обыкновенный стык рельсов.

Список литературы

1. Лысюк, В. С. Управлять надежностью бесстыкового пути [Текст] / В. С. Лысюк // Путь и путевое хозяйство. – 1998. – № 7. – С. 5 – 10.

2. Forman, R. G. Numerical analysis of crack propagation in a cycling loaded structure [Текст] / R. G. Forman, V. E. Keamey, R. M Engle // Journal of Basic Engineering. – 1967. – P. 459 – 464.

3. Прочность рельсов с трещинами [Текст] / Е. А. Шур, Т. Н. Киселева и др. // Вестник ВНИИЖТа. – 1984. – № 2. – С. 48 – 52.

4. Черепанов, Г. П. Механика хрупкого разрушения [Текст] / Г. П. Черепанов. – М.: Наука, 1974.– 640 с.

5. Броек, Д. Основы механики разрушения [Текст] / Д. Броек. – М.: Высшая школа, 1980. – 368 с.

6. Тихомиров, В. М. Развитие усталостных трещин смешанного типа в образцах из стали [Текст] / В. М. Тихомиров, П. Г. Суровин // ПМТФ. – 2004. – № 1. – С. 135 – 142.

7. Ахметзянов, М. Х. О механизме развития контактно-усталостных повреждений в рельсах [Текст] / М. Х. Ахметзянов // Вестник ВНИИЖТа. – 2003. – № 2. – С. 41 – 45.

8. Ахметзянов, М. Х. Определение коэффициентов интенсивности напряжений при смешанном типе нагружения трещины [Текст] / М. Х. Ахметзянов, В. М. Тихомиров, П. Г. Суровин // Известия вузов. Строительство. – 2003. – № 1. – С. 19 – 25.

УДК 656.225:65.011.56

В. Е. Гозбенко, В. А. Оленцевич

ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ РАЗМЕЩЕНИЯ И КРЕПЛЕНИЯ ГРУЗА В ВАГОНЕ

В статье представлен алгоритм проведения вычислительных экспериментов по определению сдвига груза и натяжений в элементах креплений, позволяющий повысить безопасность функционирования железнодорожной транспортной системы.

На современном этапе развития техники создано и используется огромное количество объектов, систем и комплексов различных физической природы, типа и назначения, которые объединены в класс сложных объектов. Полнота и качество выполнения объектом целевых функций определяется состоянием, в котором он находится, а само состояние характеризуется степенью соответствия параметров объекта определенным областям их значений [1].

Структура железнодорожного транспорта включает в себя филиалы и представительства компании, дочерние и зависимые общества. По видам осуществляемой деятельности филиалы компании подразделяются на филиалы – железные дороги; функциональные филиалы – перевозочные компании; филиалы в области экономического и финансового обеспечения; филиалы в области капитального строительства; филиалы в области ремонта подвижного состава; филиалы в области путевого хозяйства; филиалы в области информатизации и связи; филиалы в области социальной сферы; филиалы – проектные бюро; иные филиалы.

Организационно-технологический комплекс железнодорожного транспорта можно представить также как сеть железных дорог, непосредственно обеспечивающих потребности в перевозках, или как объект, предоставляющий услуги: грузовые и пассажирские перевозки,

услуги локомотивной тяги, ремонт подвижного состава, услуги инфраструктуры, социальной сферы и т. д., а также как систему инфраструктуры: железнодорожный путь, искусственные сооружения, станции, локомотивы, вагоны, вагонные депо, пункты технического и коммерческого обслуживания и пр. [2].

Из этого видно, что железнодорожный транспорт представляет собой многоуровневую организационно-техническую структуру и полностью соответствует понятию «система», поскольку не только обладает функционированием, но и имеет собственное поведение, историю, развитие, иерархичность, структурность, взаимодействие с внешней средой и отвечает прочим основным свойствам понятия «система». Нормальное функционирование железнодорожной транспортной системы возможно только путем слаженной и оперативной работы групп подсистем: инфраструктуры, коммерческой, грузовой, маневровой и поездной, представляющих собой своеобразные технологические процессы с характерными для каждого из них особенностями. Каждая из подсистем имеет собственную технологию работы, свое техническое оснащение, собственные основные фонды, свой специально подготовленный технический персонал.

Подсистема перевозки грузов является, на наш взгляд, особо сложной, поскольку в ее состав входит большое количество элементов, находящихся между собой и окружающей средой в различных связях. Элементами грузовой подсистемы являются грузы различной номенклатуры и сложности перевозки, большое количество компаний, участвующих в перевозочном процессе, различные типы подвижного состава, необходимого для перевозки груза, системы по предварительной подготовки некоторых родов груза к перевозочному процессу, сроки доставки скоропортящихся грузов и т. д. При этом необходимо принимать во внимание огромную протяженность железнодорожных линий, неравномерность перевозок по времени года и учитывать грузовые перевозки социальной значимости.

Анализ различных технологий доставки грузов показал, что для успешного решения вопросов организации и планирования работы всей железнодорожной транспортной системы необходимо учитывать особенности работы и условия эксплуатации всех участников перевозочного процесса. Подсистема перевозки грузов, являясь в свою очередь сама системой, состоит из большого количества подсистем различного вида и назначения, в которых решаются свои специфические задачи, а следовательно, в них протекают присущие только данной подсистеме закономерности.

Процесс перевозки грузов состоит из последовательности выполнения операций по хранению, креплению, погрузке, транспортировке, разгрузке, других необходимых операций и представляет собой единую систему доставки грузов, основной целью которой является своевременная доставка грузов с минимальными затратами.

В соответствии с поставленной целью системному анализу должны быть подвержены все элементы подсистемы перевозки грузов [3]: погрузочный, перевозочный и разгрузочный процессы.

Погрузочный процесс можно отобразить в виде алгоритма (рисунок 1).

Особенностью железнодорожной транспортной системы и ее подсистем как сложной системы является необходимость ее исследования с использованием методологии системного анализа, принятой для сложных технических объектов. Несмотря на многообразие технических и технологических операций погрузочного процесса проведенный анализ позволил выявить систему показателей, которые с максимальной точностью характеризуют свойства процесса и их взаимосвязь с параметрами и характеристиками технических средств. Выбранные показатели данного производственного процесса должны соответствовать следующим параметрам: составлять наиболее простые соотношения, не усложняющие математическую модель системы; наиболее точно характеризовать требования, предъявляемые к погрузочному процессу; достаточно полно и точно описывать его элементы и состояния; выбираться так, чтобы обеспечить их определение наиболее удобным путем; быть такими, чтобы их можно было при необходимости (на практике) изменять.

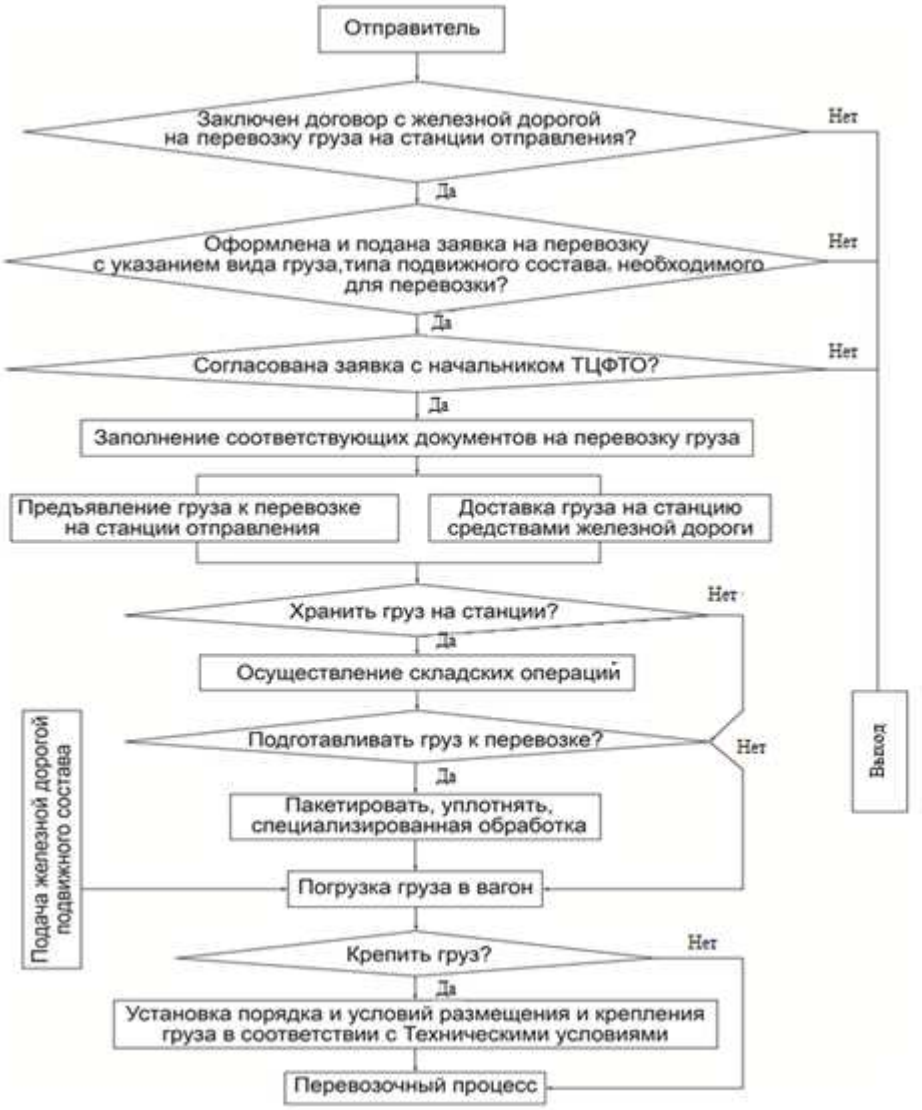


Рисунок 1 – Алгоритм погрузочного процесса

На основе изложенных выше критериев определены следующие параметры описания погрузочного процесса: наличие заявки, род груза, тип подвижного состава, параметры груза, складские операции, предварительная подготовка груза, крепление груза, схема размещения и крепления груза.

Перемещение груза связано с пунктами погрузки, пунктами выгрузки и промежуточными пунктами. Подготовка и крепление груза в пункте погрузки, на наш взгляд, является особенно важным элементом подсистемы перевозки грузов, от которого зависит сохранность самого груза, а также безопасность работы всей железнодорожной транспортной системы. Предъявляемый к перевозке груз отправитель должен подготовить таким образом, чтобы в процессе перевозки были обеспечены безопасность движения поездов, сохранность груза и грузового вагона.

Поэтому основополагающим фактором, обеспечивающим безопасность и эффективность работы железнодорожной транспортной системы и ее подсистем, на наш взгляд, является создание автоматизированной системы подготовки технических условий размещения и крепления груза в вагонах и контейнерах. Создание системы направлено на составление эскиза размещения и крепления груза в вагоне, погруженного в соответствии с Техническими условиями [4], определение потребного количества, качества и размеров крепежного материала: упорных и распорных брусков, подкладок, обвязок, растяжек, стоек и т. д., формирование полного пакета перевозочных документов.

В настоящее время в работе железнодорожной транспортной системы используются различные программы и системы автоматизации по подготовке технических условий размещения и крепления груза в вагонах и контейнерах, однако все они характеризуются все еще достаточно низкой степенью автоматизации и ограниченными функциональными возможностями. Некоторые из них порой больше похожи на обычные электронные справочники, предоставляющие грузоотправителям необходимую информацию, на основе которой пользователю предлагается решать свои задачи.

Полученные авторами результаты аналитических исследований по определению натяжений в гибких элементах креплений в виде конечных формул дают возможность обосновать рациональную технологию размещения и крепления груза в вагоне. Результаты вычислительных экспериментов по определению параметров крепления груза направлены на усовершенствование методики действующих Технических условий. Обоснование технологии размещения и крепления груза при воздействии пространственной системы сил базируется на методах теоретической механики с применением вычислительной среды Mathcad.

Алгоритм проведения вычислительных экспериментов по определению сдвига груза и натяжений в элементах креплений включает в себя следующее:

выбор физической модели крепления груза с симметричным расположением центра тяжести относительно осей пересечения вагона;

ввод исходных данных, таких как массовые и геометрические параметры груза, коэффициент трения соприкасающихся поверхностей груза и пола вагона, физико-геометрические параметры гибких элементов креплений (модуль упругости отожженной проволоки креплений, количество нитей, диаметр и проекции длины креплений на координатные оси, которые берут из чертежа с учетом масштаба), натяжение предварительных скруток проволоки элементов крепления;

вычисление пространственной системы сил, воспринимаемой средствами крепления, и ее составляющих как вдоль, так и поперек вагона;

расчет эквивалентной жесткости гибких элементов креплений от воздействия пространственной системы сил и ее составляющих как вдоль, так и поперек вагона. Выполнение статистической обработки полученных табличных данных и анализ полученных результатов;

нахождение сдвига груза по направлениям действия пространственной системы сил и его составляющих как вдоль, так и поперек вагона с учетом направляющего угла. Выполнение статистической обработки полученных табличных данных и анализ полученных результатов;

вычисление натяжений в креплениях от воздействия пространственной системы сил и от ее составляющих как вдоль, так и поперек вагона;

оформление результатов вычислительных экспериментов в виде табличных данных и выполнение статистической обработки полученных табличных данных;

подробный анализ полученных результатов и выдача практических рекомендаций по разработке рациональной технологии крепления груза в вагоне;

обоснование разработки рациональной технологии крепления груза в вагоне результатами вычислительных экспериментов.

Оценку безопасности работы железнодорожной транспортной системы по критерию сдвига груза относительно пола вагона целесообразно произвести построением динамической модели (рисунок 2). Будем рассматривать движение вагона по прямому участку пути при условии, что груз закреплен растяжками к увязочным скобам вагона в точках A_j, A_{aj}, A_{pj} и A_{apj}, а к его грузовым петлям – в точках M_i, M_{ai}, M_{pi} и M_{api}. Груз весом $\overline{G}$ симметрично размещен относительно продольной и поперечной осей симметрии вагона.

На рисунке 2 приняты следующие обозначения: j и i – индексы, показывающие количество стоечных скоб вагона и растяжек ($i = \overline{1, n_p}$ – количество растяжек); $2L$, $2B$ и $2H$ – соответственно длина, ширина и высота груза с грузовыми петлями; a_i и a_{ai} – проекции растяжек на продольную ось вагона x (a_{pi} и a_{api} – то же на – ось y); b_i и b_{ai} – проекции растяжек на поперечную ось вагона y (b_{pi} и b_{api} – то же – на продольную ось x); h_i, h_{ai} и h_{api} – проекции растяжек на вертикальную ось вагона z; l – длина растяжек; α – углы между элементами креплений с плоскостью пола вагона; β – углы между проекциями элементов креплений на плоскость пола вагона.

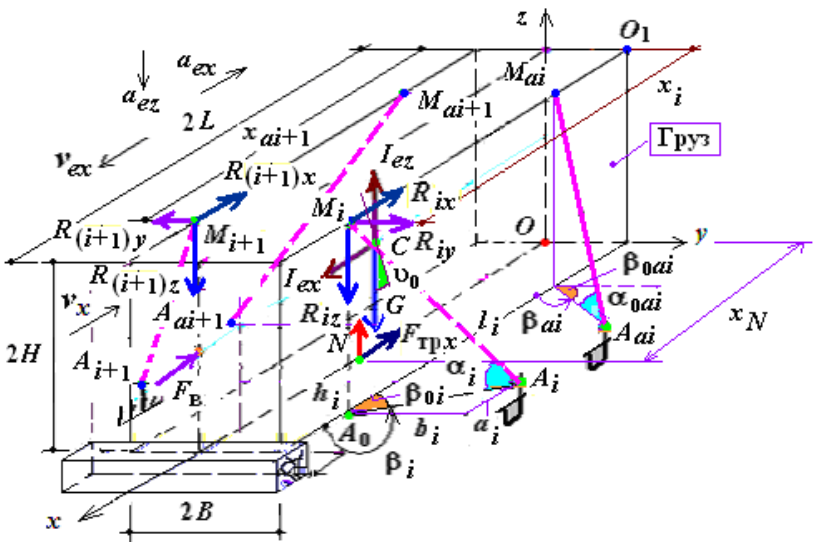


Рисунок 2 – Динамическая модель продольного сдвига груза на платформе

Вагон движется поступательно со скоростью $\bar{v}_e$ с продольными $\bar{a}_x = \bar{a}_{ex}$ и вертикальными $\bar{a}_z = \bar{a}_{ez}$ ускорениями, возникающими от неровности пути.

Растяжки испытывают продольные $\bar{I}_{ex} = \bar{I}_x$ и вертикальные $\bar{I}_{ez} = \bar{I}_z$ силы инерции. Груз испытывает воздействие силы ветра $\bar{F}_в$. $\bar{R}$ – реакция внешней связи. Действующие продольные и вертикальные силы воспринимаются парными растяжками.

Обобщающие результаты вычислений сдвига груза и натяжений в креплениях от воздействия пространственной и, как частный случай, плоской системы сил при вариации значений коэффициента продольной динамики вагона представлены в таблице.

