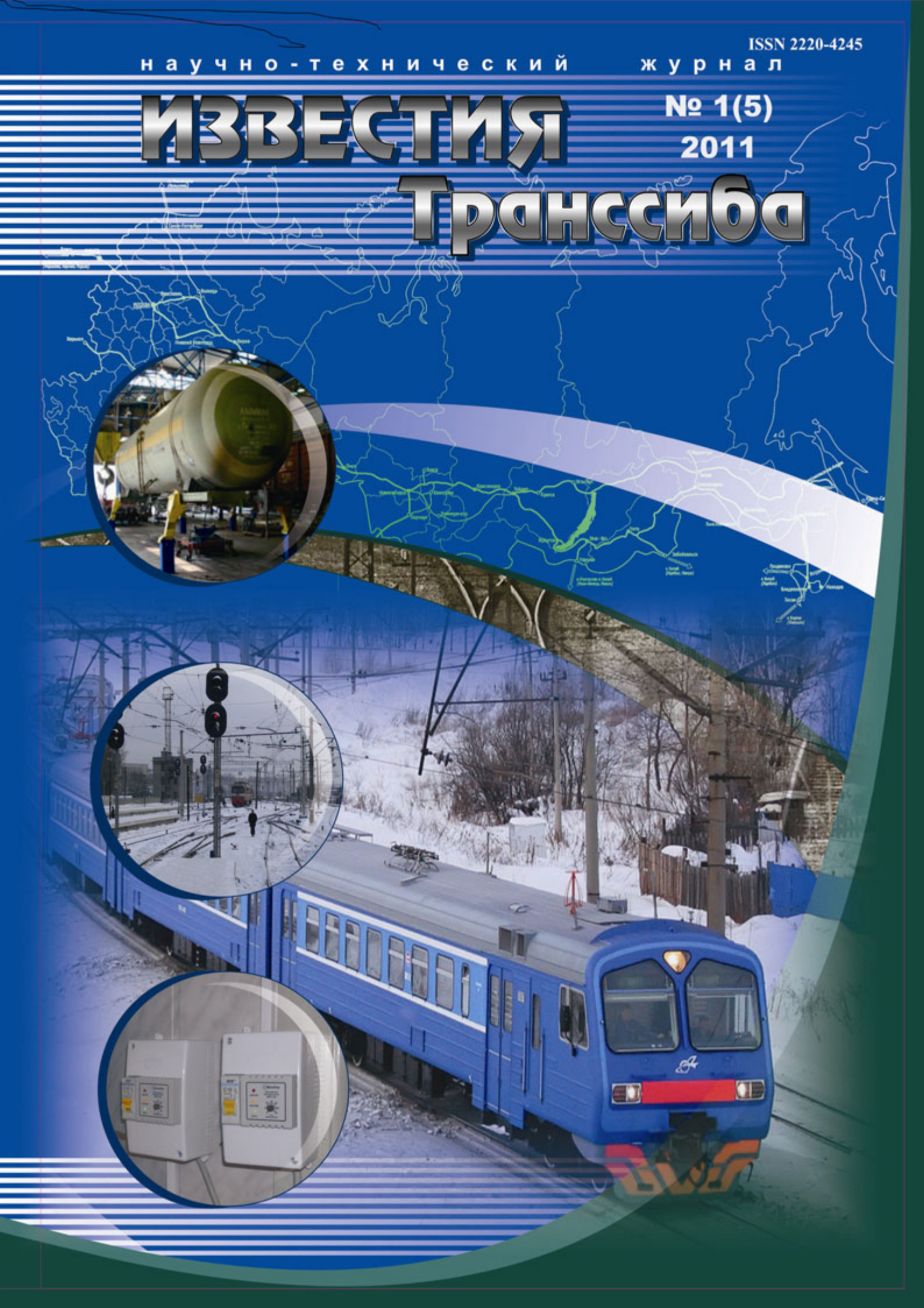
ISSN 2220-4245

научно-технический журнал

# ИЗВЕСТИЯ Транссиба

№ 1(5)
2011



ИЗВЕСТИЯ Трансиба
научно-технический журнал
№ 1(5)
2011
Периодичность - 4 выпуска в год

**РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА**

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

## СОДЕРЖАНИЕ

**Подвижной состав железных дорог**

Бородин А. В., Иванова Ю. А., Ковалев М. И. Устройства букс железнодорожного подвижного состава для восприятия рамной силы....2
Запрудский А. А. Методика оценки степени коррозии арматуры железобетонной опоры по ширине раскрытия продольной трещины....7
Матяш Ю. И., Бельский А. О. Выбор программного комплекса для расчета боковой рамы тележки....11
Сабиров Р. Д. Проблемы учета продольной неравноупругости железнодорожного пути в динамике подвижного состава....14
Смалев А. Н. Оценка влияния малых масс системы «колесо – рельс» на статистические характеристики ее динамики....20
Смердин А. Н., Голубков А. С., Жданов В. А. Совершенствование методики исследования волновых процессов в контактной подвеске на основе конечно-элементной модели....30
Ступаков С. А., Филиппов В. М. Исследование влияния токовой нагрузки на износ контактных элементов токоприемника электроподвижного состава....37
Хряков А. А., Никифоров М. М. Снижение коммерческой составляющей потерь электрической энергии на тягу поездов на полигоне постоянного тока....42

**Транспортная энергетика**

Бренков С. Н. Управление устройствами поперечной емкостной компенсации электрифицированных железных дорог с зависимой выдержкой времени....46
Вильгельм А. С., Ларин А. Н. Экспериментальные исследования по оценке потенциала повышения энергетической эффективности тяги поездов за счет применения рекуперативного торможения....50
Давыдов А. И. Анализ эффективности возврата электроэнергии в контактную сеть при рекуперативном торможении электроподвижного состава на основе данных маршрутов машинистов....56
Комяков А. А., Пономарев А. В., Комякова О. А. Применение искусственных нейронных сетей для планирования расхода электроэнергии на нетяговые нужды структурных подразделений железных дорог....63
Ли В. Н., Сапов А. С. Определение глубины заложения железобетонных опор акустическим методом....68
Парамонов А. М., Кушнаренко А. В., Гусаров А. С. К вопросу повышения эффективности работы нагревательных печей....71
Соколов М. М. Контроль качества электрической энергии в системах электроснабжения устройств автоматики железных дорог....77

**Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации**

Квиткова Е. Б., Маркова Е. И. Использование систем беспроводного широкополосного доступа для передачи видеоданных....84
Любченко А. А. Анализ процессов технического обслуживания элементов сложных технических систем....88
Малютин А. Г., Коробова К. В. Применение IP-сервисов в автоматизированной системе контроля и учета электроэнергии и мощности (АСКУЭ)....94
Сидоров О. А., Карабанов М. А. Анализ влияния отклонения напряжения питания на надежность функционирования сигнальной точки....100

АННОТАЦИИ....105

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

УДК 629.4.027.115

А. В. Бородин, Ю. А. Иванова, М. И. Ковалев

# УСТРОЙСТВА БУКС ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ДЛЯ ВОСПРИЯТИЯ РАМНОЙ СИЛЫ

*В статье приведен анализ отечественного и зарубежного опыта конструирования осевых упоров в буксах железнодорожного подвижного состава. Предложены перспективные конструкции осевых упоров скольжения и качения, позволяющие повысить ресурс цилиндрических подшипников и снизить энергозатраты на преодоление сил трения в элементах букс.*

Наиболее опасные дефекты буксовых подшипников являются следствием неблагоприятного воздействия рамной силы, которая передается от колесной пары через элементы буксы и приливы корпуса ограничителям буксового проема боковой рамы, поэтому конструктивное построение букс целесообразно рассматривать с точки зрения методов восприятия рамной силы.