Обобщающие результаты вычислений сдвига груза и натяжений

Коэффициент динамики вагона	Результирующая сила, кН	Эквивалент жесткости, кН/м	Сдвиг груза, мм	Натяжение в креплениях, кН				
1	2	3	4	5	6	7	8	9
$k_{дx}$, $k_{дy}$, $k_{дz}$	ΔF	$c_{экв}$	Δs	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5/ R_6
	ΔF_x	$c_{экв x}$	Δx / Δy	$R_{пр1}$	$R_{пр2}$	$R_{пр3}$	$R_{пр4}$	$R_{пр5}$
	ΔF_y	$c_{экв y}$	$\Delta x1$ / $\Delta y1$	$R_{п1}$	$R_{п2}$	$R_{п3}$	$R_{п4}$	$R_{п5}$
1,2 0,46 0,66	216,9	4263	51	5,5	7,2	26,9	26,9	32,2/12,6
	212,1	4144	50 / 11	5,5	7,23	27	27	32,4
	45,6 λ =12,13°	2154	51 / 21	4	4	2,2	1,9	6
1,15 0,46 0,66	241,75	2371	102	4,7	6,2	23,3	23,4	28/11
	236,6	4144	100 / 21	4,8	6,2	23,3	23,3	27,9
	45,6 λ =14,0°	2154	104 / 37	4	4	2,2	1,9	6

Окончание таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9
1,1 0,46 0,66	159,8	4250	38	4	5,3	19,8	19,9	23,8/9,3
	153,2	4144	36 11	4	5,2	19,5	19,6	56,73
	45,6 λ =13,37°	2154	37	4	4	2,2	1,9	6
1,05 0,46 0,66	131,9	4219	31	3,4	4,4	16,5	16,5	19,8/7,8
	123,8	4144	29 11	3,2	4,2	15,8	15,8	18,9
	45,6 λ =20,22°	2154	30 21	4	4	2,2	1,9	6
1,0 0,46 0,66	159,8	4250	38	4,1	5,3	19,8	19,9	23,8/9,3
	153,2	4144	36 11	4	5,2	19,5	19,6	23,4
	45,6 λ =23,74°	2154	37 21	4	4	2,2	1,9	6
0,95 0,46 0,66	79,3	3200	20	2,2	2,9	10,7	10,7	12,8/5
	64,9	4144	17 12	1,7	2,2	8,3	8,3	8,3
	45,6 λ =35,07°	2154	16 21	4	4	2,2	1,9	6
0,9 0,46 0,66	57,8	3351	17	1,9	2,4	9,1	9,1	10,9/4,3
	35,5	4144	11 14	0,9	1,2	4,5	4,5	5,4
	45,6 λ =52,1°	2154	8 21	4	4	2,2	1,9	6
0,85 0,46 0,66	50	2337	20	2,1	2,8	10,4	10,2	12,5/4,9
	6	4144	2,6 20	1,6	0,2	0,77	0,77	0,9
	45,6 λ =82,44°	2154	1,4 21	4	4	2,2	1,9	6
0,84 0,46 0,66	45,6	2158	21	2,3	3	11,1	11,2	13,4/5,2
	0,16	4144	0 21	0	0	0	0	0
	45,6 λ =89,8°	2154	0 21	4	4	2,2	1,9	6

В таблице $k_{дx}$, $k_{дy}$ и $k_{дz}$ – коэффициенты динамики вагона по продольной (*0x*), поперечной (*0y*) и вертикальной (*0z*) осям вагона соответственно;

ΔF – главный вектор приложенной системы сил, кН;

ΔFx и ΔFy – проекции главного вектора системы сил на оси *0x* и *0y*, кН;

Δs – сдвиг груза по направлению действия главного вектора системы сил ΔF, мм;

R_i – натяжение (усилие) *i*-го гибкого упругого элемента крепления ($i = \overline{1, 6}$), кН;

λ – угол между проекцией главного вектора системы сил на пол вагона и осью *0x*;

$c_{экв\ x}$ и $c_{экв\ y}$ – эквиваленты жесткости упругих элементов креплений вдоль и поперек вагона;

Δx и Δy – сдвиг груза вдоль и поперек вагона, мм.

В девятом столбце теблицы через дробь приведены значения натяжений в наиболее коротком по длине гибком элементе крепления l_6 = 1,812 м.

Анализируя результаты расчетов, приведенных в таблице, отметим, что натяжение в наиболее пологом по длине элементе крепления длиной l_5 = 2,66 м (при $k_{д\,x}$ = 1,2 при $k_{д\,y}$ = = 0,46 и $k_{д\,z}$ = 0,66) стало меньше (R_5 = 32,2 кН), чем допустимое (44,8 кН). По существующей технологии крепления груза натяжение в наиболее пологом по длине элементе крепления l_5 достигало 72,3 кН, что, несомненно, приводило к возникновению вероятности его разрыва. При этом наибольшее значение натяжения в наиболее коротком по длине гибком элементе крепления l_6 = 1,812 м, включенном в рекомендуемую технологию крепления груза, не превышает R_5 = 12,6 кН.

Установлено также, что значение коэффициентов динамики вагона по продольной оси $k_{д\,x}$ = 0,84 при $k_{д\,y}$ = 0,46 и $k_{д\,z}$ = 0,66 является предельным, поскольку при $k_{д\,x}$ < 0,5 значение ΔF_x < 0 по причине практического отсутствия сдвига груза вдоль ($\Delta x \approx 0$) вагона. При этом натяжение во всех элементах крепления не превышает 11 кН, что почти в четыре раза меньше, чем допустимое значение.

Таким образом, можно отметить, что по рекомендуемой технологии крепления груза элементы крепления могут выдержать большую нагрузку, на которую рассчитывают крепления в зависимости от веса груза согласно Техническим условиям, например, до нагрузки, превышающей 20 % (точнее – в 72,3/32,2 $\approx$ 1,2 раза) веса груза.

Полученными результатами вычислительных экспериментов обоснована рациональность рекомендуемой технологии крепления груза по сравнению с существующей. Доказано, что по рекомендуемой технологии крепления груза элементы крепления могут выдержать нагрузку, превышающую 30 % массы груза, что больше, чем рекомендуемое значение согласно Техническим условиям. Математическая модель дает возможность получения в итоговом расчете уменьшенного потребного числа растяжек при условиях эксплуатации, выгодных с точки зрения безопасности (случаи риска). При усложнении условий эксплуатации, влияющих на увеличение возможности возникновения случаев рисков, модель позволяет рассчитать увеличенное число растяжек. Решение в каждом конкретном случае остается за грузоотправителем.

Список литературы

1. Тихий, И. И. Системный подход к проблеме повышения эффективности процессов определения состояния сложных объектов [Текст] / И. И. Тихий, Ю. Ф. Мухопад, В. В. Кашковский // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск, 2012. – № 1 (33). – С. 107 – 116.

2. Оленцевич, В. А. Анализ причин нарушения безопасности работы железнодорожной транспортной системы [Текст] / В. А. Оленцевич, В. Е. Гозбенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск, 2013. – № 1. – С. 87 – 90.

3. Комплексная оптимизация транспортной логистической цепи с учетом взаимодействия ее элементов [Текст] / М. Н. Крипак, А. Н. Иванков и др. // Материалы межвуз. науч.-практ. конф. «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2009. – Ч. 1. – С. 145 – 147.

4. Технические условия размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах [Текст] / МПС России. – М.: Юртранс, 2005. – 543 с.

УДК 629.7.658.58.004(22)

В. В. Кашковский

МЕТОДИКА НАЗНАЧЕНИЯ ПРОБЕГА ВАГОНОВ МЕЖДУ ДЕПОВСКИМИ РЕМОНТАМИ

Представлены основные положения методологических основ управления состоянием систем технической эксплуатации, общий подход к созданию методик управления состоянием систем технической эксплуатации и методика назначения пробега вагонов между деповскими ремонтами на их основе. Даны практические рекомендации по эксплуатации грузовых вагонов.

Серийный выпуск вагонов измеряется тысячами и даже десятками тысяч вагонов. Так, например, производственная мощность «Уралвагонзавода» составляет 25 тыс. вагонов и 30 тыс. вагонокомплектов осей в год. Такие масштабы производства, в свою очередь, позволяют, например, компании «Евросиб» оперировать парком из 11,8 тыс. грузовых вагонов. Только для перевозки угля в 2012 г. на ВСЖД было задействовано 2100 ед. подвижного состава.

Применение по назначению столь объемных парков однотипных изделий (технических объектов) привело к возникновению такой сферы деятельности, как техническая эксплуатация. Техническую эксплуатацию можно определить как совокупность организационных, научных и практических мероприятий, направленных на поддержание исправности и готовности к применению однотипных изделий и осуществляемых соответствующими системами технической эксплуатации (СТЭ).

СТЭ можно разделить на два вида:

СТЭ изделий индивидуального использования. Такая система характерна, например, для владельцев личного автотранспорта, которые самостоятельно эксплуатируют каждый свою единицу техники. СТЭ изделий индивидуального использования относятся к плохо организованным системам, в которых обеспечение эффективности и безопасности применения технических объектов по назначению представляется достаточно затруднительным;

СТЭ изделий корпоративного использования. Примерами таких систем являются крупные транспортные компании железнодорожного, воздушного, речного и морского транспорта. Например, ВСЖД. Преимуществом СТЭ корпоративного использования является наличие четко обозначенных организационных связей, позволяющих обеспечить необходимую эффективность и безопасность применения технических объектов. Поэтому далее будем рассматривать только СТЭ второго вида.

В целях обеспечения эффективности и безопасности использования технических объектов СТЭ, независимо от вида транспорта, призваны обеспечить решение трех основных задач:

– полнота и качества выполнения изделиями своих функций по назначению.

– безопасность движения;

– экономичность эксплуатации.

Обеспечение высокой эффективности и безопасности использования технических объектов имеет важное народнохозяйственное значение, поскольку является одним из основополагающих направлений экономического развития страны. Так, например, в условиях массовой эксплуатации даже незначительное уменьшение затрат на периодический ремонт вагона может привести к существенной экономии финансовых средств. И наоборот, в условиях острой промышленной конкуренции любое пусть и незначительное увеличение подобных затрат способно привести к утрате внутреннего и международного рынка транспортных услуг и, как следствие, к большим финансовым потерям.

Для того чтобы конкретный технический объект мог эффективно и безопасно использоваться по назначению, СТЭ должна постоянно поддерживать его в работоспособном и гото-

вом к применению состоянии. Этот процесс принято называть управлением состоянием технического объекта.

Вопросы управления состоянием технических объектов частично рассматриваются в ряде научных дисциплин, таких как «Теория надежности в технике», «Теория структурной надежности», «Техническая диагностика», «Испытания на надежность», «Теория систем массового обслуживания» и др.

Одной из методологических посылок, на которых основаны многие научные труды, является утверждение о том, что если в рамках СТЭ осуществлять эффективное управление состоянием каждого технического объекта в отдельности, то и СТЭ в целом будет эффективна. Вместе с тем теория системного анализа предполагает, что одной из основополагающих закономерностей систем является взаимодействие части и целого (эмерджентность). Эмерджентность отрицает применимость редукции к сложным динамическим системам, к которым относится и СТЭ, поскольку сочетание двух или нескольких взаимодействующих элементов любой системы в подавляющем большинстве случаев придает системе новое качество, отличающее систему от простой суммы независимых качеств ее элементов. Исходя из этого предлагается такое понятие, как «управление состоянием СТЭ», означающее эффективное управление состоянием множества технических объектов, ее составляющих.

Очевидно, что для дальнейшего повышения эффективности и безопасности использования технических объектов необходимо развитие методов управления состоянием СТЭ. Однако несмотря на большое количество работ в области управления состоянием технических объектов методология управления состоянием СТЭ развития так и не получила.

Для эффективного управления состоянием СТЭ необходимо решить комплекс сложных и актуальных научных задач по фундаментальному исследованию законов функционирования СТЭ и разработке методов управления состоянием СТЭ. В совокупности этот комплекс научных задач составляет проблему разработки методологических основ управления состоянием СТЭ. В силу своей мультидисциплинарности и невозможности решения данной проблемы в рамках существующих теорий она может быть решена только с применением системного подхода.

По С. Л. Оптнеру система определяется заданием системных объектов, свойств и связей. Системные объекты – это вход, процесс (в случае СТЭ это процесс технической эксплуатации), выход, обратная связь и ограничение [1].

Выход СТЭ представлен вектором параметров надежности и других функционально-хозяйственных параметров СТЭ, являющихся функцией времени:

$$y(t_э) = S(m, u, h, t_э), \tag{1}$$

где $y(t_э)$ – вектор выходных параметров СТЭ; $t_э$ – время эксплуатации СТЭ или продолжительность жизни СТЭ; S – закон функционирования СТЭ; m – надежность изделий, участвующих в процессе технической эксплуатации, характеризуемая плотностью распределения наработки изделий до отказа $f(t)$; t – наработка изделия; u – обратная связь; h – ограничения СТЭ.

Вход системы $x = (m, u) \in (M, U)$, где (M, U) – множество входов системы.

Для управления состоянием СТЭ орган, принимающий решение, назначает u, например, нормативы периодичности производства деповских ремонтов $T_р \in U$, где U – множество неопределенностей на входах управления. Для этого используются отображения СТЭ $P(m, u) = y$ и $D(x, y) = m$. Данные отображения (модели) используются органом управления состоянием СТЭ для принятия решения по достижению двух основных целей управления z:

удержания СТЭ в заданном состоянии параметров надежности по отображению $P(m, u) = y$ при условии неизменной надежности изделий, поставляемых промышленностью;

наиболее эффективное применение парка изделий по назначению в условиях меняющей-

ся надежности изделий, поставляемых промышленностью, по отображению $D(x, y) = m$. Другими словами, отображение $D(x, y) = m$ необходимо для проведения обоснованной рекламационной работы.

До настоящего времени применяют преимущественно эвристические отображения СТЭ $P(m, u) = y$ и $D(x, y) = m$. Основной причиной этого является неизученность законов функционирования СТЭ (1).

Отличительной чертой СТЭ является то, что они включают в себя самоорганизующийся процесс технической эксплуатации. Самоорганизующимся этот процесс следует считать потому, что множество влияющих на него входных сигналов x заставляет элементы процесса (изделия) совершать хаотическое движение, которое, тем не менее, приводит к упорядоченности СТЭ и может быть описано законом функционирования (1).

И. Пригожин назвал упорядоченность, возникающую в открытых нелинейных системах, далеких от равновесия, и существенно связанную с рассеянием энергии, вещества или информации, диссипативными структурами [2]. При изменении ограничений в процессе технической эксплуатации происходит самоорганизация, вызванная изменившимися условиями существования, возникает новая диссипативная структура, изменяется закон функционирования (1) и получается СТЭ, отличающаяся от исходной. В соответствии с законами синергетики, исследованными Дж. Марсденом, М. Мак-Кракеном, И. Пригожиным, С.П. Капицей, Г. Хакеном и другими учеными, это явление будем называть бифуркацией СТЭ.

Исследования показали, что закон функционирования СТЭ определяется прежде всего ограничениями на систему h. При этом изменение (включение или выключение) конкретного ограничения является точкой бифуркации, в которой происходит изменение закона функционирования СТЭ (1) при неизменном m. Было установлено, что в зависимости от h законы функционирования СТЭ существенно различаются, поэтому не существует универсального аналитического аппарата, способного описать функционирование любой СТЭ [3].

Системный анализ проблемы позволил найти точки бифуркации СТЭ и выполнить синтез классов моделей СТЭ, актуальных для исследования в настоящее время.

1. Класс A. СТЭ для проведения испытания на надежность.

2. Класс B. Модель гипотетической СТЭ для проведения испытания на надежность с бесконечным множеством изделий.

3. Класс C. СТЭ, характеризуемая установившимся процессом эксплуатации до отказа парка однотипных невосстанавливаемых изделий.

4. Класс D. СТЭ, характеризуемая процессом эксплуатации до отказа парка однотипных невосстанавливаемых изделий с асинхронной наработкой.

5. Класс E. СТЭ, характеризуемая процессом эксплуатации по ресурсу парка однотипных невосстанавливаемых изделий.

6. Класс F. СТЭ, характеризуемая процессом эксплуатации по ресурсу парка однотипных восстанавливаемых изделий с асинхронной наработкой.

7. Класс G. СТЭ, характеризуемая процессом эксплуатации по ресурсу парка однотипных восстанавливаемых изделий с синхронной наработкой.

8. Класс H. СТЭ, характеризуемая процессом эксплуатации до предотказового состояния (метод эксплуатации по состоянию) парка однотипных невосстанавливаемых изделий с асинхронной наработкой.

9. Класс I. СТЭ, характеризуемая процессом эксплуатации до предотказового состояния парка однотипных восстанавливаемых изделий с асинхронной наработкой.

10. Класс J. СТЭ, характеризуемая процессом эксплуатации до предотказового состояния парка однотипных восстанавливаемых изделий с синхронной наработкой.

Исследования показали, что до настоящего времени не были исследованы законы функционирования восьми классов СТЭ из десяти: A, D, E, F, G, H, I и J. Пути аналитического описания (1) пока не известны, поэтому статистическое моделирование [4] является универ-

сальным гносеологическим методом для исследования законов функционирования СТЭ.

Ограничения СТЭ различных классов сведены в таблице 1. Подробно вопросы классификации СТЭ и исследования законов функционирования изложены в монографии [3].

Таблица 1 – Ограничения СТЭ

Ограничение	Класс СТЭ									
	A	B	C[1]	D	E	F	G	H	I	J
Синхронная наработка изделий	+	+	–	–	–	–	+	–	–	+
Дискретность $t_э$	+	–	+	+	+	+	+	+	+	+
Продолжительность этапа эксплуатации жизненного цикла	$t_{э\,max}$ [2]	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
Начальный объем парка изделий	N [3]	$N \to \infty$	$N_э$ [4]	$N_э$	$N_э$	$N_э$	$N_э$	$N_э$	$N_э$	$N_э$
Замена отказавших изделий	–	–	+	+	+	–	–	+	–	–
Ремонт отказавших изделий	–	–	–	–	–	+	+	–	+	+
Периодический ремонт	–	–	–	–	–	+	+	–	+	+
Замена изделий по предотказовому состоянию	–	–	–	–	–	–	–	+	–	–
Ремонт изделий по предотказовому состоянию	–	–	–	–	–	–	–	–	+	+
Замена изделий по выработке назначенного ресурса	–	–	–	–	+	+[5]	+[5]	–	+[5]	+[5]

Примечания. Дополнительное ограничение класса C: $t_э \to \infty$; класса A: $t_{э\,max} < \infty$; класса B: $1 << N < \infty$, $N_э = \mathrm{var}$; общее ограничение классов D – J: $N_э = \mathrm{const} < \infty$. Для классов F, G, I и J предельным состоянием считается такое, при котором дальнейшие ремонты отказов становятся экономически нецелесообразными.

На основании предложенной классификации СТЭ, разработанного оригинального программного обеспечения по статистическому моделированию СТЭ, исследования законов функционирования СТЭ и разработанных методов управления состоянием СТЭ был разработан общий подход к созданию методик управления состоянием СТЭ, предполагающий последовательное решение следующих задач.

1. Исследование области ограничений транспортной или промышленной СТЭ и идентификация ее класса. Исследование штатной структуры СТЭ, организации технического обслуживания и ремонта и других особенностей СТЭ для уточнения ее подкласса. Постановка типовой задачи по управлению состоянием СТЭ.

2. Исследование системы сбора статистических данных, осуществление сбора статистики по отказам, моделирование СТЭ класса A (необходимое условие обеспечения адекватности модели СТЭ по входу m).

3. На основе соответствующего программного обеспечения в зависимости от поставленной задачи решаются типовые задачи:

– управление состоянием СТЭ по отображениям $P(m,u) = y$ и $D(x,y) = m$;

– разработка метода или методики оценки определяющего параметра;

– сбор и исследование статистики по изменению определяющего параметра в процессе эксплуатации. Разработка методики прогноза определяющего параметра;

– назначение величины упреждающего допуска и периодичности контроля определяющего параметра.

Данный подход к созданию методик управления состоянием СТЭ является общетехническим и не зависит от функционального назначения изделий, входящих в состав СТЭ.

Воспользуемся общим подходом к созданию методик управления состоянием СТЭ для назначения периодичности производства деповских ремонтов для грузовых вагонов восьмизначной нумерации, используемых для перевозки грузов по путям общего пользования.

Система технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов предусматривает следующие виды технического обслуживания и ремонта [5]:

– техническое обслуживание ТО;
– текущий отцепочный ремонт ТР-1;
– текущий отцепочный ремонт ТР-2;
– деповский ремонт ДР;
– капитальный ремонт КР;
– капитальный ремонт с продлением срока полезного использования КРП.

Для данного вида грузовых вагонов применяется комбинированный норматив периодичности проведения ДР, учитывающий фактически выполненный объем работ и календарную продолжительность использования вагона от постройки (планового ремонта) до момента подачи вагона в первый или последующий плановый ремонт. Согласно данному нормативу периодичность очередного ДР после первого ДР составляют 110 тыс. км, при обязательной эксплуатации грузового вагона после ДР – не менее трех лет. При этом фактический пробег вагонов между ДР составляет примерно 160 тыс. км.

На основе общего подхода к созданию методик управления состоянием СТЭ были выполнены три этапа разработки методики назначения пробега вагонов между деповскими ремонтами.

Этап 1. По результатам обследования предметной области, в соответствии с данными таблицы 1 для назначения периодичности производства деповских ремонтов вагонов восьмизначной нумерации выбрана модель СТЭ класса G. Решение задачи по назначению пробега вагонов между деповскими ремонтами основано на отображении $P(m,u)=y$ СТЭ грузовых вагонов.

Этап 2. В ВЧД-8 ВСЖД были получены данные о 2398 отказах грузовых вагонов с последним ДР, приведших к отцепочному ремонту ТР-1 или ТР-2. Средний пробег вагона до отказа по этой выборке – 103,6 тыс. км. При анализе причины отказов были разбиты на четыре группы (таблица 2).

Таблица 2 – Доля отказов по причинам

Причина отказа	Число отказов	Доля в выборке,%
Отказы колесной пары	1425	59,4
Неисправности кузова	625	26,1
Неисправности тележки	269	11,2
Прочие	79	3,3
Итого	2398	100,0

В выборку включены все отказы за 11 месяцев работы 2010 г., приведшие к ТР-1 или ТР-2 в зоне ответственности ВЧД-8. Это позволяет характеризовать данную выборку как объективную. Объем полученной выборки об отказах позволяет охарактеризовать ее как представительную.

Сложность решения поставленной задачи по управлению состоянием СТЭ класса G состоит в том, что статистика по отказам, собранная в процессе технической эксплуатации грузовых вагонов, ограничена справа величиной $T_{\text{р}}$ (рисунок 1).

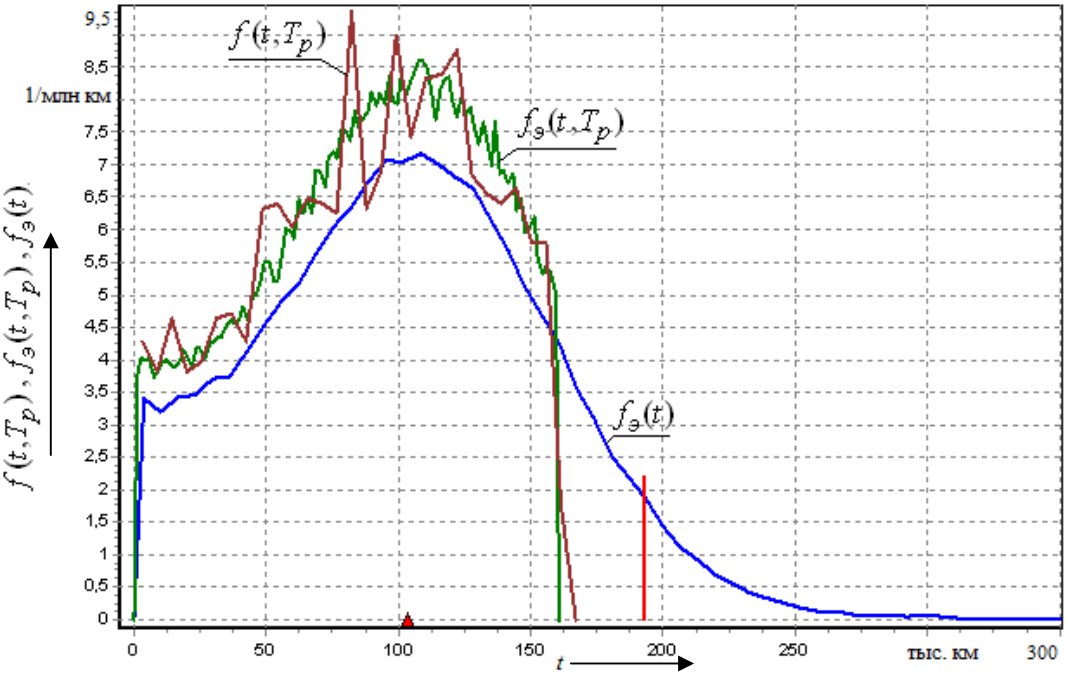


Рисунок 1 – Моделирование плотности пробега грузовых вагонов до первого отказа

На рисунке 1 обозначено:

$f(t,T_р)$ – статистическая плотность пробега грузовых вагонов до первого отказа после ДР при пробеге вагонов между ДР $T_р$ = 160 тыс. км. Построена по статистической выборке отказа грузовых вагонов объемом в 2398 отказов;

$f_э(t,T_р)$ – статистическая плотность пробега грузовых вагонов до первого отказа (результат статистического моделирования). Построена по результатам работы модели СТЭ в режиме класса А по выборке объемом 100 000 отказов. Испытания на надежность прекращены при пробеге оставшихся исправных вагонов $T_р$ = 160 тыс. км;

$f_э(t)$ – искомая статистическая плотность пробега грузовых вагонов до первого отказа (результат моделирования). Построена по результатам работы модели СТЭ в режиме класса А по выборке объемом 100 000 отказов. Испытания на надежность выполнены до отказа последнего вагона.

В рассматриваемом случае назначен $T_р$ = 160 тыс. км, поэтому собрать статистику по отказам вагонов на интервале пробега $\forall t \in [T_р, \infty]$ не представляется возможным. В свою очередь отсутствие статистики по отказам на этом интервале наработки не позволяет построить плотность распределения наработки до отказа по общепринятой методике. Для решения задачи в такой постановке необходимо методом последовательных приближений найти показатели надежности эксплуатационной плотности распределения $f_э(t)$ модели класса А, при которых для плотностей $f(t,T_р)$ и $f_э(t,T_р)$ будет выполняться соотношение:

$$\int_0^{T_p} [f(t,T_р) - f_э(t,T_р)]dt \le \varepsilon, \qquad (2)$$

где ε – некое наперед заданное положительное число.

На практике неравенство (2) решается путем подбора коэффициентов модели СТЭ класса А до визуального совпадения графиков $f(t,T_р)$ и $f_э(t,T_р)$. Для моделирования СТЭ класса А и решения данной задачи был разработан комплекс программного обеспечения [6]. Для разработки оригинальных программных комплексов [6] и [7] была использована среда программирования Borland Delphi 7 Enterprice.

Анализ характера $f(t,T_р)$ показал, что плотность распределения пробега грузовых вагонов до отказа хорошо согласуется со смесевым распределением, состоящим из суммы экспоненциального и нормального законов распределения:

$$f(t)=\frac{P_{КПН}}{T_{1КПН}}e^{-\frac{t}{T_{КПН}}}+\frac{P_{СТ}}{\sigma_{1СТ}\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(t-T_{1СТ})^2}{2\sigma_{1СТ}^2}}, \quad (3)$$

где $P_{КПН}$ – вероятность отказа вагона по причине конструктивно-производственных недостатков (КПН); $T_{1КПН}$ – средний пробег вагона до первого отказа по причине КПН; $P_{СТ}$ – вероятность отказа вагона по причине старения (СТ); $T_{1СТ}$ – средний пробег вагона до первого отказа по причине СТ; $\sigma_{1СТ}$ – среднеквадратическое отклонение пробега вагонов до отказа по причине СТ от $T_{1СТ}$.

Параметры плотности распределения пробега грузовых вагонов до отказа приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры плотности распределения пробега грузовых вагонов с последним ДР

$T_{1КПН}$, тыс. км.	$T_{1СТ}$, тыс. км.	$\sigma_{1СТ}$, тыс. км.	$P_{КПН}$	$P_{СТ}$
70	110	50	0,2	0,8

Этап 3. Для назначения периодичности производства деповских ремонтов вагонов восьмизначной нумерации необходимо использовать программный комплекс [7]. Исходными данными для работы программного комплекса являются параметры распределения пробега вагонов до отказа, заданные в таблице 3.

Основным выходным результатом работы программного комплекса [7] являются показанные на рисунке 2 графики:

$n(T_Р)=ТР1(T_Р)+ТР2(T_Р)$ – график зависимости общего числа отцепочных ремонтов от $T_р$, где $ТР1(T_Р)$ и $ТР2(T_Р)$ – число отцепочных ремонтов ТР-1 и ТР-2 соответственно, $T_р$ – заданный пробег вагонов между ДР;

$N_з(T_Р)$ – график зависимости числа ДР (плановых заводских ремонтов) от $T_р$.

Число ремонтов $n(T_р)$ и $N_з(T_Р)$ на рисунке 2 получено при эксплуатации $N_э$=10 000 вагонов при пробеге в 2 млн км каждым и периодичности производства деповских ремонтов, равной пробегу $T_р$.

Данные графики являются графическим изображением экономического критерия эффективности СТЭ $V_{фин}$, который показывает все возможные варианты затрат на обеспечение процесса технической эксплуатации (множество значений выполнения) [3]:

$$V_{фин}=G_{фин}\left[\lim_{t_э\to\infty}S(m,u,h,t_э)\right], \quad (4)$$

где $G_{фин}$ – некая целевая функция.

При решении практических задач технической эксплуатации текущее значение (решение) $v_{фин}\in V_{фин}$ можно выразить в рублях или в единицах ремонтов для СТЭ с объемом парка $N_э$ за некое достаточно большое календарное время эксплуатации $t_{эmax}$ при заданных (m,u).

Используя экономический критерий эффективности СТЭ (3), можно найти эффективное управлением СТЭ $u_{эф}$, т. е. такой ресурс или пробег $T_{ропт}$, при котором затраты на ремонт изделий будут минимальными при обеспечении достаточного уровня безопасности движения.

При использовании критерия $V_{фин}$ для назначения периодичности производства ДР в качестве оптимального пробега $T_{ропт}$ целесообразно выбрать такой, при котором выполняется равенство:

$$k_{C1}n(T_р) = k_{C2}N_з(T_р), \quad (5)$$

где k_{C1} – средняя стоимость отцепочного ремонта; k_{C2} – средняя стоимость ДР.

На рисунке 2 рассмотрен простой случай, когда $k_{C1} = k_{C2}$ и оптимальным $T_{ропт}$ считается такой пробег, при котором $n(T_р) = N_з(T_р)$.

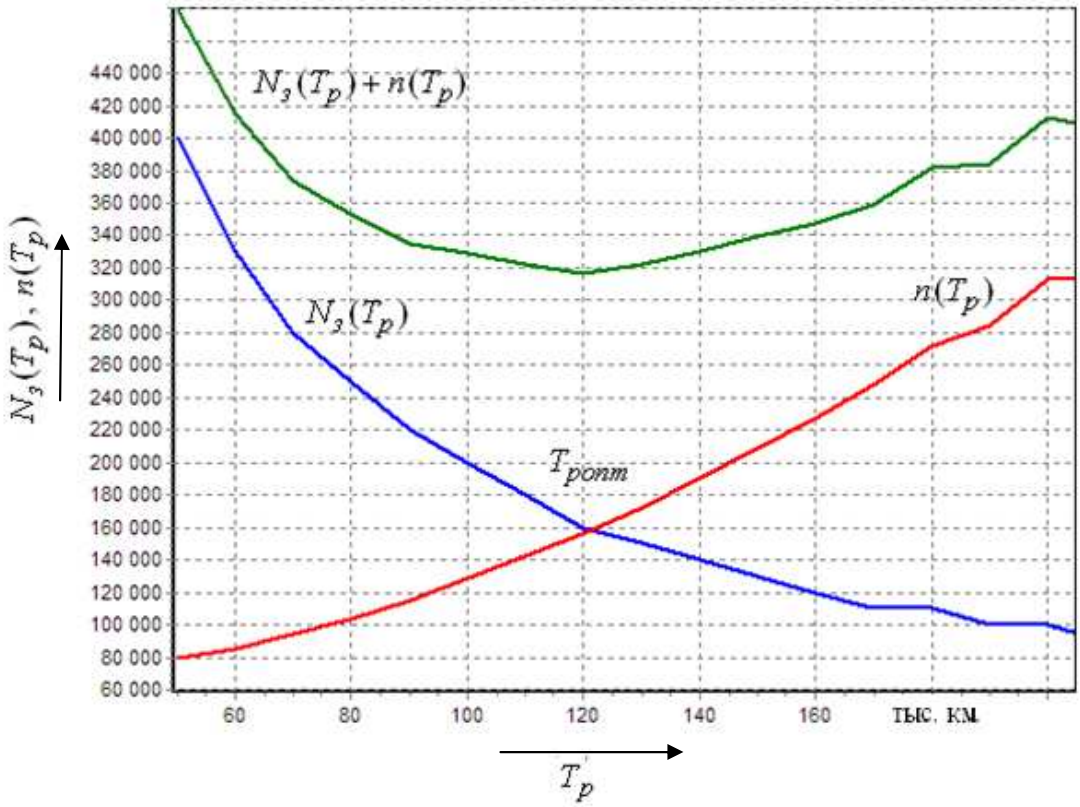


Рисунок 2 – Зависимость числа отцепочных ремонтов ТР-1 и ТР-2 и числа ДР от пробега между ДР

По результатам построения $V_{фин}$ для грузовых вагонов восьмизначной нумерации оптимальный пробег $T_{ропт}$ составил 120 тыс. км при условии равной стоимости ДР и отцепочного ремонта.

При вводе в алгоритм моделирования программного комплекса [7] данных о средней стоимости отцепочного k_{C1} и деповского k_{C2} ремонтов оценка оптимального пробега $T_{ропт}$ может быть уточнена.

Моделирование показало, что снижение пробега вагонов между ДР со 160 до 120 тыс. км снизит общие затраты на ремонт на 8 %. При этом примерно на 40 % снизится число отцепочных ремонтов при одновременном увеличении числа ДР примерно на 70 %. Такое изменение соотношения между отцепочными и деповскими ремонтами позволит повысить безопасность движения и в значительной степени упорядочить работу транспортной компании в целом. Таким образом, из результатов моделирования следует, что существующее по комбинированному критерию эксплуатации требование об обязательной службе вагонов между деповскими ремонтами не менее трех лет является неоптимальным с точки зрения экономики и безопасности движения.

Известно, что каждый регион России характеризуется своим рельефом местности. Так, например, для ВСЖД характерно большое количество участков искривления путей, спусков

и подъемов. Регион центральной России, наоборот, характеризуется плавными искривлениями пути и малыми перепадами высот. Поэтому пробег колесных пар до отказа в регионах с различающимся рельефом будет разным. Исходя из этого можно рекомендовать использование предложенной методики и программного обеспечения для назначения оптимального пробега вагонов между ремонтами в депо не по России в целом, а по каждому региону отдельно.

Список литературы

1. Оптнер, С. Системный анализ для решения деловых и промышленных проблем [Текст] / С. Оптнер – М.: Советское радио, 1969. – 216 с.

2. Пригожин, И. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур [Текст] / И. Пригожин, Д. Кондепуди. – М.: Мир, 2002. – 461 с.

3. Кашковский, В. В. Исследование законов функционирования систем технической эксплуатации. Системный подход к теории технической эксплуатации [Текст] / В. В. Кашковский // Saarbrucken: LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co, 2012. – 303 p.