В практике конструирования букс железнодорожного подвижного состава для восприятия рамной силы используются тела качения подшипников или осевые упоры различных типов (рисунок 1). Передача рамной силы телами качения может осуществляться рабочей поверхностью качения, торцами роликов, а также частично – рабочей поверхностью и частично – торцами.

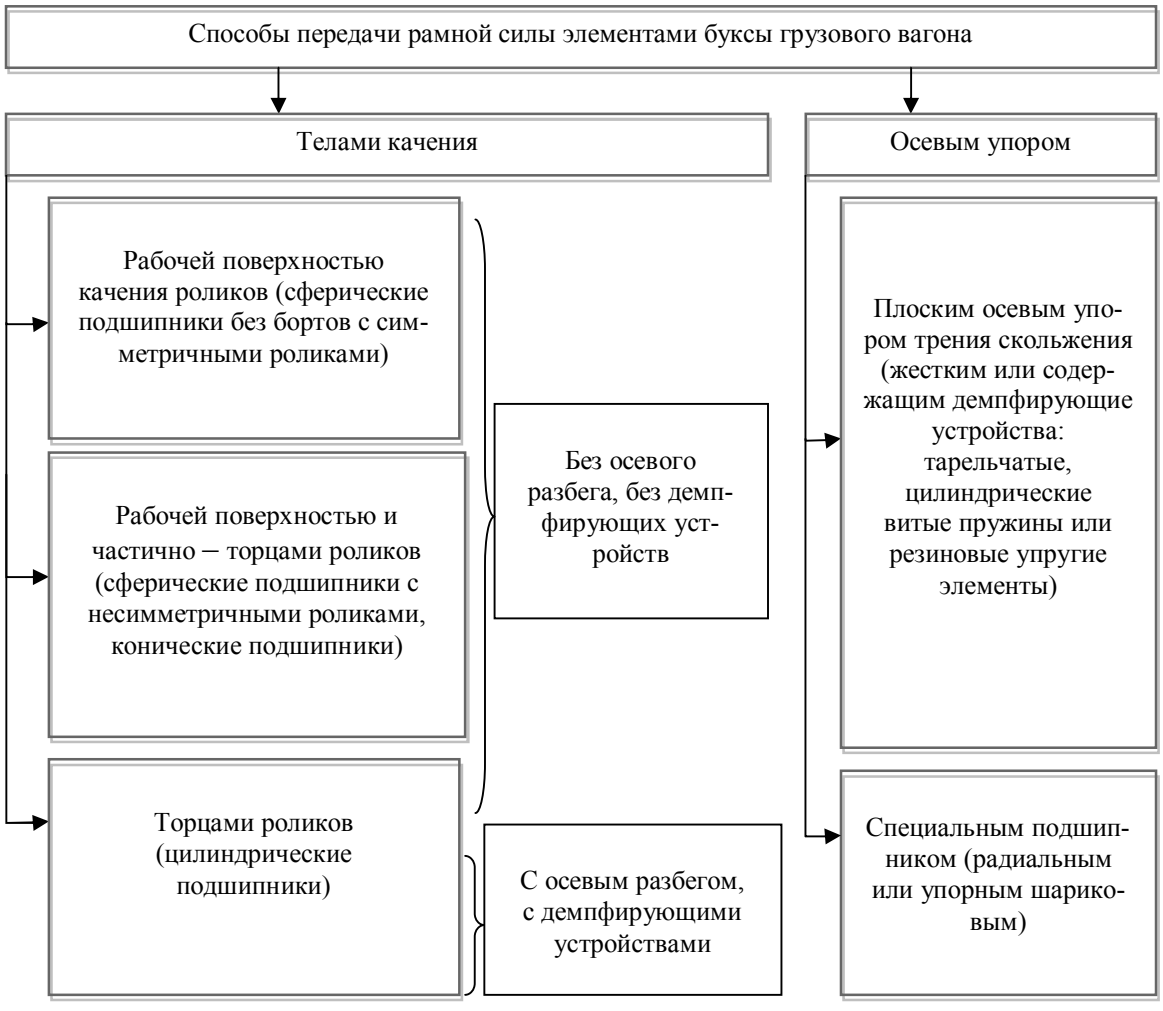



Рисунок 1 – Способы передачи рамной силы элементами буксы грузового вагона

Рабочей поверхностью тел качения рамную силу воспринимают сферические подшипники без бортов с симметричными роликами. Опытные буксы с одним или двумя такими подшипниками изготавливались в СССР в 1952, 1954 гг. [1, 2]. Сферические подшипники для вагонных букс не получили широкого распространения, поскольку требуют высокой точности изготовления, их работоспособность существенно зависит от качества поверхности сферических дорожек качения и величины радиальных зазоров. Фактический ресурс таких подшипников оказался в восемь раз меньше расчетного, и опытные буксы были сняты с эксплуатации. Стоимость изготовления сферических подшипников больше, чем цилиндрических. Сферические подшипники имеют меньшую площадь контакта, чем цилиндрические, поэтому при качении возникают контактные напряжения, при которых ухудшаются условия смазывания и повышается нагрев. Из-за меньшей площади контакта сферические подшипники должны иметь большие габаритные размеры.

Роликовые цилиндрические подшипники воспринимают рамную силу торцами роликов в условиях трения скольжения в контакте с бортами колец. Такой характер взаимодействия контактирующих поверхностей в условиях перекоса колец и тел качения приводит к разрушению слоя смазочного материала, высоким значениям контактных напряжений, повышенному нагреву, возникновению опасных дефектов, таких как трещины и отколы бортов [3].

Рабочей поверхностью и частично торцами роликов воспринимают рамную силу конические роликовые подшипники. Поскольку в них сохраняется бортовая схема восприятия рамной силы, в эксплуатации в них обнаруживаются дефекты, аналогичные дефектам цилиндрических подшипников [4]. Кроме того, работа конических подшипников сопровождается повышенным нагревом, что приводит к необходимости повышения порога чувствительности диагностирующих устройств.

Осевые упоры, применяемые в буксах, представляют собой пары трения, амортизаторы с упругими элементами и шарикоподшипники.

Плоские осевые упоры с бронзовой наплавкой получили распространение в основном в буксах локомотивов. К их недостаткам относятся большая масса, сложность подведения смазочного материала в зону трения, отброс смазочного материала под действием центробежных сил, повышенные контактные напряжения при перекосах.

Применение осевых упоров – амортизаторов с упругими элементами в виде резинометаллических вкладок и подушек различной формы – ограничено неудовлетворительными эксплуатационными характеристиками резиносодержащих элементов, такими как зависимость упругих свойств от температуры окружающей среды и старение резины.

Существует отечественный и зарубежный опыт применения шариковых подшипников в качестве осевых упоров в буксах.

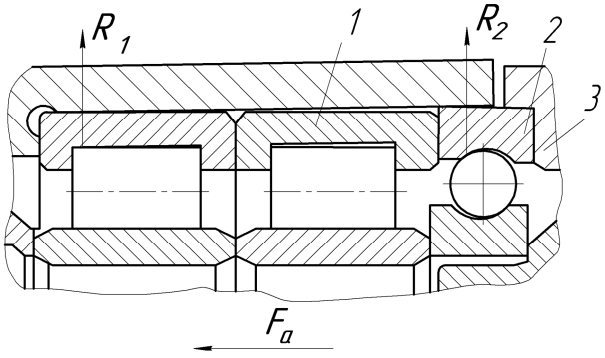



Рисунок 2 – Распределение радиальной нагрузки в опытной буксе поезда «Аврора»

Недостатком подобной буксы является восприятие шариковым подшипником части радиальной нагрузки (рисунок 2). Наружное кольцо шарикового подшипника 2 зажимается крепительной крышкой 3 вместе с наружными кольцами цилиндрических подшипников. При изменении направления рамной силы шарики перекатываются по желобу внутреннего кольца, наружное кольцо подвергается перекосу и приходит в более плотное соприкосновение с корпусом буксы, приподнимая его край. Возникает перегружение радиальными нагрузками заднего цилиндрического и шарикового подшипников, а передний цилиндрический подшипник 1 оказывается полностью раз-

груженным. Другим недостатком этой буксы является раздельное фиксирование наружного и внутреннего колец шарикового подшипника, которое вызывает их относительный угловой перекос в вертикальной плоскости.

Еще один вариант применения в буксе осевого упора в виде шарикового подшипника состоит в размещении его между двумя укороченными цилиндрическими роликовыми подшипниками. Для обеспечения возможности монтажа и демонтажа наружное кольцо выполнено разъемным. Однако существенное укорочение длины роликов привело к снижению грузоподъемности подшипников и снижению их ресурса в 20 раз. Еще один выявленный недостаток заключается в отсутствии возможности постоянного соосного расположения двух наружных полуколец шарикового подшипника, зажимаемых наружными кольцами роликовых подшипников, а также в относительном угловом перекосе наружного и внутреннего колец шарикового подшипника в вертикальной плоскости. Фиксирование разъемного наружного кольца шарикового подшипника вместе с наружными кольцами роликовых подшипников монтажными усилиями зажатия $P_{заж}$ (рисунок 3) в условиях действия рамной силы приводит к двустороннему восприятию шариковым подшипником дополнительных радиальных нагрузок $R_2$ и, как следствие, к неблагоприятному их перераспределению между задним и передним роликовыми подшипниками ($R_1$ и $R_3$) в зависимости от направления рамной нагрузки. В связи с неудовлетворительными результатами поездных испытаний обе рассмотренные опытные буксы были сняты с эксплуатации [5].

Буксы высокоскоростных экспресссов «Токайдо» производства Японии также содержат радиальный шариковый подшипник. От опытной буксы скоростного поезда «Аврора» конструкция отличается свободной установкой наружного кольца шарикового подшипника, что обеспечивает его одностороннюю нагруженность.

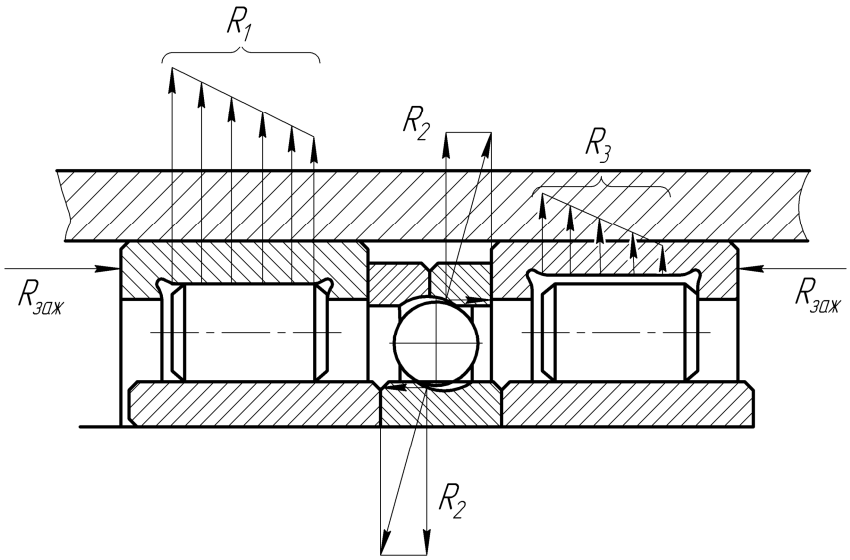



Рисунок 3 – Распределение радиальных нагрузок в опытной буксе с шарикоподшипником

Между наружным кольцом и крышкой буксы, в которой он находится, предусмотрен зазор 0,5 мм. Однако работоспособность осевого упора в виде шарикоподшипника снижена вследствие перекосов шейки оси, так как в подшипнике работает ограниченное число тел качения [1].

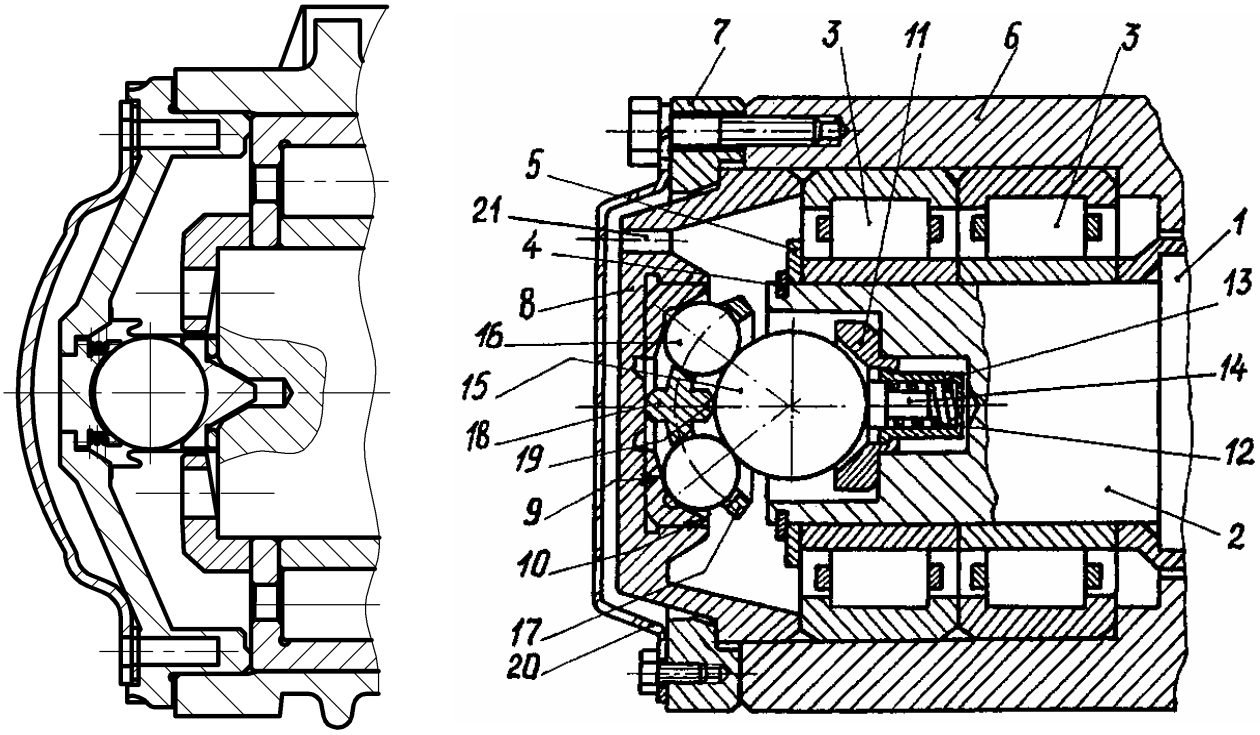
На основании анализа конструкций вагонных букс можно выделить ряд факторов, оказывающих наибольшее влияние на работоспособность упорных устройств и эффективность восприятия рамной силы:

– самоустановка элементов упорного устройства;
– условия смазывания (подведение и удержание смазочного материала);
– вид трения (скольжение или качение);
– значение контактных напряжений в элементах.

С учетом перечисленных факторов авторами предлагаются варианты конструкций вагонных букс, содержащих самоустанавливающиеся осевые упоры скольжения (рисунок 4, а) [6] или качения (рисунок 4, б) [7], обеспечивающие эффективное восприятие рамной силы при минимальных значениях контактных напряжений в элементах.

Букса с осевым упором качения, обеспечивая повышение ресурса, предполагает существенное снижение потерь на трение.

Рассмотрим устройство и работу этого варианта буксы (см. рисунок 4, б). Букса содержит ось 1, шейку оси 2, на которую установлены подшипники 3 с цилиндрическими роликами. Внутренние кольца подшипников выполнены без бортов, наружные кольца – с двумя бортами. Внутренние кольца подшипников закреплены от осевого смещения на шейке оси стопорным кольцом 4 через опорное кольцо 5. Наружные кольца подшипников установлены в корпус 6 буксы и фиксируются прижимной крышкой 7 через осевую опору 8. Конические поверхности 9 и 10 опоры 8 выполнены из шарикоподшипниковой стали. В отверстии шейки оси 2 размещена опора 11 (пята), торцовая поверхность опоры 11 прижимается к торцовой поверхности отверстия в шейке оси пружиной сжатия 12 через втулку 13. Пружина 12 другим торцом взаимодействует с упором 14, а упор 14 – с шаром 15 (подпятником). Между подпятником и коническими поверхностями опоры 8 размещены тела вращения 16, например сферы (шарики). Шарики установлены в сепараторе 17 в виде сферического сектора с упорами 18 и 19.




а б

Рисунок 4 – Схема буксы грузового вагона с осевым упором:
а – скольжения; б – качения

Внутренняя полость буксы заполняется смазочным материалом и закрывается смотровой крышкой 20. В эксплуатационных условиях качество смазки проверяется отбором части смазочного материала через отверстие 21.

Буксовый узел работает следующим образом. При движении железнодорожного состава и радиальной нагрузке на цилиндрические ролики подшипников буксы ось 1 вращается вместе с упором 14, торцовая поверхность которого передает вращательное движение подпятнику 15 и шарикам 16 в сепараторе 17, при этом осевое расположение сепаратора определяется его упорами 18 и 19, взаимодействующими с торцовой поверхностью осевой опоры и сферической поверхностью подпятника.

При осевой нагрузке опора 11 (пята) вступает в контакт с подпятником 15, который при вращении оси 1 передает нагрузку шарикам 16 и коническим поверхностям 9 и 10 осевой опоры.

Трение качения в опорном устройстве, включающем в себя пяту с конической поверхностью и подпятник со сферической поверхностью, контактирующей с шариками, взаимодействующими с коническими поверхностями осевой опоры, обеспечивает снижение вращающего момента, действующего на осевую опору, улучшение триботехнических параметров осевой опоры, воспринимающей динамические воздействия при движении состава. Это позволяет повысить долговечность подшипников с цилиндрическими роликами и ресурс буксового узла в целом.

Исключение воздействия рамной силы на подшипники создает предпосылки для дальнейшей модернизации буксы – применения вместо двух цилиндрических подшипников двухрядного роликового подшипника с безбортовыми кольцами и с более высокой грузоподъемностью [8].

Применение упорных устройств вагонных букс, основанных на трении качения, помимо продления ресурса цилиндрических подшипников приводит к существенному снижению энергозатрат в буксах за счет снижения расхода мощности на преодоление сил сопротивления в элементах упорного устройства.

*Список литературы*

1. Волков, Н. Н. Подшипники качения колесных пар вагонов и локомотивов [Текст] / Н. Н. Волков, Н. В. Родзевич. – М.: Машиностроение, 1972. – 168 с.

2. Амелина, А. А. Устройство и ремонт вагонных букс с роликовыми подшипниками / А. А. Амелина. – М.: Транспорт, 1975. – 288 с.

3. Опыт эксплуатации вагонов с буксовым узлом на роликовых подшипниках / В. В. Абашкин, В. Ф. Девятков и др. // Работа вагонных букс с роликовыми подшипниками при высокоскоростном движении: Труды ЦНИИ.– М.: Транспорт, 1970. – Вып. 405. – С. 4 – 9.

4. Сергеев, К. А. Повышение работоспособности буксового узла с кассетным подшипником [Текст] / К. А. Сергеев, А. Н. Францев // Железнодорожный транспорт. 2008. – № 7. – С. 58 – 62.

5. Цюренко, В. Н. Надежность роликовых подшипников в буксах вагонов / В. Н. Цюренко, В. А. Петров. М.: Транспорт, 1982. – 96 с.

6. Пат. 82011 Российская Федерация, МПК[7] F16C 17/04. Подшипник со сферическими упорными поверхностями / Бородин А. В., Иванова Ю. А.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Омский гос. ун-т путей сообщения». – № 2008145684/22; заявл. 19.11.2008; опубл. 10.04.2009, Бюл. № 10. – 2 с.: ил.

7. Пат. 2309865 Российская федерация, МПК[7] B61F 15/12. Букса с цилиндрическими роликоподшипниками / Бородин А. В.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Омский гос. ун-т путей сообщения». – № 2006114319; заявл. 26.04.2006; опубл. 10.11.2007, Бюл. № 31. – 2 с.: ил.

8. Пат. 65008 Российская Федерация, МПК[7] B 61 F 15/12. Букса с цилиндрическим роликоподшипником / Бородин А. В., Иванова Ю. А.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Омский гос. ун-т путей сообщения». – № 2007112328; заявл. 02.04.07; опубл. 27.07.2007, Бюл. № 21. – 2 с.: ил.