4. Ермаков, С. М. Курс статистического моделирования [Текст] / С. М. Ермаков, Г. В. Михайлов. – М.: Наука, 1976. – 319 с.

5. Лукин, В. В. Вагоны. Общий курс [Текст] / В. В. Лукин, П. С. Анисимов. – М.: Маршрут, 2004. – 424 с.

6. Кашковский В. В. Программный комплекс StreamIa.exe. Обработка статистических данных о пробеге вагонов, модели СТЭ класса А. [Электронный ресурс] – электр. текст., граф. и прикладная программа / В. В. Кашковский / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2011. 1 эл. опт. диск (CD ROM) 0,589 Мбайт.

7. Кашковский, В. В. Программный комплекс Stream_IIIa.exe. Оптимизация назначенного ресурса СТЭ классов E, F и G, а также величины упреждающего допуска и периодичности контроля СТЭ классов H и J для железнодорожного транспорта. [Электронный ресурс] – электр. текст., граф. и прикладная программа / В. В. Кашковский / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2011. 1 эл. опт. диск (CD ROM) 2,124 Мбайт.

УДК 519.6:311

Ю. М. Краковский, И. А. Домбровский

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ БЕЗУБЫТОЧНОСТИ ГРУЗОВЫХ ПЕРЕВОЗОК НА ОСНОВЕ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО

Обосновано применение вероятностного анализа безубыточности на основе метода Монте-Карло для исследования грузовых перевозок как сложной стохастической системы. Анализ проведен по данным Улан-Баторской железной дороги.

Процесс грузовых перевозок железнодорожным транспортом зависит от большого числа влияющих факторов и оценивается множеством показателей эффективности. Все это затрудняет его исследование, особенно в период развития и модернизации, что характерно для данного периода времени. Учитывая сложность моделируемого объекта, авторами предлагается исследовать его с использованием методологии системного анализа, принятой для сложных технических объектов [1].

Классический подход моделирования предполагает замену исследуемого объекта моделью, пригодной для последующего экспериментирования, с целью получения необходимой информации об объекте [2]. Авторами предлагается разделить перевозочный процесс на две фазы (рисунок 1).

Входом первой фазы является множество влияющих на перевозочный процесс факторов (W), например: факторы, характеризующие подвижной состав; факторы, характеризующие техническое состояние пути и других компонентов инфраструктуры; факторы, характеризующие структурно-организационные мероприятия, и т. д. Выходом этой фазы являются факторы, являющиеся исходными данными для второй фазы (ИД). Этими исходными данными могут быть грузооборот или объем перевезенного груза, постоянные затраты, переменные затраты на единицу перевезенного груза (грузооборота), цена единицы перевезенного груза (грузооборота), возможные инвестиции и др.

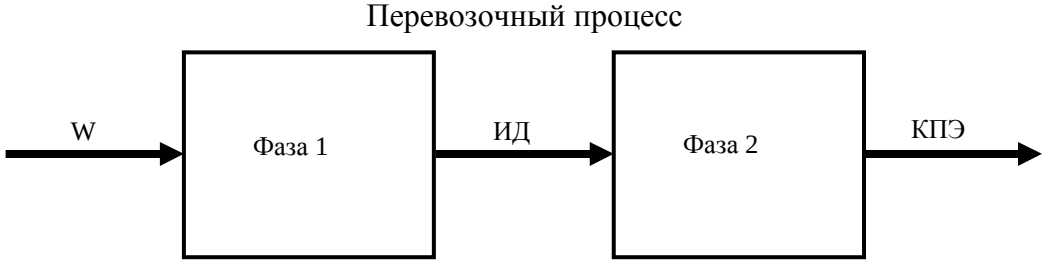


Рисунок 1 – Двухфазная структура перевозочного процесса

Вторая фаза характеризует перевозочный процесс с точки зрения его эффективности. Выходом этой фазы является множество комплексных показателей эффективности (КПЭ), например: затраты, доход, операционная прибыль, показатель рентабельности инвестиций, срок окупаемости инвестиций, различные риски и т. д.

Особенностью перевозочного процесса как сложной системы является то, что множественность и неопределенность влияющих факторов (W) приводит к случайности исходных данных, следствием чего является случайность комплексных показателей эффективности.

Авторами предлагается моделировать не весь перевозочный процесс, а лишь его вторую фазу. В качестве модели предлагается вероятностный анализ безубыточности, основанный на методе Монте-Карло. Имитационной моделью является моделирующая программа, позволяющая увязать ИД и КПЭ. Подобный подход уже апробирован при управлении доходностью пассажирских перевозок дальнего следования [3]. Мы проведем исследование применительно к грузовым перевозкам на Улан-Баторской железной дороге (УБЖД).

Эффективным инструментом исследования системы «издержки – продажи – прибыль» является анализ безубыточности. Это аналитический подход к изучению взаимосвязи между издержками и доходами при различных уровнях производства товаров, услуг или иной продукции. Точка безубыточности – это объем реализации (продаж), при котором выручка равна суммарным издержкам или при котором операционная прибыль равна нулю. На практике переменные затраты, выручка и постоянные затраты считают детерминированными величинами, что позволяет относительно просто найти точку безубыточности, а далее определить объем производства, обеспечивающий требуемую прибыль.

Железнодорожный транспорт функционирует в условиях неопределенности, особенно на этапе планирования, поэтому вполне обосновано считать издержки и выручку случайными величинами. Такой подход в литературе называют вероятностным анализом безубыточности [4]. При вероятностном подходе точка безубыточности и прибыль становятся случайными величинами, и это надо учитывать при анализе производственных ситуаций.

Для оценки КПЭ для вероятностного анализа безубыточности перевозочного процесса авторами предлагается метод статистических испытаний (метод Монте-Карло), когда в каждом испытании моделируются значения исходных данных и по ним рассчитываются значения показателей эффективности в соответствии с разработанными вычислительными алгоритмами. Далее полученные выборки обрабатываются предложенными статистическими методами. Таким образом, по каждому показателю эффективности формируется выборка объема *n:*

$$X(x_1,...,x_i,...,x_n). \quad (1)$$

Далее каждая выборка (1) обрабатывается стандартными статистическими методами: создаются гистограмма относительных частот или эмпирическая функция распределения, определяются точечные и интервальные оценки числовых характеристик и т. д.

Приведем модели расчета показателей эффективности, принятые для анализа безубыточности. Авторами они доработаны применительно к методу Монте-Карло.

1. Затраты за год:

$$V = X \cdot Q + K, \quad (2)$$

где Q – грузооборот; X – переменные затраты на единицу грузооборота; K – постоянные затраты.

2. Доход за год:

$$G = Y \cdot Q + D, \quad (3)$$

где Y – цена единицы грузооборота; D – размер возможной дотации.

3. Точка безубыточности

$$Q_0 = \frac{K - D}{Y - X} = \frac{K - D}{Z}, \quad (4)$$

где $Z = Y - X$ – вложенный доход на единицу грузооборота. При имитационном моделировании для точки безубыточности и вложенного дохода на единицу грузооборота определяются гистограммы относительных частот, а также точечные и интервальные оценки математического ожидания.

4. Вложенный доход (СМ) и операционная прибыль (ОР) вычисляются по формулам:

$$CM = (Y - X) \cdot Q + D = Z \cdot Q + D = G - X \cdot Q; \quad (5)$$

$$OP = CM - K. \quad (6)$$

При имитационном моделировании для вложенного дохода и операционной прибыли определяются гистограммы относительных частот, точечные и интервальные оценки математического ожидания точечная оценка коэффициента корреляции между вложенным доходом и операционной прибылью (ОКК);

$$OKK = (A - OCM \cdot OOP)/(OCKOCM \cdot OCKOOP), \; A = \sum cmi \cdot opi / n. \quad (7)$$

Здесь OCM и OOP – оценки математических ожиданий величин CM и OP; $OCKOCM$· и $OCKOOP$ – оценки среднеквадратических отклонений величин CM и ОР; cmi и opi – выборочные значения; n – объем выборок.

5. Операционный рычаг

$$OR = MCM / MOP, \quad (8)$$

где MCM, MOP – математические ожидания вложенного дохода и операционной прибыли. При имитационном моделировании для операционного рычага определяются точечная (OOR) и интервальная ($OR1$, $OR2$) оценки;

$$OR1 = OOR - B; \; OR2 = OOR + B; \; B = z\ell(\sum(\text{cmi-}OOR \cdot \text{opi})2)1/2/(\text{n} \cdot OOP). \quad (9)$$

Здесь $z\ell$ – квантиль нормированного нормального закона для доверительной вероятности ℓ, при ℓ = 0,95 $z\ell$ = 1,96.

6. Запас безопасности

$$ZBN = (Q - Q_0) / Q, \quad (10)$$

$$ZBY = (Q - Q_0) \cdot Y; \quad (11)$$

$$ZB(\%)=(MQ - MQ_0)/MQ. \quad (12)$$

Здесь *ZBN* – запас безопасности, когда грузооборот измеряется в натуральных единицах; *ZBY* – запас безопасности, когда грузооборот измеряется в стоимостном исчислении; ZB(%) – запас безопасности в процентах, *MQ* и MQ_0 – математические ожидания грузооборота и точки безубыточности. При имитационном моделировании для запаса безопасности (10), (11) определяются гистограммы относительных частот, а также точечные и интервальные оценки математического ожидания. Для запаса безопасности (12) определяется точечная оценка.

7. Операционный риск, содержащий три показателя:

sop – среднеквадратическое отклонение операционной прибыли;

vop – коэффициент вариации операционной прибыли в процентах,

$$vop = 100 \cdot sop/MOP; \quad (13)$$

R – операционный риск, как вероятность события,

$$R = P\ (OP < OPз); \quad (14)$$

MOP – математическое ожидание операционной прибыли, *OP*з – заданная операционная прибыль. При имитационном моделировании для среднеквадратического отклонения и коэффициента вариации определяются точечные оценки, для риска – точечная и интервальная оценки, а также оцениваются две зависимости: 1) *R*(*OPз*) при заданном *Q;* 2) *R(Q*) при заданной операционной прибыли *OP*з.

8. Показатель рентабельности инвестиций (%)

$$ROI = (OP/In) \cdot 100, \quad (15)$$

где *In* – объем инвестиций. При имитационном моделировании для показателя (15) определяются гистограмма относительных частот, а также точечная и интервальная оценки математического ожидания.

9. Риск по показателю рентабельности инвестиций как вероятность события

$$RROI = P\ (ROI < ROIЗ), \quad (16)$$

где *ROIЗ* – заданное значение показателя рентабельности инвестиций. При имитационном моделировании для риска определяются точечная и интервальная оценки, а также оценивается зависимость *RROI(ROIз*) при заданном *Q*.

10. Срок окупаемости инвестиций (в годах)

$$TO=MIn/MOP, \quad (17)$$

где *MIn* – математическое ожидание инвестиций. При имитационном моделировании для срока окупаемости (17) определяются точечная и интервальная оценки. Интервальная оценка срока окупаемости считается аналогично операционному рычагу. Увеличение прибыльности перевозок пассажиров является лишь необходимым условием эффективности инвестиционного проекта. Не менее важным показателем является срок окупаемости инвестиций.

По данным УБЖД за первые 10 месяцев 2012 г. исходные данные (оценки математических ожиданий) имеют такие значения: *K* = 210620 млн тугр.; *X* = 12,6 млн тугр./млн ткм; *Y* = = 34,1 млн тугр./млн ткм; *Q* = 10183,1 млн ткм. При использовании метода Монте-Карло был принят 10 %-ный коэффициент вариации для всех исходных данных, что позволило их моделировать как случайные величины.

На рисунке 2 приведена гистограмма относительных частот точки безубыточности (4) как случайной величины. Гистограмма имеет асимметричный вид, точка безубыточности изменяется в диапазоне от 6000 до 18000.

Оценка математического ожидания точки безубыточности равна 10116,6 млн ткм, а доверительный интервал математического ожидания равен 10075,6 и 10157,7. Расчет по средним (4) дает следующий результат: 9796,3 млн ткм. Это значение не попадает в доверительный интервал и значимо меньше оценки математического ожидания точки безубыточности.

Это является некоторым обоснованием необходимости применения вероятностного анализа безубыточности на основе метода Монте-Карло.

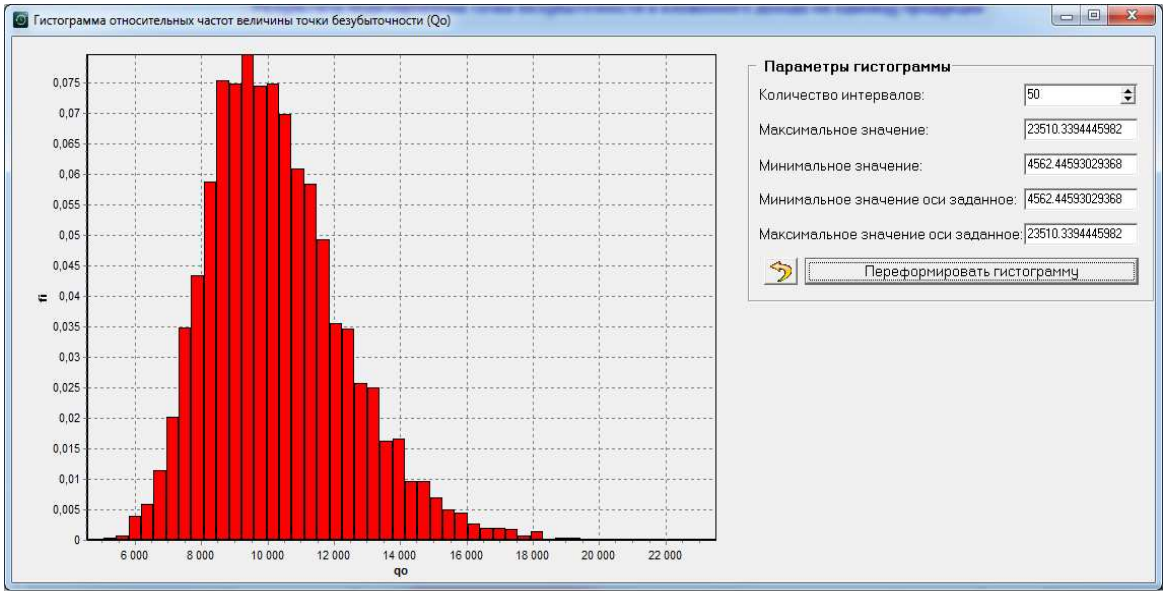


Рисунок 2 – Гистограмма относительных частот точки безубыточности

На рисунке 3 приведена гистограмма относительных частот величины операционной прибыли (6) с учетом (5) как случайной величины. Гистограмма имеет симметричный вид, операционная прибыль изменяется в диапазоне от – 100000 до 150000.

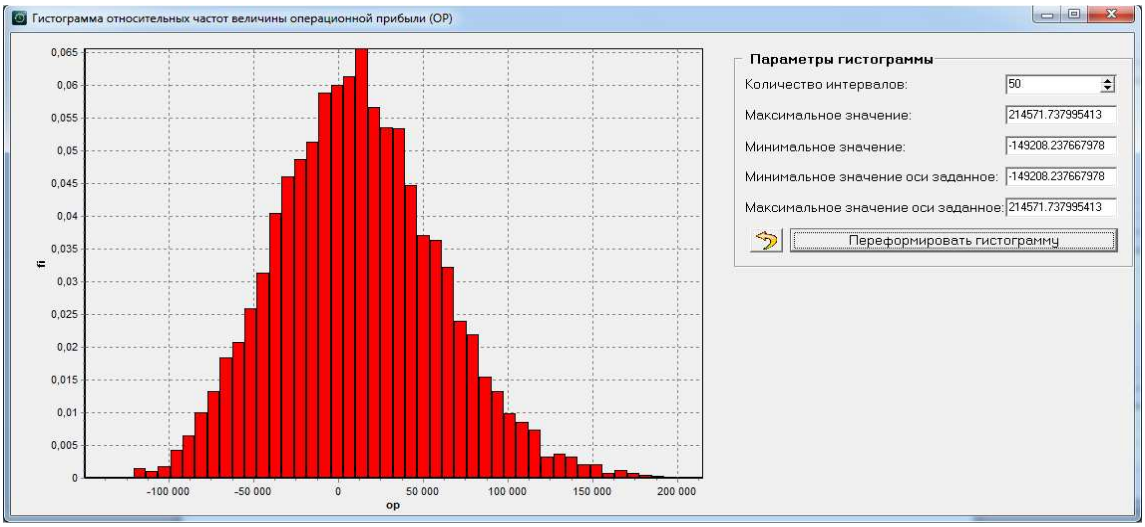


Рисунок 3 – Гистограмма относительных частот операционной прибыли

Наличие отрицательных значений указывает на возможность операционных рисков как вероятности убытка. Оценка математического ожидания операционной прибыли равна 7994,7 млн тугр., а доверительный интервал математического ожидания равен 7048,8 и 8940,6. Реальная прибыль по данным УБЖД равна 8680,4 млн тугр. и попадает в доверительный интервал, что подтверждает адекватность моделирующей программы.

На рисунке 4 приведена гистограмма относительных частот запаса безопасности (10), когда грузооборот измеряется в натуральных единицах. Гистограмма имеет явно асимметричный вид. Оценка математического ожидания величины запаса безопасности в натуральных единицах равна –0,003, а доверительный интервал для математического ожидания равен –0,008 и – 0,001. Показатель *ZBN* указывает на возможное относительное снижение текущего грузооборота без риска возникновения убытков. Из гистограммы видно, что этот показатель изменяется от –0,8 до 0,5.

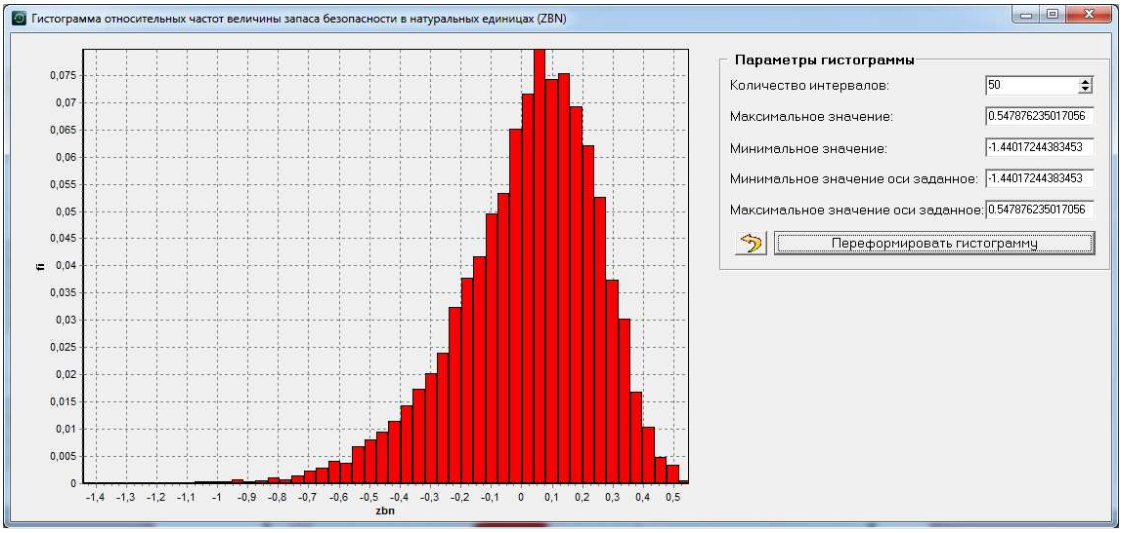


Рисунок 4 – Гистограмма относительных частот запаса безопасности,
когда грузооборот измеряется в натуральных единицах

Железнодорожный транспорт как перевозчик грузов различного назначения является сложным объектом со многими компонентами, находящимися во взаимодействии между собой и внешней средой. Все это обосновывает, что для целенаправленной реформы и составления научно обоснованного плана развития любой дороги с системных позиций необходима моделирующая программа, основанная на методе Монте-Карло, которая позволяет количественно оценить комплексные показатели эффективности перевозки грузов, например, точку безубыточности, операционную прибыль, операционный риск и др.

Список литературы

1. Клир, Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач [Текст] / Дж. Клир. – М.: Радио и связь, 1990. – 544 с.

2. Кельтон, В. Имитационное моделирование [Текст] / В. Кельтон, А. Лоу. СПб.: Питер, 2004. – 847 с.

3. Краковский, Ю. М. Управление доходностью перевозки пассажиров на основе вероятностного анализа безубыточности [Текст] / Ю. М. Краковский, Д. И. Жарий, А. С. Селиванов // Вестник ВНИИЖТа. – 2011. – № 6. – С. 35 – 39.

4. Шим, К. Основы бюджетирования [Текст] / К. Шим, Г. Сигел. – М.: Вершина, 2007. – 368 с.

УДК 656.225.073:629.067

В. И. Медведев

СИСТЕМА БЕЗОПАСНОСТИ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ОПАСНЫХ ОТХОДОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

В статье рассмотрены результаты проектирования системы безопасности при перевозке опасных отходов железнодорожным транспортом. Приведены основные элементы системы безопасности. Разработаны рекомендации по формированию программы безопасности транспортирования опасных отходов.

Понятие отходов производства и потребления, а также требования по безопасному обращению с ними установлены правовыми и нормативно-техническими актами Российской Федерации, включая такие Федеральные законы, как «Об охране окружающей среды» от

10.01.02 № 7-ФЗ; «Об отходах производства и потребления» от 24.06.98 № 89-ФЗ; «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 11.07.11 № 190-ФЗ; Уголовный кодекс Российской Федерации (Федеральный закон от 13.06.96 № 63-ФЗ, действует с 01.01.97). Практически все отходы в той или иной степени негативно воздействуют на человека, среду его обитания и объекты природной среды. Среди них выделяют те, которые требуют повышенных мер безопасности, и определяют их, как «опасные отходы» или «отходы I – IV класса опасности».

Перевозка опасных отходов осуществляется всеми видами транспорта. Проблема транспортирования опасных отходов приобретает все большее значение для железнодорожного транспорта, как и для экономики страны в целом. По нашему мнению, значение названной проблемы пока недооценивается и отсутствует комплексное представление о необходимом сочетании, взаимоувязке правовых, социальных, экономических, технико-технологических и иных ее аспектов. Формирование целостной системы безопасности транспортирования опасных отходов необходимо начать с обозначения ее структуры, наличия или отсутствия основных элементов, определения целевых показателей и критериев эффективности функционирования. В настоящей работе изложены некоторые результаты проектирования системы безопасности из комплексной программы, разработанной инициативно и подготовленной к представлению в Министерство транспорта Российской Федерации и Открытое акционерное общество «Российские железные дороги» (ОАО «РЖД»).

Проведенный авторами анализ показал, что в законодательном и нормативно-правовом регулировании вопросов обращения опасных отходов, в том числе транспортирования, не решены многие научные и методологические проблемы [1 – 3]. Многие элементы системы регулирования неполны, неоднозначны и взаимно противоречивы. Требуется предпринять серьезные усилия по научно-методической переработке предметной области, что в дальнейшем позволит целенаправленно и содержательно изменять и дополнять нормативно-технические и нормативно-правовые акты, например [4 – 6], а также разрабатывать и оптимизировать алгоритмы решения частных практических задач, в том числе в интересах отечественного железнодорожного транспорта.

Авторы считают, что в рамках системы должны быть строго и однозначно определены базовые понятия, что до настоящего времени отсутствует и приводит к неоднозначным, порой ошибочным результатам [2, 3] даже на законодательном уровне. Отсутствуют теоретически и методологически обоснованные понятия «опасные отходы», «перевозка и транспортирование опасных отходов», «опасность отходов экологическая и при их перевозке» и т. д., которые бы однозначно понимались и принимались разработчиками законов и нормативно-технической документации, а также практиками.

До настоящего времени корректно не разграничено применение терминов «перевозка», «транспортировка», «транспортирование». В таблице 1 приведены наименования законов, в которых названные понятия трактуются практически как эквивалентные, но часто это неверно. Помимо возникающих по причине подобной неопределенности юридических коллизий, затрагивающих интересы исполнительных органов государственной власти и хозяйствующих субъектов [2], появляются трудности пользования поисковыми системами по ключевым словам, при котором массив поиска документов увеличивается, по нашим оценкам, в три – пять раз.

Российская Федерация является субъектом международного сотрудничества по вопросам предотвращения опасности и регулирования обращения опасных отходов.

Согласно пункту 9 «Рекомендаций по перевозке опасных грузов. Типовых правил» [6] отходы должны перевозиться с соблюдением требований, установленных для соответствующего класса опасности по транспортной классификации, и с учетом присущих им видов опасности, а также критериев, указанных в Типовых правилах [6, 7]. Отходы, которые не подпадают под действие этих правил, но охватываются «Базельской конвенцией», могут перевозиться в соответствии с требованиями, установленными для класса 9 опасных грузов.

Таблица 1 – Принятая терминология в ряде правовых и нормативно-технических актов в сфере транспорта

Термин применительно к отходам	Документ
Перевозка	Базельская конвенция о контроле за трансграничной перевозкой опасных отходов и их удалением от 22.03.89 (Федеральный закон «О ратификации Базельской конвенции о контроле за трансграничной перевозкой опасных отходов и их удалением» № 49-ФЗ от 25.11.94) Федеральный закон «О техническом регулировании» № 184-ФЗ от 27.12.02 Федеральный закон «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» № 190 от 11.07.11
Транспортировка	Федеральный закон «Об охране окружающей среды» № 7-ФЗ от 10.01.02 Федеральный закон «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» № 52-ФЗ от 30.03.99 Уголовный кодекс Российской Федерации № 63-ФЗ от 13.06.96
Транспортирование	Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» № 89-ФЗ от 24.06.98 Гражданский кодекс Российской Федерации ГОСТ 30772-2001. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Термины и определения
Обращение	Федеральный закон «О лицензировании отдельных видов деятельности» № 99-ФЗ от 04.05.11 Федеральный закон «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» № 190 от 11.07.11
Ввоз	Федеральный закон «Об охране окружающей среды» № -ФЗ от 10.01.02 Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» № 89-ФЗ от 24.06.98
Трансграничное перемещение	Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» № 89-ФЗ от 24.06.98

В работе [6] авторами проведен дальнейший анализ терминологической неопределенности и предложены пути решения некоторых поставленных вопросов. Глава 1.2 Типовых правил ООН [6] дает следующее определение: «Перевозка – специальное перемещение груза от места его происхождения к месту назначения». ГОСТ 30772-2001. «Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Термины и определения» содержит определение: «Транспортирование отходов – деятельность, связанная с перемещением отходов между местами или объектами их образования, накопления, хранения, утилизации, захоронения и (или) уничтожения». Особенность рассматриваемой предметной области – обращение опасных отходов – заключается в необходимости учета законодательства и норм технического регулирования как в сфере обращения опасных отходов, так и в сфере перевозки опасных грузов. Целесообразной представляется такая система безопасности, которая бы максимально сближала исходные положения, классификационные признаки и другие условия. В соответствии с отечественным законодательством к перевозке могут быть допущены только те опасные отходы, которые классифицированы по двум системам:

на установление класса опасности согласно приказам Министерства природных ресурсов Российской Федерации № 511 от 15.06.01 «Об утверждении критериев отнесения опасных отходов к классу опасности для окружающей природной среды» № 785 от 02.12.02 г. «Об утверждении паспорта опасного отхода» и № 786 от 02.12.02 «Об утверждении федерального классификационного каталога отходов»;

на установление класса опасности и других параметров в соответствии с Правилами перевозок опасных грузов по железным дорогам, содержащими гармонизированные с Типовыми правилами ООН принципы классификации и критерии.

На основании проведенного анализа можно установить соотношение понятий «опасные грузы» и «отходы». Предложенное соотношение понятий «грузы» – «опасные грузы» –

«опасные отходы» – «отходы» схематично изображено на рисунке. В системе транспортной идентификации отходов авторами выделены две категории (1 и 2), две подкатегории (2.1 и 2.2), пять классификационных групп (1.1, 1.2, 2.1, 2.2.1, 2.2.2) и два блока (А – отходы опасные – и Б – отходы неопасные).

Грузы опасные (классов 1 – 9)				Грузы неопасные
Блок А. Категория 1. Группа 1.1 – Опасные отходы, охваченные Базельской конвенцией и отвечающие критериям Типовых правил ООН	Блок А. Категория 1. Группа 1.2 – Опасные отходы, охваченные Базельской конвенцией, но не отвечающие критериям Типовых правил ООН, могут быть отнесены к опасным грузам класса 9	Блок А. Категория 2. Группа 2.1 – Опасные отходы, не охваченные Базельской конвенцией (например радиоактивные), но отвечающие критериям Типовых правил ООН	Блок А. Категория 2. Группа 2.2.1 – Отходы, не охваченные Базельской конвенцией и не отвечающие критериям Типовых правил ООН, но отнесенные к опасным по национальным предписаниям (правилам, нормам)	Блок Б. Категория 2. Группа 2.2.2 – Отходы, не охваченные Базельской конвенцией и не отвечающие критериям Типовых правил ООН Отходы неопасные

Соотношение объектов, определяемых как «грузы», «опасные грузы», «отходы», «опасные отходы» (в стадии обращения). Классификационные признаки

Категория 1 – «Отходы, охваченные Базельской конвенцией», подразделяются на группы и включают в себя:

группу 1.1 – должны быть отнесены к опасным отходам и в сфере перевозки – к опасным грузам;

группу 1.2 – должны быть отнесены к опасным отходам и могут быть отнесены к опасным грузам класса 9.

Категория 2 – «Отходы, не охваченные Базельской конвенцией», подразделяется на следующие подкатегории:

2.1 – отвечающие критериям опасности Типовых правил ООН – должны быть отнесены к опасным отходам и в сфере перевозки – к опасным грузам, составляют группу 2.1;

2.2 – не отвечающие критериям опасности Типовых правил ООН, могут быть отнесены к группе 2.2.1 – к опасным отходам и опасным грузам на основании национальных регламентов;

группе 2.2.2 – к неопасным отходам и неопасным грузам.

Для разработки системы безопасности необходимо идентифицировать отходы категории 1 с позиции условий перевозки, в первую очередь присвоить номер ООН [6, 7]. В основу методики присвоения номера ООН легли положения п. 2.1.1.2 Типовых правил, выделяющие три сводных позиции: B (обобщенные позиции для точно определенной группы веществ или изделий, которые не являются позициями «не указаны конкретно (н. у. к.) »), C (конкретные позиции «н. у. к.», охватывающие какую-либо группу веществ или изделий, обладающих характерными химическими или техническими свойствами и не указанных конкретно) и D (обобщенные позиции «н. у. к.», охватывающие какую-либо группу веществ или изделий, обладающих одним или несколькими опасными свойствами и не указанных конкретно).

Сравнение групп отходов Базельского списка и номенклатуры ООН осуществлялось по

принципу поиска совпадения существенных характеристических признаков:

– химический или биологический состав;

– назначение, области образования и применения;

– физико-химические, токсикологические, взрыво-, пожароопасные свойства;

– известные экологические характеристики и другие известные обстоятельства.

Был применен разработанный авторами и реализованный в правилах [4] подход, согласно которому осуществлялась группировка опасных грузов классов опасности 2, 3, 4.1, 4.2, 4.3, 5.1, 5.2, 6.1, 6.2, 8 и 9 по аварийным карточкам. Этот подход заключается в том, что совокупность характеристических параметров вещества, материала или изделия определяет опасность, величину риска и потенциальный ущерб – воздействие на человека, инфраструктуру и окружающую природную среду; последние в свою очередь детерминируют параметры системы предупреждения и реагирования. Однако следует отметить, что комплекс параметров не определяет однозначно условия перевозки железнодорожным транспортом и всю совокупность требований безопасности.

Основные результаты приведены в таблице 2. Установлено соответствие всех групп приложения I конвенции номенклатурным номерам [7]. Представляется, что для групп – категорий приложения II, а именно У46 и У47 – твердые бытовые отходы и продукты (остатки, зола) их сжигания – в первом приближении могут быть рекомендованы относящиеся к классу опасности 9 номенклатурные позиции 3077 и 3082.

Таблица 2 – Соответствие групп (категорий) опасных отходов Базельского списка номерам ООН обобщенных рубрик опасных грузов

Группа отходов	Наименование отходов	Рекомендованные номера ООН опасных грузов
1	2	3
У1	Медицинские отходы, полученные в результате врачебного ухода за пациентами в больницах, поликлиниках и клиниках	3291, 2814, 2900, 3373, 3316
У2	Отходы производства и переработки фармацевтической продукции	3249, 3316
У3	Ненужные фармацевтические товары, лекарства и препараты	3249, 3316, 3242
У4	Отходы производства, получения и применения биоцидов и фитофармацевтических препаратов	3249, 3316
У5	Отходы производства, получения и применения консервантов древесины	1306, 1136
У6	Отходы производства, получения и применения органических растворителей	3082, 3077
У7	Отходы тепловой обработки и облагораживания материалов, содержащих цианиды	1945
У8	Ненужные минеральные масла, не пригодные для первоначально запланированного применения	3082, 3077
У9	Отходы в виде смесей и эмульсий масел/воды, углеводородов/воды	3082
У10	Ненужные вещества и продукты, содержащие полихлорированные бифенилы (ПХБ) и (или) полихлорированные терфенилы (ПХТ), и (или) полибромированные бифенилы (ПББ) или их примеси	2315, 3432, 3151, 3152
У11	Ненужные смолистые отходы перегонки, дистилляции или любой пиролитической обработки	1866, 1999
У12	Отходы производства, получения и применения чернил, красителей, пигментов, красок, лаков, олифы	2801, 3066, 3147, 1210, 1263
У13	Отходы производства, получения и применения синтетических смол, латекса, пластификаторов, клеев/связывающих материалов	1133

Окончание таблицы 2

1	2	3
У14	Ненужные химические вещества, полученные в ходе научно-исследовательских работ или учебного процесса, природа которых еще не выявлена, и (или) которые являются новыми, и чье воздействие на человека и (или) окружающую среду еще не известно	3316
У15	Отходы взрывоопасного характера, не попадающие под иное законодательство	3380, 3319, 3357, 3343, 3379
У16	Отходы производства, получения и применения фотохимикатов или материалов для обработки фотоматериалов	3316, 3173, 2006
У17	Отходы обработки металлических и пластмассовых поверхностей	1139
У18	Остатки от операций по удалению промышленных отходов	3077
У19	Карбонилы металлов	3281, 3466
У20	Бериллий, соединения берилли.	1566
У21	Соединения шестивалентного хрома	1482, 3214
У22	Соединения меди	3010, 2775, 3009, 2776
У23	Соединения цинка	1931
У24	Мышьяк, соединения мышьяка	1556, 1557, 3280, 3465, 2994, 2759, 2993, 2760
У25	Селен, соединения селена	3440, 2630, 3283
У26	Кадмий, соединения кадмия	2570
У27	Сурьма, соединения сурьмы	3141, 1549
У28	Теллур, соединения теллура	3284
У29	Ртуть, соединения ртути	2024, 2026, 2925, 3012, 2777, 3011, 1392, 3401, 3402, 2778
У30	Таллий, соединения таллия	1707
У31	Свинец, соединения свинца	2291
У32	Неорганические соединения фтора, за исключением фтористого кальция	3048, 1740
У33	Неорганические цианиды	1588
У34	Кислотные растворы или кислоты в твердом виде	3264, 3260, 3265, 3261
У35	Основные соединения или твердые основания	3262, 3263
У36	Асбест (порошок и волокна)	2212, 2590
У37	Органические соединения фосфора	3462, 3464, 3018, 2783, 3279, 3017, 2784
У38	Органические цианиды.	3276, 3439, 3275, 3273
У39	Фенолы, фенольные соединения, включая хлорфенолы	3014, 2779, 3013, 3145, 3430, 2780
У40	Эфиры	3271, 3272
У41	Галогенезированные органические растворители	1992, 3082
У42	Органические растворители, за исключением галогенизированных растворителей	1992, 3082
У43	Любые материалы типа полихлорированного дибензофурана	3082, 3077
У44	Любые материалы типа полихлорированного дибензопидиоксина	3082, 3077
У45	Органогалогенные соединения, помимо веществ, указанных в таблице (например: У39, У41, У43, У44)	2996, 2761, 2995, 3277, 3361, 2742, 3362, 2987, 2986

Из данных таблицы 2, а также из определения группы 1.2 категории 1 опасных отходов следует особое значение этих позиций, к ним также отнесены соответственно следующие группы:

а) к ООН 3077 – «Вещества, опасные для окружающей среды, твердые, н. у. к.» – У6, У8, У18, У43, У44, У46, У47;

б) к ООН 3082 – «Вещества, опасные для окружающей среды, жидкие, н. у. к.» – У6, У8, У9, У41, У42, У43, У44, У46, У47.