УДК 621.332.3

А. А. Запрудский

# МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ КОРРОЗИИ АРМАТУРЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ОПОРЫ ПО ШИРИНЕ РАСКРЫТИЯ ПРОДОЛЬНОЙ ТРЕЩИНЫ

*В статье рассмотрена методика оценки размеров коррозии арматуры по степени раскрытия продольной трещины на поверхности железобетонной опоры. Представлена разработанная схема замещения защитного слоя бетона, определены условия начала образования трещины и получено расчетное выражение для оценки коррозионного повреждения арматуры.*

Коррозия стальной арматуры является одной из главных причин снижения долговечности железобетонных опор контактной сети, а потеря их несущей способности представляет угрозу для жизни людей и безопасности движения поездов, поэтому определение степени коррозионного износа является важной и актуальной задачей.

Точное определение степени коррозии арматуры может быть выполнено только путем извлечения достаточного количества образцов арматурных стержней с последующей лабораторной обработкой их, что в условиях эксплуатации не представляется возможным. В связи с этим представляют интерес косвенные методы определения размеров коррозии арматуры по ее внешним проявлениям на поверхности конструкции, например, по величине раскрытия продольной трещины в защитном слое бетона. По поперечным трещинам нельзя оценить степень коррозии, так как они появляются вследствие перегрузки опоры или недостаточного сцепления арматуры с бетоном.

По данным различных исследований принимается, что объем продуктов коррозии превышает объем скорродировавшего металла в 2 – 2,5 раза [1], что приводит к давлению на защитный слой бетона. Развитие трещин обычно начинается как наружу, так и вовнутрь, но так как толщина защитного слоя бетона часто меньше проектной, то наружная трещина имеет большее раскрытие (рисунок 1).

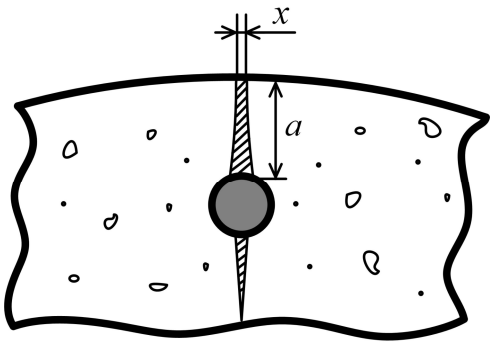



Рисунок 1 – Образование продольной трещины в бетоне под действием давления продуктов коррозии

Так как радиус арматурного стержня во много раз меньше радиуса опоры, то защитный слой бетона $a$ можно смоделировать защемленной с двух сторон балкой прямоугольного сечения единичной толщины, воспринимающей действие приложенной в середине сосредоточенной силы. Предположим, что трещина в защитном слое бетона образуется после его отслоения от рабочей арматуры на достаточно длинном участке развития коррозии. Отслоившаяся часть бетона с достаточной степенью точности моделируется прямоугольной пластиной, работающей в условиях цилиндрического изгиба, в которой нормальные напряжения в направлении, перпендикулярном арматуре, аналогичны элементарным балочным, что подтверждает обоснованность выбора балочной схемы зоны защитного слоя бетона. Дальнейшие расчеты проводятся при допущении, что зависимость между раскрытием трещины и коррозией арматуры линейна [2].

Высота сечения и длина балки выбираются на основе статистической обработки натурных исследований без учета диаметра рабочей арматуры. Далее с использованием методов сопротивления материалов определяется толщина $c$ скорродировавшего слоя металла, при котором образуется продольная трещина в защитном слое бетона, а затем на основании про-

стейших геометрических соотношений устанавливается зависимость между величиной раскрытия трещины $x$ и $c$:

$$c = \frac{xl}{8h}, \tag{1}$$

где $h$ и $l$ – толщина и длина балочки.

Расчеты, выполненные с помощью формулы (1), хорошо согласуются с экспериментальными данными [2], но формула (1) не достаточно достоверно учитывает длину и ширину балочки. Для уточнения этих параметров проведем расчет.

Сначала уточним высоту поперечного сечения защемленной балочки и определим величину коррозионного износа арматуры, при котором начинается отслоение защитного слоя бетона. При этом используем следующую расчетную модель.

Имеется круглый арматурный стержень радиусом $r_s$, его ось расположена на глубине $b$ от поверхности. Стержень равномерно скорродировал, его объем за счет продуктов коррозии увеличился, и поэтому появилось давление $p$ на бетон. Эту ситуацию можно представить в виде полуплоскости с круговым вырезом, на контур которого действует равномерно распределенное давление (рисунок 2).

Согласно утверждению в статье [3] наибольшее растягивающее напряжение на оси $Ay$ достигается в точке $A$:

$$\left(\sigma_y\right)_{\max} = 4p\frac{r_s^2}{b^2 - r_s^2}. \tag{2}$$

Максимальные растягивающие окружные напряжения $\sigma_\eta$ действуют в точках касания прямой $AQ$ контура кругового выреза (там, где $\varphi = \varphi_{\max}$ – точка $Q'$ и симметричная ей $Q''$):

$$\left(\sigma_\eta\right)_{\max} = p\frac{b^2 + r_s^2}{b^2 - r_s^2}. \tag{3}$$

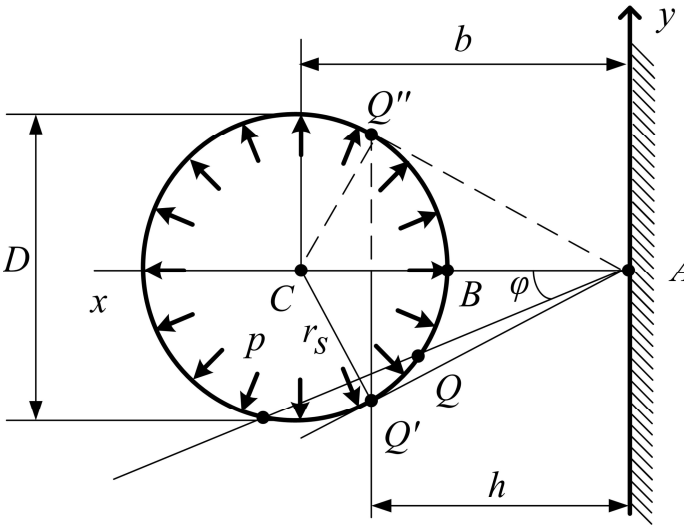



Рисунок 2 – Расчетная схема полуплоскости с круговым вырезом под давлением

При $b \geq r_s\sqrt{3}$ наибольшие растягивающие напряжения действуют на контуре кругового отверстия. Так как толщина защитного слоя бетона больше диаметра арматуры, то наиболее опасными являются точки $Q'$ и $Q''$ кругового контура, расположенные на глубине $h$, где и начнется образование трещины. С учетом того, что $\sin\varphi_{\max} = \frac{h}{AQ'}$ и $\cos\varphi_{\max} = \frac{r_s}{b}$, найдем

$$h = \frac{b^2 - r_s^2}{b}. \tag{4}$$

Полученный теоретический результат полностью подтверждается экспериментальными данными [3], показывающими, что точка отрыва защитного слоя находится выше нижней точки сечения арматуры. Эту величину $h$ выбираем в качестве высоты балочки.

Установим зависимость между давлением $p$ и толщиной скорродировавшего слоя металла. Согласно источнику [4] радиальные перемещения точек контура выреза определяются выражением:

$$u_r = \frac{p r_s (1+\nu)}{E} = c\,, \tag{5}$$

где $u_r$ – равномерное радиальное смещение, аналогичное случаю плоскости с круговым вырезом под действием равномерного давления, здесь $\nu$ – коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона); $E$ – модуль продольной упругости. Отсюда

$$p = \frac{c \cdot E}{r_s (1+\nu)}\,. \tag{6}$$

Толщину скорродировавшего слоя принимаем равной $c$ – увеличению радиуса арматурного стержня за счет образования продуктов коррозии.

Далее уточним длину защемленной балочки. Для этого рассмотрим следующую модель, описывающую отслоение защитного слоя бетона. Потенциальная энергия деформации, накапливаемая в полуплоскости с круговым отверстием под действием равномерного давления, при достижении толщиной коррозионного слоя величины $\varepsilon_1$ расходуется на образование защемленной по концам балочки прямоугольного сечения шириной $b = 1$ и высотой $h$ (определяется по формуле (4), находящейся под действием сосредоточенной силы $P$, приложенной в середине пролета.

Потенциальная энергия деформации такой балки

$$U_b = \frac{P^2 l^3}{384 EI}\,. \tag{7}$$

Величина сосредоточенной силы $P$ численно равна проекции на ось $x$ равнодействующей давления $p$ на дугу $Q'Q''$, где $Q'$, $Q''$ – точки возможного образования трещины (см. рисунок 1):

$$P = 2p\left(b - h\right). \tag{8}$$

Вычислив значение $P$, с учетом уравнения (6) и того, что у балки прямоугольного поперечного сечения высотой $h$ единичной ширины момент инерции $I = \frac{h^3}{12}$, получаем выражение для вычисления потенциальной энергии:

$$U_p = \frac{E c_1^{\,2} l^3 \left(b - h\right)^2}{8 h^3 r_s^{\,2} (1+\nu)^2}\,. \tag{9}$$

Величина потенциальной энергии, накапливаемой в полуплоскости, может быть с достаточной точностью аппроксимирована (на основании численных исследований, приведенных в источнике [4]) значением энергии, как в случае плоскости с круговым вырезом под действием равномерного давления. При этом формула (9) принимает вид:

$$U_b = \pi \frac{E}{1+\nu} c_1^2\,. \tag{10}$$

Приравняв значения потенциальной энергии, полученные из расчетов по формулам (8) и (9), друг к другу, определим длину $l$ балочки:

$$l = 2h \sqrt[3]{\frac{\pi b^2 (1+\nu)}{r_s^{\,2}}}\,. \tag{11}$$

После этого определяем величину коррозионного износа $c_1$, образовавшегося после отслоения защитного слоя бетона, при котором происходит образование продольной трещины в этом защитном слое. Условием начала образования трещины считаем равенство наибольшего положительного удлинения $\varepsilon_1$ предельной растяжимости бетона $\varepsilon_p$ [3]. В результате

$$c_1 = \frac{l^2}{24h}\varepsilon_p, \tag{12}$$

что с учетом выражения (10) сводится к виду:

$$c_1 = \frac{\varepsilon_p h}{6}\left(\sqrt[3]{\frac{\pi b^2(1+\nu)}{r_s^2}}\right)^2. \tag{13}$$

Зависимость между величиной раскрытия $x$ продольной трещины в защитном слое бетона и дополнительной величиной глубины коррозии $c_x$ выражается уравнением (1); установлена данная зависимость авторами работы [3]. Подставив в формулу (1) соотношение (10), получим:

$$c_x = \frac{x}{4}\sqrt[3]{\frac{\pi b^2(1+\nu)}{r_s^2}}. \tag{14}$$

Оценим степень потери металла скорродировавшего стержня (рисунок 3). Площадь поперечного сечения неповрежденного стержня $A_{s0} = \pi r_s^2$, а увеличившаяся площадь за счет продуктов коррозии $A'_{s0} = \pi(r_s + c_x)^2$.

С учетом допущения, что объем продуктов коррозии превышает объем скорродировавшего металла в два раза, можно вывести выражение для оценки степени потери металла по сравнению неповрежденным состоянием:

$$s_c = \frac{\left(r_s^2 + \frac{x}{8}\sqrt[3]{\frac{\pi b^2(1+\nu)}{r_s^2}}\right)^2 - r_s^2}{2A_{s0}}. \tag{15}$$

Таким образом, для оценки коррозионного износа по величине раскрытия продольной трещины в защитном слое бетона получены удобные в практическом применении расчетные формулы, учитывающие отношение диаметра арматуры и толщины защитного слоя бетона, которые могут быть использованы в расчетах остаточной несущей способности дефектных железобетонных опор контактной сети.

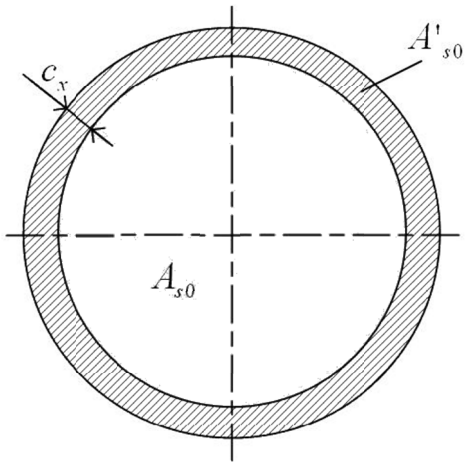



Рисунок 3 – Увеличение площади поперечного сечения стержня вследствие коррозии

*Список литературы*

1. Алексеев, С. Н. Коррозия и защита арматуры в бетоне [Текст] / С. Н. Алексеев. – М.: Госстройиздат, 1962. – 174 с.

2. Andrade K. and oth. Cover cracking and Amount of Rebar Corrosion // Concrete Repair, Rehabilitation and Corrosion. – London, 1996. – P. 263 – 273.

3. Васильев, А. И. Оценка коррозионного износа рабочей арматуры в балках пролетных строений автодорожных мостов [Текст] / А. И. Васильев // Бетон и железобетон. 2000. – № 2. – С. 20 – 23.

4. Гутман, С. Г. К расчету тоннелей [Текст] / С. Г. Гутман // Известия научно-исследовательского института гидротехники. 1939. – Т. XXV. – С. 146 – 168.

УДК 629.4.027.23:004.42

Ю. И. Матяш, А. О. Бельский

# ВЫБОР ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ РАСЧЕТА БОКОВОЙ РАМЫ ТЕЛЕЖКИ

*В статье проведен анализ двух наиболее распространенных программных комплексов – ANSYS и SolidWorks Simulation – для расчета методом конечных элементов конструкции боковой рамы, а также даны рекомендации о возможном применении указанных комплексов в теоретических исследованиях.*

В последние десятилетия в различных отраслях промышленности во всем мире на этапе разработки новых технических решений и оптимизации старых получил широкое применение и занял ведущее место метод конечных элементов (МКЭ). До начала 90-х гг. при расчетах на прочность в научных организациях и на промышленных железнодорожных предприятиях использовались программы, составленные собственными энтузиастами. При этом каждая программа могла применяться только для той детали, для которой она разрабатывалась. Любые изменения в конструкции детали требовали пересмотра кода программы, что было неудобно и требовало значительных временных затрат, поэтому начали разрабатываться универсальные программные комплексы, применение которых не ограничивается формой детали.