Кроме того, следует принять во внимание такую номенклатурную позицию ООН 3316 –

«Комплект химических веществ и комплект первой помощи», которой по определенным показателям отвечают группы У1, У2, У3, У4, У14, У16.

Для гармонизации подходов Базельского списка и номенклатуры ООН разработаны предложения по детализации, структурированию номенклатурных позиций 3077, 3082, 3316. Это даст возможность однозначного установления условий перевозки соответствующих опасных отходов и адекватных мер безопасности. Результаты данной части разработки, а также предложения по применению и алгоритму определения «классификационного шифра» опасных отходов будут представлены в отдельной работе.

На основе анализа наличных и отсутствующих элементов системы безопасности авторы пришли к выводу о целесообразности разработки межотраслевых «Правил перевозки опасных отходов в Российской Федерации», включающих в себя основные требования к отправителю, перевозчику, получателю и другим заинтересованным участникам перевозочного процесса. Предложена структура и основные положения данного нормативно-технического документа.

В качестве головного разработчика может выступить Сибирский государственный университет путей сообщения, привлекая организации-соисполнители от видов транспорта и природоохранных структур, органов надзора за санитарно-эпидемиологическим благополучием населения, а также индивидуально экспертов. Согласующими ведомствами, по-видимому, должны выступить Министерство транспорта, Министерство природных ресурсов и экологии, Роспотребнадзор и, возможно, Ростехнадзор и МЧС России.

Концепция документа основывается на наших предыдущих разработках и представленных в настоящей статье результатах. Правила должны включать в себя следующие основные разделы: Введение и актуальность (преамбула). Законодательные положения и нормативно-технические требования. Глоссарий терминов. Общие положения. Классификация, свойства и характеристики опасных отходов. Требования к организациям, участвующим в сфере обращения опасных отходов. Требования к таре и упаковке. Требования к маркировке. Требования к подвижному составу. Оформление перевозочных документов. Требования к погрузо-разгрузочным операциям. Требования охраны труда. Требования к обеспечению пожарной и экологической безопасности, санитарно-эпидемиологического благополучия. Заключительные положения.

Обязательными или рекомендованными приложениями должны выступить следующие материалы: 1. Рекомендуемые номера ООН опасных грузов для 47 групп (категорий) отходов Приложений I и II к Базельской конвенции. 2. Тесты и критерии отнесения отходов к опасным отходам и грузам. 3. Методические указания по отнесению отходов к номерам ООН 3077, 3082, 3316. 4. Методические рекомендации по оценке экологического риска опасных отходов на стадиях их обращения. 5. Методические рекомендации по оценке прямого и косвенного экологического ущерба от опасных отходов на всех стадиях их обращения. 6. Порядок регистрации информации об опасных отходах в государственном регистре. 7. Информационно-справочная система «Перевозка опасных отходов и порядок ликвидации аварийных ситуаций при их перевозке». 8. Типовые (рекомендуемые) схемы погрузки, размещения и крепления отходов на подвижном составе. 9. Методические рекомендации по оценке величины страховых платежей (гарантий) во внутреннем и международном смешанном грузовом сообщении.

Методологически корректным при данном подходе является разработка и применение дополнительных к [4] аварийных карточек на наиболее массовые опасные отходы, не охваченные действующими аварийными карточками, такие, как, например, асбестсодержащие изделия, старогодние шпалы, твердые бытовые отходы (ТБО) и зола от сжигания ТБО.

В качестве практического приложения к проектируемой системе авторами разработана по инициативе ряда железных дорог – филиалов ОАО «Российские железные дороги» – научно-техническая программа «Управление обращением опасных отходов на железнодорожном транспорте». В своем анализе помимо общесистемных положений мы исходили из пла-

нов государства по ужесточению экологических требований и экономических санкций в сфере обращения отходов. Платежи компании ОАО «РЖД» за образование и хранение отходов в последние годы составляют примерно 70 % от всего объема экологических платежей [8]. Следует также принять во внимание, что руководством страны было заявлено о планах резкого (до двадцатикратного) повышения экологических платежей в течение ближайших лет. В стратегии развития ОАО «РЖД» до 2030 г. ставится задача решения вопроса с образованием и утилизацией отходов.

В рамках программы предложено решение ряда проблем, актуальных для всех железных дорог сети. Одним из проектов явилась разработка по определению мест для создания площадок временного хранения нефтезагрязненного грунта на железной дороге – филиале ОАО «РЖД». Полученные результаты базируются на традиционном толковании понятия «железная дорога», однако даже в условиях реформирования ни исходные данные, ни алгоритм, ни результаты практически не изменяются. Анализ показал, что сбор, хранение и утилизация нефтезагрязненного грунта являются серьезной проблемой каждой железной дороги. Для железной дороги (или заменяющей ее структуры) должна быть выработана стратегия управления отходами, одним из результатов реализации которой могут стать «Методические рекомендации по оптимизации обращения опасных отходов (включая нефтезагрязненный грунт) на железной дороге – филиале ОАО «РЖД». Необходимо определить эколого-экономический оптимум с учетом действующих в настоящее время ставок, с прогнозом на перспективу. В основу стратегии должны быть положены следующие положения:

Снижение хозяйственных расходов по обслуживанию оборота отходов «образование – сбор – накопление – утилизация» и (или) передача их по договору специализированной организации», в том числе затрат на транспортирование;

снижение собственно экологических платежей в сфере обращения отходов.

Эколого-экономический расчет учитывает те обстоятельства, что полигон обращения каждой железной дороги уникален, однако ставки платежей устанавливает государство, и можно сказать, что они универсальны. Поэтому общие принципы оптимизации должны «накладываться» на конкретную географию зарождения объемов (потоков) отходов, мест их сбора и хранения и гашения этих объемов (потоков) путем переработки или передачи сторонним организациям. При этом важно определиться с хозяйствующим субъектом «железная дорога» (или заменяющая ее структура): экономические интересы входящих в него структурных подразделений должны быть идентичны.

На основе анализа статистических данных по сложившемуся положению в настоящее время разрабатывается несколько вариантов оптимизации транспортировки опасных отходов:

1) базовый – фактическая оценка на текущий момент;

2) базовый перспективный – с учетом прогнозируемой динамики изменения объемов отходов, ставок и тарифов;

3) оптимизационный стационарный – оценка производится на основе изменения схемы сбора, транспортирования, создания (ликвидации) временных полигонов хранения, возможности получения преференций по платежам;

4) оптимизационный динамический – оценка производится на основе всех факторов с учетом капитальных вложений на мобильные комплексы по переработке некоторых видов отходов, в том числе нефтезагрязненного грунта, на местах их зарождения или временного хранения.

Путем сравнения результатов по каждому варианту принимаются стратегия, программа и методические рекомендации по их реализации. В результате реализации проекта будут достигнуты цели, отвечающие стратегическим целям ОАО «РЖД»: сокращение издержек, повышение уровня экологической безопасности и обеспечение санитарно-эпидемиологического благополучия на основе внедрения оптимизационной модели. Предполагается утверждение трех нормативных документов – методические рекомендации

по определению мест для создания площадок временного хранения нефтезагрязненного

грунта;

по сокращению издержек при сборе, хранении и транспортировании нефтезагрязненного грунта;

по оптимизации обращения опасных отходов на железной дороге – филиале ОАО «РЖД».

Основы предполагаемых методик разработаны впервые, подобные работы на транспорте не проводились, и результаты не имеют аналогов. Результат будет достигнут на основе существующей нормативно-правовой базы регулирования обращения отходов, сложившейся конфигурации предприятий железной дороги и оптимизационных моделей с учетом надежного прогноза динамики процесса на три – пять лет.

В качестве основных выводов работы констатируем, что система безопасности транспортировки опасных отходов должна включать в себя разработку следующих основных элементов.

1. Создание глоссария терминов, корректное и однозначное определение базовых понятий «опасные отходы», «транспортировка», «перевозка» и т. д.; смысловая и стилистическая корректировка законодательных и нормативно-технических актов, регламентирующих транспортировку опасных отходов.

2. Создание на основе Типовых правил ООН методики транспортной классификации отходов, в которую были бы включены все известные отходы (образующиеся отходы производства и потребления, а также накапливающиеся, хранящиеся и предъявляемые к перевозке), прежде всего базельских групп; определение основных параметров для установления условий их перевозки отходов, прежде всего класса опасности и номера ООН, соответствующего одной из сводных позиций – B, C или D п. 2.1.1.2 Типовых правил. Разработка рекомендаций по внесению изменений и дополнений в номенклатуру Базельских отходов и опасных грузов ООН.

3. Включение в систему, наряду с железнодорожным, других видов транспорта, на которых осуществляется обращение опасных отходов. Придание преимущественного статуса железнодорожному транспорту как наиболее безопасному по статистическим критериям.

4. Разработка методики оценки риска обращения опасных отходов на всех стадиях (сбор, хранение, погрузка, перевозка, выгрузка с учетом безопасности, технико-экономической эффективности и экологических последствий) для решения задач выбора вариантов перевозки и установления оптимального, отвечающего интересам как хозяйствующего субъекта, так и государства; разработки системы реагирования на нештатные ситуации (инциденты, аварии).

Список литературы

1. Медведев, В. И. Разработка предложений по созданию системы управления опасными отходами в ОАО «РЖД» [Текст] / В. И. Медведев, Н. С. Лукьянчикова // Безопасность жизнедеятельности: Сб. науч. тр./ Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург, 2009. – С. 95 – 99.

2. Лукьянчикова, Н. С. Экологическая политика в сфере обращения (транспорта) опасных отходов [Текст] / Н. С. Лукьянчикова // В мире научных свершений. – Красноярск, 2010. – № 4. – С. 80 – 85.

3. Медведев, В. И. Проблемы безопасности транспортирования опасных отходов в России [Текст] / В. И. Медведев, И. О. Тесленко, Н. С. Лукьянчикова // Спассиб-Сиббезопасность-2012. Совершенствование системы управления, предотвращения и демпферирования последствий чрезвычайных регионов и проблемы безопасности жизнедеятельности населения: Сб. матер. междунар. науч. конгресса / Сибирская гос. геодезическая академия. – Новосибирск, 2012. – С. 89 – 92.

4. Правила безопасности и порядок ликвидации аварийных ситуаций с опасными грузами при перевозке их по железным дорогам [Текст] / МПС и МЧС России. – М., 1997. – 434 с.

5. Теоретические вопросы транспортирования опасных отходов и практические приложения [Текст] / В. И. Медведев, Н. С. Лукьянчикова и др. // Инновационные факторы развития Транссиба на современном этапе. Тезисы междунар. науч.-практ. конф. / Сибирский гос. ун-т путей сообщения. – Новосибирск, 2012. – Ч. I. – С. 267 – 269.

6. Рекомендации ООН по перевозке опасных грузов. Типовые правила. Шестнадцатое пересмотренное издание, ST/SG/AC.10/1/Rev.17 [Текст] / ООН. – Нью-Йорк, Женева, 2011.

7. Recommendations on the transport of dangerous goods. Manual of tests and criteria [Текст]. Fourth revised edition // United Nations. – New York and Geneva, 2003. – 430 p.

8. Черкасов, В. В. Экологическая безопасность деятельности железных дорог [Текст] / В. В. Черкасов // Железнодорожный транспорт. – 2009. – № 11. – С. 71 – 74.

УДК 621.791.75

УВЕЛИЧЕНИЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС ПРИ ИХ ВОССТАНОВЛЕНИИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ НАПЛАВКОЙ

Кузьмичев Евгений Николаевич
Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).
680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Тепловозы и тепловые двигатели», ДВГУПС.
Тел.: (4212) 40-72-28.
E-mail: accord@festu.khv.ru

Новачук Ярослав Антонович
Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).
680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Тепловозы и тепловые двигатели», ДВГУПС.
Тел.: (4212) 40-75-81.
E-mail: novachuk@inbox.ru

Дроздов Евгений Александрович
Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).
680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны», ДВГУПС.
Тел.: (4212) 40-76-56.
E-mail: vag2@festu.khv.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований, направленных на повышение ресурса обода колес подвижного состава. Используется способ электрошлаковой наплавки для восстановления поверхности катания и гребня цельнокатаных вагонных колес, а также бандажей локомотивов. Результаты экспериментальных исследований подтверждают перспективность предлагаемого способа восстановления обода железнодорожного колеса.

Ключевые слова: *электрошлаковая наплавка, низкоуглеродистая проволока, керамический флюс, колесная пара.*

THE LIFE CYCLE INCREASE OF THE RY WHEELS AT THEIR RESTORING BY ELECTROSLAG SURFACING

Kuzmichev Evgeny Nikolaevich
Far Eastern State Transport University (FESTU).
47, Str. Serysheva, Khabarovsk, 680021, Russia.
Ph.D. in Technical Sciences, the senior lecturer of the departament «Locomotives and thermal engines», FESTU.
Phone: (4212) 40-72-28.
E-mail: accord@festu.khv.ru

Novachuk Yaroslav Antonovich
Far Eastern State Transport University (FESTU).
47, Str. Serysheva, Khabarovsk, 680021, Russia.

PhD in Technical Sciences, the senior lecturer of the departament «Locomotives and thermal engines», FESTU.
Phone: (4212) 40-75-81
E-mail: novachuk@inbox.ru

Drozdov Evgeny Alexandrovich
Far Eastern State Transport University (FESTU).
47, Str. Serysheva, Khabarovsk, 680021, Russia.
PhD in Technical Sciences, the senior lecturer of the departament «Railroad cars», FESTU.
Phone: (4212) 40-76-56
E-mail: vag2@festu.khv.ru

The results of the pilot studies to increase the resource of the wheel of the rail stock are presented. The electroslag melting is used to restore the surface rolling and the wheel cam of the cars and locs wheels. The experimental research adopts its perspective.

Keywords: *electroslag surfacing, low-carbon wire, ceramic flux, rail stock wheels*.

УДК 629.46:629.4.027.23

РАСЧЕТ БОКОВОЙ РАМЫ И НАДРЕССОРНОЙ БАЛКИ ТЕЛЕЖКИ ГРУЗОВОГО ВАГОНА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Лукин Виктор Васильевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса 35.
Действительный член Российской академии транспорта (РАТ), доктор технических наук, профессор, ОмГУПС.

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

Одной из многих тем, над которыми работал В. В. Лукин в последние годы своей жизни, являлось совершенствование литых деталей тележек грузовых вагонов с помощью метода конечных элементов.

В статье показана возможность применения метода конечных элементов для анализа напряженно-деформированного состояния двух наиболее ответственных деталей трехэлементной тележки грузового вагона с целью дальнейшего совершенствования их конструкции.

Ключевые слова: *железная дорога, грузовой вагон, тележка, боковая рама, надрессорная балка, прочностный анализ, метод конечных элементов.*

CALCULATION OF THE SIDE FRAME AND BOLSTER FREIGHT CAR BOGIE FINITE ELEMENT METHOD

Victor Vasilievich Lukin
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Member of the Russian Academy of Transport, Dr.Sci.Tech., professor OSTU.

Belsky Aleksandr Olegovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
The post-graduate student of the departament « Railroad cars and railroad cars economy», OSTU.
Tel.: 8 (923) 677-19-47.
E-mail: mail-n@bk.ru

One of the many topics on which he worked V.V. Lukin in end of his life, was to improve the cast parts bogies freight wagons using the finite element method.

In this paper the authors shows that the method of finite element analysis of the stress-strain state of two of the most essential parts a three-element bogie freight cars to further improve the their design.

Keywords*: railways, freight car, bogie, side frame, bolster, strength analysis, finite element method.*

УДК 621.332

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ТОКОСЪЕМА НА МОНОРЕЛЬСОВОМ ТРАНСПОРТЕ

Маслов Геннадий Петрович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-46.

Саля Илья Леонидович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Информатика, прикладная математика и механика», ОмГУПС.
Тел.: (381-2) 31-18-66.
E-mail: salyail@mail.ru

Маркелова Ксения Сергеевна
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Преподаватель кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.
Тел.: 8(381-2)31-34-46.
E-mail: ksenia_markelova@mail.ru

В статье приведены результаты исследования взаимодействия устройств токосъема монорельсового транспорта. Проанализированы негативные последствия токосъема: акустический шум, радиопомехи и световое излучение при искрении, износ контактных элементов.