В настоящее время на рынке программных продуктов представлено множество универсальных программных комплексов, разработанных на основе МКЭ. Благодаря мощности современных компьютеров применение того или иного программного продукта показало не только удобство его использования, но и эффективность в плане решения поставленных задач.

На сегодняшний день наиболее распространенными универсальными программными комплексами для исследования конструкции МКЭ являются ANSYS фирмы ANSYSInc и SolidWorks с модулем Simulation компании Dassault Systems.

Для выбора программного комплекса и анализа возможности его применения к решению задач по численному исследованию прочности конструкции железнодорожных деталей и узлов проведем исследование прочности боковой рамы тележки модели 18 – 100 грузового вагона. Боковая рама является одной из наиболее ответственных деталей грузового вагона, от которой зависит безопасность движения, эта рама является самой распространенной на сети российских железных дорог и стран СНГ.

Теоретические исследования прочности боковой рамы проведем в соответствии с «Нормами для расчета и проектирования новых и модернизируемых вагонов железных дорог колеи 1520 мм (несамоходных)» 1996 г. (далее – «Нормами...») [1].

Независимо от вида программного комплекса анализ прочности боковой рамы тележки, созданной на основе МКЭ, можно условно разделить на следующие этапы:

1) создание трехмерной модели боковой рамы;
2) построение сетки конечных элементов;
3) задание свойств материала для боковой рамы;
4) задание граничных условий;
5) определение нагрузок;
6) анализ результата расчетов.

При создании трехмерной модели боковой рамы следует учитывать, что в каждом программном комплексе – собственные графические редакторы, различающиеся не только функциями, но и методологией построения. Трехмерные модели боковой рамы разрабатывались на основе чертежей «ОАО «НПК Уралвагонзавод». Для построения идентичных моделей боковины в программе ANSYS потребуется значительно больше временных затрат, чем в SolidWorks. Это объясняется тем, что у программы SolidWorks – более современный графи-

ческий интерфейс с возможностью широкого использования технических средств, что существенно облегчает построение модели, а построение модели боковой рамы в ANSYS осуществляется практически командным способом. В SolidWorks имеется возможность параметрического моделирования: размеры модели можно задавать зависимыми друг от друга, что наряду со свободным доступом к элементам, из которых построена модель боковой рамы, дает возможность изменения конструкции без особых затруднений при проведении ее оптимизации. В программе ANSYS при проведении оптимизации конструкции инженеру-расчетчику вручную придется полностью перестраивать модель боковой рамы.

Одним из наиболее важных этапов при проведении расчетов МКЭ является создание конечно-элементной сетки, покрывающей модель. В программном комплексе ANSYS имеется два основных метода построения сетки: построение произвольной и упорядоченной сетки. Произвольная сетка строится автоматически, при этом соседние конечные элементы (КЭ) могут существенно отличаться друг от друга по размерам. Практика расчетов с применением МКЭ показывает, что упорядоченная сетка является более предпочтительной, чем произвольная, с точки зрения как быстродействия, так и вычислений. Основными параметрами, характеризующими сетку КЭ, являются тип КЭ, из которых будет создана сетка, и размер КЭ. В программе ANSYS при расчете задач механики твердого тела имеется 94 элемента с различными свойствами и параметрами. Сетка КЭ, созданная в программном комплексе ANSYS, может состоять из КЭ, отличающихся друг от друга типами и параметрами. Конечно-элементная сетка в SolidWorks Simulation создается только автоматически и состоит только из одного типа КЭ, так как других в программе разработчиками не предусмотрено. Функционал программного комплекса ANSYS по созданию конечно-элементной сетки модели больше, чем SolidWorks Simulation, и область применения программного комплекса ANSYS значительно расширяется.

Для проведения сравнительных расчетов на прочность в программном комплексе ANSYS конечно-элементную сетку создадим по аналогии с сеткой КЭ SolidWorks Simulation, используя автоматический метод построения конечно-элементной сетки с аналогичным типом КЭ и с идентичными размерами. Параметры созданных конечно-элементных сеток моделей боковых рам приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры созданных сеток в программных комплексах ANSYS и SolidWorks Simulation

| Параметр | Программный комплекс | |
|---|---|---|
| | ANSYS | SolidWorks Simulation |
| Размер КЭ, мм | 10 | 10 |
| Число типов КЭ, шт. | 1 | 1 |
| Всего узлов, шт. | 171109 | 212563 |
| Всего элементов, шт. | 93204 | 119366 |

При создании сетки КЭ в программных комплексах ANSYS и SolidWorks Simulation с идентичными параметрами имеются различия в числе узлов и количестве КЭ сетки. При этом конечно-элементные сетки моделей, согласно встроенным механизмам проверки построения конечно-элементной сетки, созданы без ошибок. Различие в количестве элементов и узлов объясняется различными алгоритмами построения самой сетки КЭ, заложенными разработчиками в программные комплексы.

При задании свойств материала его параметры определяются в соответствии с ОСТ 32.183-2004 [2]. Следует отметить, что моделируемый материал в ANSYS имеет значительно больше характеристик, чем в SolidWorks Simulation, но и имеющихся характеристик материала в SolidWorks Simulation достаточно, чтобы описать модель материала в соответствии с требованиями «Норм…». Дополнительные характеристики материала программного комплекса ANSYS требуются в таких расчетах, например, как механика разрушения деталей.

Функционал программных комплексов ANSYS и SolidWorks Simulation в части приложения и выбора типа нагрузок, действующих на модель, а также задания граничных условий

практически одинаков, за исключением того, что в ANSYS нагрузки и граничные условия можно прикладывать не только к поверхности модели (как в SolidWorks Simulation), но и КЭ или к группе КЭ.

Величина и сочетание расчетных нагрузок, действующих на боковую раму, определена в соответствии с рекомендациями работ [1, 3] и приведена в таблице 2, а схема приложения нагрузок показана на рисунке 1. При проведении сравнительно анализа будем считать, что боковая рама свободно лежит на двух опорах (см. рисунок 1), нагрузки считаем мгновенно приложенными к поверхностям и равномерно распределенными по ним.

Таблица 2 – Величина нагрузок для боковой рамы из расчета осевой нагрузки 23,5тс

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

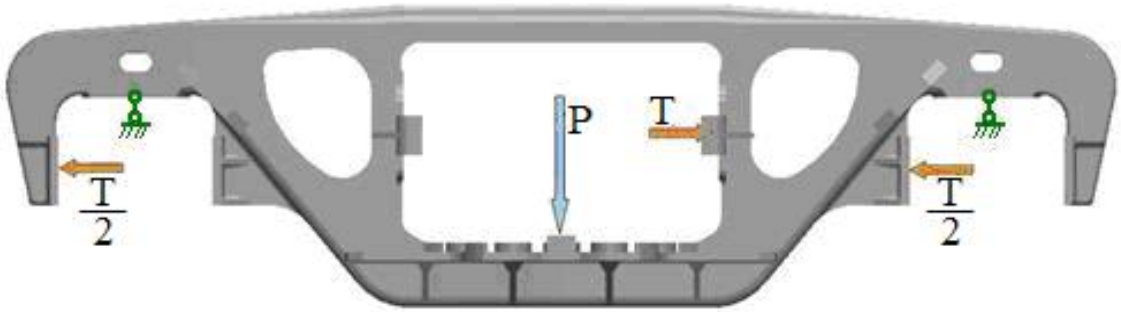



Рисунок 1 – Схема приложения нагрузок для расчета: *P* и *T* – вертикальная и продольная нагрузка

После того как были созданы модель боковой рамы и конечно-элементная сетка, заданы свойства материала, определены граничные условия и приложены нагрузки, проводится численный расчет.