Ключевые слова*: монорельсовый транспорт, токоприемник, жесткий токопровод, качество токосъема, контактное нажатие, негативные последствия токосъема.*

ESTIMATION OF QUALITY OF THE CURRENT COLLECTION ON MONORAIL TRANSPORT

Maslov Gennadiy Petrovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr. Sci. Tech., the professor of the departament «Railway transportation electrical supply», OSTU.
Phone: (3812)31-34-46.

Salya Ilia Leonidovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph.D. in Technical Sciences, the senior lecturer of the departament «Science, Applied Mathematics and Mechanics», OSTU.
Phone: (3812) 31-18-66.
E-mail: salyail@mail.ru

Markelova Ksenia Sergeevna
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
The teacher of the departament «Railway transportation electrical supply», OSTU.
Phone: (3812)31-34-46.
E-mail: ksenia_markelova@mail.ru

In paper results researches of interacting of devices of a current collection of monorail transport are resulted. Negative aftereffects of a current collection are analyzed: acoustical noise, radio interferences and light irradiation at a sparking, deterioration of contact elements.

Keywords*: monorail transport, a current collector, rigid wire, quality of a current collection, contact pressure, negative aftereffects of a current collection.*

УДК 629.45.048

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТИ В УФ-СТЕРИЛИЗАТОРЕ МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Матяш Юрий Иванович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны, вагонное хозяйство», ОмГУПС.

Гателюк Олег Владимирович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Высшая математика», ОмГУПС.
Тел.: 8-906-918-56-17.
E-mail: GatelukOV@omgups.ru

Томилова Ольга Сергеевна
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Аспирант кафедры «Вагоны, вагонное хозяйство», ОмГУПС.
Тел.: 8-913-971-60-81.
E-mail: motovilova@yandex.ru

Томилов Валерий Викторович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, преподаватель кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.
Тел.: 8-913-610-62-67.
E-mail: tomilov_omsk@mail.ru

В статье приведены математические модели течения жидкости в УФ-стерилизаторе с концентрично установленными патрубками модернизированной системы водоснабжения пассажирского вагона, позволяющие определить поле скоростей вращательной составляющей скорости и оценить степень ее затухания в зависимости от геометрии камеры обеззараживания, входного давления в системе водоснабжения и свойств жидкости. Найдены точные решения уравнений Навье – Стокса для вращающейся жидкости между неподвижными цилиндрами бесконечной длины и ограниченными фиктивными детерминированно вращающимися крышками при условии пуазейлевого осесимметричного течения. Решение в явном виде содержит произведение цилиндрических функций Бесселя и гиперболических функций.

Ключевые слова: *пассажирский вагон, система водоснабжения, стерилизатор, ультрафиолет, уравнения Навье – Стокса, математическая модель, функции Бесселя, гиперболические функции, пуазейлевое течение.*

FLUID FLOW MODELING AT THE UV-STERILIZER FOR RAILWAY TRANSPORT PASSENGER CARS MODERNIZED WATER SYSTEM

Matyash Jury Ivanovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr. Sci. Tech., the professor of the departament «Railway cars and car enterprise», OSTU.
Phone: +7-906-918-56-17.

Gatelyuk Oleg Vladimirovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, the senior lecturer of the department «Higher Mathematics», OSTU.
Phone: +7-906-918-56-17.
E-mail: GatelukOV@omgups.ru

Tomilova Olga Sergeevna
Post-graduate student of the department «Railway cars and car enterprise», OSTU.
Phone: +7-913-971-60-81.
E-mail: motovilova@yandex.ru

Tomilov Valeriy Viktorovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph.D. in Technical Sciences, teacher of the departament «Railway cars and car enterprise», OSTU.

Phone: +7-913-610-62-67.
E-mail: tomilov_omsk@mail.ru

In article there are fluid flow mathematical models at the UV-sterilizer with concentric pipes installed in modernized water supply system of passenger car allowing to determine the velocity field of the rotational velocity component and assess the degree of attenuation depending on the chamber disinfection geometry, the inlet pressure in the water system, and fluid properties. There are exact solutions of the Navier-Stokes equations for a rotating fluid between fixed cylinder of infinite length and limited fictitious determined rotating lids provided Poiseuille axisymmetric flow. The decision explicitly contains the product of cylindrical Bessel functions and hyperbolic functions.

Keywords: *passenger carriage, water supply system, sterilizer, ultraviolet light, Navier-Stokes equations, mathematical model, Bessel functions, hyperbolic functions, Poiseuille flow.*

УДК 504.4054:628

СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ АДСОРБЕНТОВ НА ОСНОВЕ ЦЕОЛИТОВ ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ ДЛЯ ОЧИСТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД В ЛОКОМОТИВНЫХ ДЕПО

Руш Елена Анатольевна
Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского,14.
Доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Безопасность жизнедеятельности и экология», ИрГУПС.
Тел: 8(2952) 63-83-52.
E-mail: lrush@mail.ru

Обуздина Марина Владимировна
Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского,14.
Кандидат технических наук, ассистент кафедры «Безопасность жизнедеятельности и экология», ИрГУПС
E-mail: angelika86@bk.ru

В статье приводится исследование закономерностей сорбционного извлечения органических загрязнителей из промышленных сточных вод цеолитами Холинского месторождения.

Ключевые слова: *сорбция, химическая обработка, органические загрязнители, цеолиты, нефтепродукты.*

CREATING AND STUDY OF MODIFIED ADSORBENT ZEOLITE EASTERN TRANSBAIKALIA TO INDUSTRIAL WASTEWATER TREATMENT IN THE LOCOMOTIVE DEPOT

Rush Elena Anatolievna
Irkutsk State Transport University (ISTU).
15 Chernishevskogo str., Irkutsk, 664074, Russia.
Dr. Sci. Tech., the professor and head of the departament «Safety of Sustainability and Ecology Engineering», ISTU.
Phone: 8(2952) 63-83-52.
E-mail: lrush@mail.ru

Obuzdina Marina Vladimirovna
Irkutsk State Transport University (ISTU).
15 Chernishevskogo str., Irkutsk, 664074, Russia.
Ph.D. in Technical Sciences, assistant of the departament «Safety of Sustainability and Ecology Engineering», ISTU.
Phone: 8(2952) 63-83-52.
E-mail: angelika86@bk.ru

In articale investigations of conformity to sorption extraction laws of organic pollutants from industrial waste water by zeolits from Holinskoe deposit is carried out.

Keywords: *sorption, chemical processing, organic pollutants, oil products, zeolits.*

УДК 621.891:536.12

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО СООТНОШЕНИЯ ТВЕРДОСТИ В СИСТЕМЕ «КОЛЕСО – РЕЛЬС»

Ражковский Александр Алексеевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава».
Тел.: (3812) 31-18-11.
E-mail: RazhkovskiyAA@omgups.ru

Бунькова Тамара Геннадьевна
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Аспирант кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава».
Тел.: (3812) 31-18-11
E-mail: mademuassel@mail.ru

Статья посвящена одной из актуальных проблем – определению рационального соотношения твердости колеса и рельса. Разработана математическая модель процесса изнашивания пары трения «колесо – рельс». Представлены результаты исследований на интенсивность изнашивания колеса и рельса.

Ключевые слова: *колесо, рельс, соотношение твердости, износостойкость.*

RESEARCH OF THE RATIONAL HARDNESS RATIO IN THE «WHEEL – RAIL» SYSTEM

Razhkovskiy Alexander Alexeevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph.D. in Technical Sciences, the senior lecturer of the departament «Technology of transport mechanical engineering and repair of a rolling stock», OSTU.
Phone: (3812) 31-18-11.
E-mail: RazhkovskiyAA@omgups.ru

Bunkova Tamara Gennadievna
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
The post-graduate student of the departament «Technology of transport mechanical engineering and repair of a rolling stock», OSTU.
Phone: (3812) 31-18-11.
E-mail: mademuassel@mail.ru

Article is devoted to one of actual problems – to definition of the rational hardness ratio of wheel and rail. The mathematical model of wear process of friction pair «wheel – rail» is developed. Results of researches on intensity of wear process of wheel and rail are presented.

Keywords: *wheel, rail, hardness ratio, wear resistance.*

УДК 621.313.2

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПРОФИЛЯ КОЛЛЕКТОРА ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ПРИБОРА ПКП-4М

Харламов Виктор Васильевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-56-47.

Шкодун Павел Константинович
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) 31-06-57.

Ахунов Данил Асгатович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.
E-mail: dan52_25@mail.ru

Хлопцов Андрей Сергеевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.
Тел.: 8-913-145-07-23.

Статья посвящена разработке программного обеспечения для анализа и преобразования данных, полученных при исследовании поверхности коллектора тяговых электродвигателей с помощью прибора контроля профиля коллектора ПКП-4М. Применение данного компьютерного приложения в процессе обработки экспериментальных данных позволит повысить достоверность контроля профиля коллектора, а также рассчитать основные диагностические параметры, характеризующие влияние профиля на процесс коммутации.

Ключевые слова: *профиль коллектора, вихретоковый метод, тиристорный преобразователь, помехоустойчивость, медианный фильтр.*

IMPROVEMENT OF DIAGNOSING PROCESS OF COMMUTATOR PROFILE OF TRACTION ELECTRIC MOTORS WITH PKP-4M DEVICE

Harlamov Viktor Vasilevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr. Sci. Tech., professor of the department «Electrical machines and general electrical», OSTU.
Phone: (3812) 31-56-47.

Shkodun Pavel Konstantinovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph.D. in Technical Sciences, the senior lecturer of the department «Electrical machines and general electrical», OSTU.
Phone: (3812) 31-06-57.

Akhunov Danil Asgatovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
The post-graduate student of the department «Electrical machines and general electrical», OSTU.
E-mail: dan52_25@mail.ru

Khloptsov Andrey Sergeevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
The post-graduate student of the department «Electrical machines and general electrical», OSTU.
Phone: 8-913-145-07-23.

This article is devote to the development of software for analyzing and transforming data from studies of the collector surface traction motors using a device of control profile commutator PKP-4M. The use of this computer application during the processing of the experimental data will improve the reliability of the control profile of the commutator, and to calculate the main diagnostic parameters characterizing the effect of the profile on the commutation process.

Keywords: *collector profile, vortex-current method, thyristor converter, noise stability, median filter.*

УДК 331.33

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ НЕТЯГОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Авилов Валерий Дмитриевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-18-27.
E-mail: AvilovVD@omgups.ru

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

Несмотря на существенный прогресс в развитии систем учета наблюдаются практически повсеместный рост отчетных потерь электроэнергии и снижение ее качества. Наряду с внедрением современного энергоэффективного электрооборудования проблему повышения эффективности использования электрической энергии в стационарной энергетике можно решить за счет внедрения активно-адаптивных технологий управления работой компенсирующих устройств, управляемых средств регулирования напряжений, коммутационного и силового оборудования и их диагностирования на основе цифровых технологий, в том числе для автоматического поддержания минимума потерь в сетях при изменении нагрузок. Предлагается система управления объектами электроснабжения нетяговых потребителей на базе адаптивных технологий и аппаратно-программного комплекса оптимизации параметров режима в реальном времени.

Ключевые слова: *качество электроэнергии, управление объектами, оптимизация параметров режима, программный комплекс, интеллектуальная сеть.*

QUALITY ELECTRICITY DISTRIBUTION NETWORKS NOT CONSUMERS TRACTION

Avilov Valery Dmitrievich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr. Sci. Tech., professor, head of the department «Electrical machinery and general electrical», OSTU.
Phone: (3812) 31-18-27.
E-mail: AvilovVD@omgups.ru

Tretyakov Eugeniy Aleksandrovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph.D. in Technical Sciences, associate professor of the department «Electrical machinery and general electrical», OSTU.
Phone: (3812) 31-18-27.
E-mail: TretyakovEA@omgups.ru

Krause Anrdey Viktorovich
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

Despite significant progress in the development of accounting systems, there is almost universal growth accounting losses of electricity and reduce its quality. Along with the introduction of modern energy efficient electrical problem efficiency of electric energy in the stationary energy sector can be achieved through the implementation of active-adaptive technologies for controlling the operation of compensating devices, controlled means of voltage control, switching and power equipment and diagnosis based on digital technology, including automatically maintain a minimum transmission losses when the load. Management of objects offered no traction electricity consumers based on adaptive technology and hardware-software optimization mode parameters in real time.

Keywords: *power quality, facilities management, optimization mode settings, software system, smart grid.*

УДК 621.331

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Закарюкин Василий Пантелеймонович
Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского,14.
Доктор технических наук, доцент, ИрГУПС.
Тел.: (3952) 63-83-45.
E-mail: zakar@irk.ru

Крюков Андрей Васильевич
Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского,14.
Член-корреспондент АН ВШ РФ, доктор технических наук, профессор, ИрГУПС.
Тел.: (3952) 63-83-45.
E-mail: and_kryukov@mail.ru

Шульгин Максим Сергеевич
Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского,14.
Аспирант, ИрГУПС.

Предложен новый метод параметрической идентификации трехобмоточных трансформаторов тяговых подстанций, отличающийся от известных использованием фазных координат и построением модели трансформатора в виде решетчатой схемы замещения, элементы которой соединены по схеме полного графа.

Ключевые слова: *тяговые трансформаторы, параметрическая идентификация, фазные координаты.*

PARAMETRIC IDENTIFICATION OF THE TRANSFORMER POWER TRACTION SUBSTATION

Zakaryukin Vasiliy Panteleymonovich
Irkutsk State Transport University (ISTU).
15 Chernishevskogo str., Irkutsk, 664074, Russia.

Ph. D. in Technical Science., the associate professor, ISTU.
Phone: (3952) 63-83-45.
E-mail: zakar@irk.ru

Kryukov Andrey Vasilievich
Irkutsk State Transport University (ISTU).
15 Chernishevskogo str., Irkutsk, 664074, Russia.
Ass.. Member of High School Academy of Science, Ph.D., professor, ISTU.
Phone: (3952) 63-83-45.
E-mail: and_kryukov@mail.ru

Shulgin Maxim Sergeevich
Irkutsk State Transport University (ISTU).
15 Chernishevskogo str., Irkutsk, 664074, Russia.
Post-graduate student, ISTU.

The new method of parametrical identification of three winding transformer by using phase domain is proposed. Transformer model represents as lattice equivalent circuit.

Keywords: *traction transformers, parametrical identification, phase domain.*

УДК 621.316.97

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ НА ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЯХ

Сырецкая Анастасия Олеговна
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Аспирант кафедры «Системы передачи информации», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-06-94.
E-mail:nastja.ivanova@gmail.com

Слептерева Надежда Константиновна
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Аспирант кафедры «Системы передачи информации», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-06-94.
E-mail: viniwedal@mail.ru

Зуб Константин Сергеевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Аспирант кафедры «Системы передачи информации», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-06-94.
E-mail: zubkonst@gmail.com

Приведены результаты измерения составляющих электромагнитных помех на тяговых подстанциях постоянного и переменного тока.

Ключевые слова: *тяговая подстанция, электромагнитные помехи, гармоники, закон распределения.*

EXPERIMENTAL STUDY OF ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE ON TRACTION SUBSTATION

Syretskaya Anastasia Olegovna
Omsk State Transport University (OSTU)
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
The post-graduate student of the department «Information transfer system», OSTU.
Phone: (3812) 31-06-94.
E-mail: kandaev_va@mail.ru

Slepterева Nadezhda Konstantinovna
Omsk State Transport University (OSTU)
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
The post-graduate student of the department «Information transfer system», OSTU.
Phone: (3812) 31-06-94.
E-mail: viniwedal@mail.ru

Zub Konstantin Sergeevich
Omsk State Transport University (OSTU)
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
The post-graduate student of the department «Information transfer system», OSTU.
Phone: (3812) 31-06-94.
E-mail: zubkonst@gmail.com

The results of measuring the components of electromagnetic interference on DC traction substations and AC.

Keywords: *traction substation, electromagnetic interference, harmonics, distribution law.*

УДК 681.51

СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ОСНОВЕ ПРИБЛИЖЕННЫХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ВЫНУЖДЕННЫМИ МЕХАНИЧЕСКИМИ КОЛЕБАНИЯМИ ВИБРОСТЕНДОВ

Когут Алексей Тарасович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-05-89.
E-mail: kogutat@gmail.com

В статье рассматривается применение в вибрационных стендах технической диагностики механических изделий подвижного состава железнодорожного транспорта систем управления механическими колебаниями на основе более эффективных модернизированных нелинейных алгоритмов обратной диАвторамики.

Ключевые слова: *механические изделия подвижного состава, вибродиагностика, колебания подвижной части, пневмоподвеска, контроллер, алгоритм управления, нелинейная обратная задача диАвторамики, линеаризация, полиномиальная аппроксимация, имитационное моделирование.*

SYSTEM FOR TECHNICAL DIAGNOSTICS OF PRODUCTS OF RAILWAY TRANSPORT SYSTEMS ON THE BASIS OF APPROXIMATE ALGORITHMS TO CONTROL MECHANICAL VIBRATIONS

Kogut Aleksey Tarasovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr. Sci. Tech., professor of the department « Automation and control systems », OSTU.
Phone: (3812) 31-05-89.
E-mail: kogutat@gmail.com

The article discusses the control systems for mechanical vibrations on the basis of improved modernized nonlinear inverse dynamics algorithms and its use for vibratory stands of technical diagnostics to diagnose mechanical products of railway transport systems.

Keywords: *mechanical products of railway transport systems, vibration diagnostics, vibration of rolling-stock, pneumatic suspension, controller, control algorithm, non-linear inverse problem of dynamics, linearization, polynomial approximation, simulation.*

УДК 621.317

АДАПТИВНЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ В ТРЕХФАЗНЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Чижма Сергей Николаевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-05-89.

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.
Тел.: (3812) 31-05-89.

Описан метод определения прямой и обратной последовательностей основной гармоники напряжений и токов в трехфазных сетях систем электроснабжения, основанный на преобразовании Кларка и адаптивной фильтрации.

Ключевые слова: *преобразование Кларка, прямая и обратная последовательность, трехфазная сеть, адаптивный фильтр, несимметрия.*

ADAPTIVE METHOD FOR FINDING SYMMETRICAL COMPONENTS IN THREE-PHASE ELECTRIC SUPPLY SYSTEMS

Chizhma Sergei Nikolaevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph.D., associate professor, head of the department «Automation and Control Systems», OSTU.
Phone: (3812) 31-05-89.

Lavrukhin Andrey Aleksandrovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph.D., associate professor of the department «Automation and Control Systems», OSTU.
Phone: (3812) 31-05-89.

Under consideration the method to determine the positive and negative sequences of fundamental voltage and current harmonic in the three-phase power supply systems, based on the Clark transformation and adaptive filtering.

Keywords: *Clarke transformation, direct sequence, reverse sequence, three-phase, adaptive filtering, asymmetry.*

УДК 625.143.482

ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ УСЛОВИЙ И РЕЗЕРВА ПОПЕРЕЧНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ В КРИВЫХ УЧАСТКАХ БЕССТЫКОВОГО ПУТИ ПРИ ОТСТУПЛЕНИЯХ ОТ НОРМ СОДЕРЖАНИЯ В ПЛАНЕ

Атапин Виталий Владимирович
Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС).
443066, г. Самара, Безымянный 1-й пер., 18.
Аспирант, преподаватель кафедры «Путь и строительство железных дорог», СамГУПС.
E-mail: vitap88@rambler.ru

В статье рассматривается пример реализации методики оценки условий и резерва поперечной устойчивости в кривых участках бесстыкового пути при отступлениях от норм содержания в плане. Приводятся результаты исследований данной методики, описывается ее положительный эффект.

Ключевые слова: *кривизна железнодорожного пути, радиус круговой кривой, длина осреднения, устойчивость бесстыкового пути, сигнальный файл, температура закрепления рельсовых плетей, вагон-путеизмеритель, безопасность движения поездов.*

EXAMPLE OF THE METHODS TO EVALUATE CONDITIONS AND RESERVE OF TRANSVERSE STABILITY IN CWR CURVES UNDER ABNORMAL TRACK MAINTENANCE

Atapin Vitaly Vladimirovich
Samara State Transport University (SSTU).
18, Unnamed 1-st st., Samara, 443066, Russia.
Post-graduate student, teacher of the department «Way and the construction of railways», SSTU.
E-mail: vitap88@rambler.ru

Example of the methods to evaluate conditions and reserve of transverse stability in CWR curves under abnormal track maintenance is discussed in the article. The author presents the results of the research of this method and also its positive effect is described.

Keywords: *the curvature of the railroad track, the radius of the circular curve, averaging length, stability of the continuous welded railroad track, the signal file, the anchorage temperature of rails, track measurement car, train safety.*

УДК 625.143:620.19

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЕРШИНЫ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ В ГОЛОВКЕ РЕЛЬСА

Кутовой Виктор Петрович
Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).
630049, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191.
Доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий кафедрой «Строительная механика», СГУПС.
Тел.: (383) 328-04-45.
E-mail: strmech@sgups.stu.ru

Шабанов Александр Петрович
Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).
630049, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительная механика», СГУПС.
Тел.: (383) 328-04-45.
E-mail: strmech@sgups.stu.ru

Шакиртов Максим Маратович
Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).
630049, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191.
Аспирант кафедры «Строительная механика», СГУПС.
Тел.: (383) 328-04-45.
E-mail: strmech@sgups.stu.ru

Рассмотрена возможность развития усталостных трещин в поле внешних сжимающих напряжений. Построена конечноэлементная модель, имеющая узкий трещиноподобный дефект с вершиАвторами, очерченными по окружности, которая нагружалась пульсирующей сжимающей нагрузкой. Анализировалось напряженно-деформированное состояние в вершине этого дефекта по истечению каждого полуцикла нагружения. Показано, что такая нагрузка вызывает в исследуемой области симметричный цикл нагружения с существенными сжимающими и растягивающими напряжениями. В процессе роста количества циклов нагружения абсолютная величина этих напряжений увеличивается. Полученные результаты позволяют построить возможные схемы развития контактно-усталостных и усталостных повреждений в рельсах.

Ключевые слова: *усталостная трещина, сжимающий пульсирующий цикл нагружения, пластическая зона.*

INVESTIGATION OF STRESS DISTRIBUTION NEAR THE TIP OF THE FATIGUE CRACK INSIDE RAIL'S HEAD

Kutovoy Viktor Petrovich
Siberian State Transport University (SSTU).
191, st. D. Kovalchuk, Novosibirsk, 630049, Russia.
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, senior researcher, head of the department «Structural Mechanics», SSTU.
Phone: (383) 328-04-45.
E-mail: strmech@sgups.stu.ru

Shabanov Alexander Petrovich
Siberian State Transport University (SSTU).
191, st. D. Kovalchuk, Novosibirsk, 630049, Russia.
Ph.D., associate professor of the department «Structural Mechanics», SSTU.
Phone: (383) 328-04-45.
E-mail: strmech@sgups.stu.ru

Shakirtov Maxim Maratovich
Siberian State Transport University (SSTU).
191, st. D. Kovalchuk, Novosibirsk, 630049, Russia.
Post-graduate student of the department «Structural Mechanics», SSTU.
Phone: (383) 328-04-45.
E-mail: strmech@sgups.stu.ru

The possibility of fatigue crack propagation in the region of compression stresses is considered. After each semi-cycle of cyclic loading the stress-strain distribution near the tip of the crack is determined by the finite element method. It is shown that maximum of the tension stresses increases in the region of compression. The obtained results allow to present the possible ways of the above-mentioned fatigue crack propagation.

Keywords: *fatigue crack, cyclic compression loading, plasticity region.*

УДК 625.12:624.131.53

ДИНАМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОЕЗДОВ НА ЗЕМЛЯНОЕ ПОЛОТНО

Смолин Юрий Петрович
Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).
630049, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Геология, основания и фундаменты», СГУПС.
Тел.: +7 (383) 328-04-69.
E-mail: yurij.smolin@bk.ru

Исследованы уровни вибрации в земляном полотне при движении поездов. Произведен анализ записанных акселерограмм и установлены ускорения колебаний по поперечному сечению насыпи. Произведены расчеты устойчивости насыпей с учетом воздействия поездной нагрузки.

Ключевые слова: *земляное полотно, поездная нагрузка, датчики виброперемещения, расчетные схемы устойчивости насыпи, диАвторамический стабилометр.*

ROLLING LOAD DYNAMIC INFLUENCE ON THE RAILWAY EMBANKMENTS

Smolin Jury Petrovich
Siberian State Transport University (SSTU).
191, st. D. Kovalchuk, Novosibirsk, 630049, Russia.
Dr. Sci. Tech., professor of the department «Geology, basis and foundations», SSTU.
Phone: +7 (383) 328-04-69.
E-mail: yurij.smolin@bk.ru

Vibration levels in the subgrade for the movement of trains are investigated. analysis of the recorded accelerograms is made, acceleration fluctuations on the cross section of the embankment

are installed. Calculations of the stability of embankments with the effects by the train load are produced.

Keywords: *railway embankments, train load, vibration sensor, embankment stability design models, dynamic stabilometer.*

УДК 625.033:620.178.311.6

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ РЕЛЬСА С ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИМ ПОВРЕЖДЕНИЕМ

Тихомиров Виктор Михайлович
Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).
630049, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Строительная механика», СГУПС.
Тел.: (383) 328-05-42.
E-mail: twm@stu.ru

Проведены исследования зарождения и развития усталостной трещины в рельсах с термомеханическим повреждением. На основе циклических испытаний натурных рельсовых проб и численного моделирования напряженно-деформированного состояния рельса с трещиной были определены характеристики трещиностойкости и параметры кинетики развития усталостных трещин в рельсовой стали.

Ключевые слова: *термомеханическое повреждение рельса; усталостная трещина в головке рельса; характеристики трещиностойкости рельсовой стали; кинетическая диаграмма разрушения.*

FATIGUE STRENGTH ANALYSIS OF RAIL WITH THERMOMECHANICAL DAMAGE

Tikhomirov Viktor Mikhailovich
Siberian State Transport University (SSTU).
191, st. D. Kovalchuk, Novosibirsk, 630049, Russia.
Dr. Sci. Tech., professor of the department «Structural Mechanics », SSTU.
Phone: +7 (383) 328-05-42.
E-mail: twm@stu.ru

Research the fatigue crack initiation and the fatigue crack growth in rail with thermomechanical damage. On basis of cyclic test and numerical simulation of rail deflected mode was determine a fatigue failure characteristics and fatigue crack growth characteristic in rail steel.

Keywords: *thermomechanical damage; fatigue crack in rail head; fatigue failure characteristics in rail steel; kinetic failure diagram.*

УДК 625.033:539.42

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА РЕЛЬСА С ПОПЕРЕЧНОЙ ТРЕЩИНОЙ В ПОДОШВЕ

Тихомиров Виктор Михайлович
Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).

630049, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Строительная механика», СГУПС.
Тел.: (383) 328-05-42.
E-mail: twm@stu.ru

Суровин Павел Геннадьевич
Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).
630049, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительная механика», СГУПС.
Тел.: (383) 328-05-42.
E-mail: twm@stu.ru

В работе рассматривается методика оценки остаточного ресурса рельса, имеющего усталостную трещину в подошве. Получены зависимости коэффициента интенсивности напряжений от размера трещины при действии изгибных, температурных и остаточных напряжений. Проведен анализ трещиностойкости поврежденного рельса Р65 от действия перечисленных усилий. При заданных условиях нагружения рассчитан остаточный ресурс поврежденного рельса. Оценено влияние на скорость роста усталостной трещины усиления опасного сечения накладками.

Ключевые слова: *рельс с усталостной трещиной в подошве; остаточный ресурс; усталостная прочность; коэффициент интенсивности напряжений.*

THE REMAINING LIFE ASSESSMENT OF RAIL WITH CROSS CRACK IN LOWER FLANGE

Tikhomirov Viktor Mikhailovich
Siberian State Transport University (SSTU).
191, st. D. Kovalchuk, Novosibirsk, 630049, Russia.
Dr. Sci. Tech., professor of the department «Structural Mechanics », SSTU.
Phone: +7 (383) 328-05-42.
E-mail: twm@stu.ru

Surovin Pavel Gennadievich
Siberian State Transport University (SSTU).
191, st. D. Kovalchuk, Novosibirsk, 630049, Russia.
Ph.D., senior lector of the department «Structural Mechanics », SSTU.
Phone: +7 (383) 328-05-42.
E-mail: twm@stu.ru

In research consider a methodology the remaining life assessment of rail with fatigue crack in lower flange. Obtain the stress intensity factor equations for crack size and kind of stress: bending stress, thermal and residual stress. Make up an fatigue strength analysis of rail P65 and under different conditions of loading and remaining life calculation of damaged rail when given conditions of loading. Submit a assessment evaluation rail reinforcement in cyclic crack growth rate.

Keywords: *rail with fatigue crack in lower flange; remaining life; stress intensity factor; fatigue strength.*

УДК 656.225:65.011.56

ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ РАЗМЕЩЕНИЯ И КРЕПЛЕНИЯ ГРУЗА В ВАГОНЕ

Гозбенко Валерий Ерофеевич
Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Математика», ИрГУПС.
Тел.: (3952) 638-357.
E-mail: vgozbenko@yandex.ru

Оленцевич Виктория Александровна
Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.
Старший преподаватель кафедры «Экономика и управление на транспорте», ИрГУПС.
Тел.: (3952) 638-328.
E-mail: olencevich_va@irgups.ru

В статье представлен алгоритм проведения вычислительных экспериментов по определению сдвига груза и натяжений в элементах креплений, позволяющий повысить безопасность функционирования железнодорожной транспортной системы.

Ключевые слова: *безопасность, железнодорожная транспортная система, подсистема, причины нарушения безопасности, влияющие факторы, отказ, технические условия, автоматизированная система подготовки технических условий размещения и крепления груза в вагонах и контейнерах.*

INCREASED SAFETY OF RAILWAY TRANSPORT SYSTEM BASED AUTOMATION TECHNOLOGIES STOWING AND SECURING CARGO IN WAGONS

Gozbenko Valery Erofeyevich
Irkutsk State Transport University (ISTU)
15, Chernishevskogo str., Irkutsk, 664074, Russia.
Dr. Sci. Tech., professor of the department « Mathematics», ISTU.
Phone: (3952) 638-357.
E-mail: vgozbenko@yandex.ru

Olentsevich Victoriy Aleksandrovna
Irkutsk State University of Railway Transport (ISTU).
15, Chernishevskogo str., Irkutsk, 664074, Russia.
Senior lecturer of the department «Economics and Management in Transport», ISTU.
Phone: (3952) 638-328.
E-mail: olencevich_va@irgups.ru

This paper presents an algorithm of computational experiments by definition shear load and tension mounts in the elements, which increases the safety of the operation of the railway transport system.

Keywords: *safety, railway transport system, subsystem, cause a security breach, influencing factors, failure, specifications, automated preparation of the technical conditions of placing and securing cargo in wagons and containers.*

УДК 629.7.658.58.004(22)

МЕТОДИКА НАЗНАЧЕНИЯ ПРОБЕГА ВАГОНОВ МЕЖДУ ДЕПОВСКИМИ РЕМОНТАМИ

Кашковский Виктор Владимирович
Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского,15.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные системы», ИрГУПС.
E-mail: kww542339@km.ru

Представлены основные положения методологических основ управления состоянием систем технической эксплуатации, общий подход к созданию методик управления состоянием систем технической эксплуатации и методика назначения пробега вагонов между деповс-кими ремонтами на их основе. Даны практические рекомендации по эксплуатации грузовых вагонов.

Ключевые слова: *системы технической эксплуатации, управление состоянием систем технической эксплуатации, системный анализ, синергетика, пробег вагонов между деповскими ремонтами.*

METHODS DESTINATION MILEAGE CARS BETWEEN DEPOT REPAIR

Kashkovsky Viktor Vladimirovich
Irkutsk State Transport University (ISTU).
15, Chernishevskogo str., Irkutsk, 664074, Russia.
Ph. D., associate professor of the department «Information Systems», ISTU.
E-mail: kww542339@km.ru

The main provisions of the methodological foundations of state management systems, technical operation, the general approach to the creation of the state of systems management techniques and methods of technical operation of destination mileage cars between depot repairs on them. Practical recommendations for the use of freight cars.

Keywords: *Technical operation of the system, state management systems, technical maintenance, system analysis, synergy, mileage cars between depot repairs.*

УДК 519.6:311

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ БЕЗУБЫТОЧНОСТИ ГРУЗОВЫХ ПЕРЕВОЗОК НА ОСНОВЕ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО

Краковский Юрий Мечеславович
Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные системы», ИрГУПС.
Тел.: +7-914-926-77-72.
E-mail: kum@stranzit.ru

Домбровский Игорь Андреевич
Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.
Соискатель, ИрГУПС.
Тел.: +7-914-926-77-72.
E-mail: kum@stranzit.ru

Обосновано применение вероятностного анализа безубыточности на основе метода Монте-Карло для исследования грузовых перевозок как сложной стохастической системы. Анализ проведен по данным Улан-Баторской железной дороги.

Ключевые слова: *метод Монте-Карло, железнодорожные грузовые перевозки, вероятностный анализ безубыточности.*

PROBABILISTIC ANALYSIS OF BREAK-EVEN FREIGHT TRANSPORT ON THE BASIS OF THE MONTE-CARLO METHOD

Krakovskiy Yuriy Mecheslavovich
Irkutsk State Transport University (ISTU).
Chernyshevsky 15, Irkutsk, 664074, Russia.
Dr. Sci. Tech., professor of the departament «Information systems», ISTU.
Phone: +7-914-926-99-92.
E-mail: kum@stranzit.ru

Dombrovskiy Igor Andreevich
Irkutsk State University of Railway Transport (ISTU)
Chernyshevsky 15, Irkutsk, 664074, Russia.
Applicant ISTU.
Phone: +7-914-926-99-92.
E-mail: kum@stranzit.ru

Substantiated the application of the probabilistic analysis of the break-even on the basis of a Monte Carlo method for the study of freight as a complex stochastic systems. Analysis was carried out on the basis of data of the Ulan-Bator railway.

Keywords: *Monte-Carlo method, rail traffic, probabilistic breakeven analysis.*

УДК 656.225.073:629.067

СИСТЕМА БЕЗОПАСНОСТИ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ОПАСНЫХ ОТХОДОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Медведев Владимир Ильич
Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).
630049, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191.
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Безопасность жизнедеятельности», СГУПС.
Тел.: (8383) 328-04-92.
E-mail: MedvedevVI@stu.ru

В статье рассмотрены результаты проектирования системы безопасности при перевозке опасных отходов железнодорожным транспортом. Приведены основные элементы системы безопасности. Разработаны рекомендации по формированию программы безопасности транспортирования опасных отходов.

Ключевые слова: *безопасность, опасные грузы, опасные отходы, перевозка, транспортирование, железнодорожный транспорт.*

SYSTEM OF THE DANGEROUS WASTES TRANSPORT SAFETY BY RAILWAY

Medvedev Vladimir Iliych
Siberian State Transport University (SSTU).
191, st. D. Kovalchuk, Novosibirsk, 630049, Russia.
Dr. Sci. Tech., professor, header of the department «Life safety», SSTU.
Phone: (8383) 328-04-92.
E-mail: MedvedevVI@stu.ru

In article results of making design for system of the dangerous wastes transport safety by railway is considered. Fundamental elements of safety system are discussed. Recommendations on formation of the dangerous wastes transport safety program are shown.

Keywords: *safety, dangerous goods, waste, transport, railway.*

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 20.03.2013.
Тираж 500 экз.