Для удобства анализа результатов расчета в таблице 3 приведены значения эквивалентных напряжений в наиболее опасных местах боковой рамы (рисунок 2).

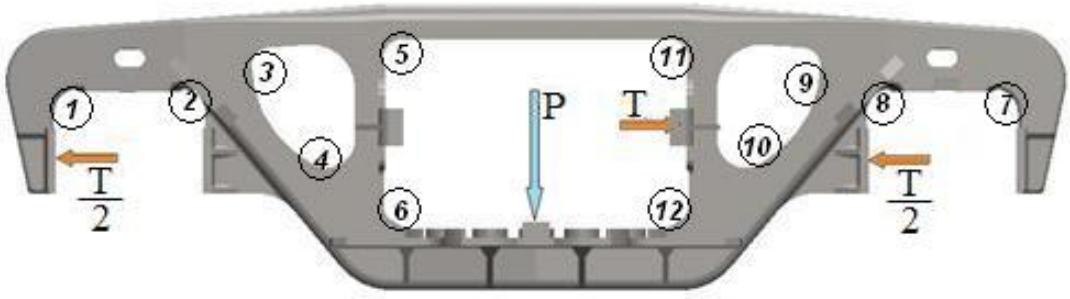



Рисунок 2 – Боковая рама с наиболее опасными местами возникновения трещин:1,7 – наружный угол R55 буксового проема; 2,8 – внутренний угол буксового проема R55; 3 – 6 – кромки технологических окон боковой рамы; 5,11 и 6,12 – верхние и нижние углы рессорного проема

Результаты распределения эквивалентных напряжений (см. таблицу 2) показывают, что независимо от выбранного программного комплекса (при идентичных настройках расчетного модуля) результаты получаются схожими. Наиболее опасными местами в боковой раме являются внутренние 2 (см. рисунок 2) и наружные углы 8 буксового проема, кромки 4 и 10 технологических окон, нижние углы 6 и 12 рессорного проема. Это полностью соответствует практике эксплуатации боковой рамы тележки модели 18 – 100.

Таблица 3 – Результаты расчета боковой рамы, МПа

| Расчетный режим, программный комплекс | Места возникновения трещин | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| I, ANSYS | 170 | 307 | 169 | 273 | 150 | 238 | 34 | 238 | 102 | 220 | 115 | 280 |
| I, SolidWorks Simulation | 168 | 300 | 182 | 266 | 151 | 245 | 30 | 246 | 98 | 210 | 118 | 285 |
| III, ANSYS | 54 | 164 | 91 | 156 | 89 | 146 | 18 | 126 | 54 | 126 | 91 | 142 |
| I, SolidWork Simulation | 50 | 160 | 85 | 144 | 90 | 139 | 17 | 122 | 47 | 123 | 87 | 129 |

Отличительной особенностью проведенного сравнительного анализа является то, что в SolidWorks Simulation никаких других настроек, кроме примененных, задать или изменить нельзя, а в ANSYS расчет произведен с минимальным количеством необходимых параметров (идентичных SolidWorks Simulation).

Таким образом, для начального исследования конструкции детали и боковой рамы можно использовать оба программных комплекса – SolidWorks Simulation и ANSYS, а для более подробного исследования конструкции, например, механики разрушения твердого тела, динамического анализа, подходит только программный комплекс ANSYS.

*Список литературы*

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

2. ОСТ 32.183-2001. Тележки двухосные грузовых вагонов колеи 1520 мм. Детали литые. Рама боковая и балка надрессорная: Стандарт отрасли / МПС России. – М., 2001. – 21 с.

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

---

УДК 629.4.015:625.1.03

Р. Д. Сабиров

## ПРОБЛЕМЫ УЧЕТА ПРОДОЛЬНОЙ НЕРАВНОУПРУГОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ В ДИНАМИКЕ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

*В статье предлагается обзор основных работ, посвященных изучению способов учета продольной неравноупругости железнодорожного пути в динамике подвижного состава. Приведен критический анализ развития математического аппарата, описывающего движение подвижного состава по неравноупругому пути вдоль рельса. Сделан вывод, на основе которого предлагается дальнейшая проработка вопроса взаимодействия подвижного состава с неравноупругим путем.*

Колебания железнодорожных экипажей в продольной вертикальной плоскости симметрии возникают по многим причинам: от изменения продольной силы, от неровностей поверхностей катания рельсов и бандажей, от неравноупругости пути по длине рельсового звена и др. Наиболее полно изучено взаимодействие пути и подвижного состава при движении по геометрическим неровностям. И лишь в 60-е – 90-е гг. XX в. появилось небольшое количество работ, посвященных анализу движения подвижного состава по неравноупругому пути вдоль рельса [1 – 8]. В настоящее время исследования по данной тематике не ведутся.

Одной из первых работ, посвященных влиянию продольной неравноупругости пути на динамику подвижного состава, была статья профессора М. П. Пахомова [1], в которой рассматривается взаимодействие электровоза на путь в зоне стыка. Характер изменения жесткости пути по протяженности звена представлен на рисунке 1.

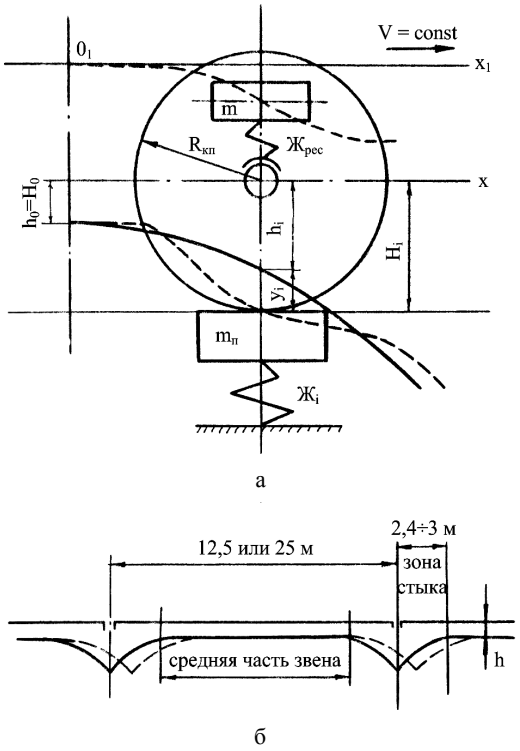



Рисунок 1 – Расчетная схема условного экипажа при движении в зоне стыка (а) и изменение жесткости пути по длине рельсового звена (б)

Жесткость железнодорожного пути связана с упругостью пути соотношением:

$$Ж_{п} = 2\sqrt[4]{4 \cdot E \cdot J \cdot U^{3}}, \qquad (1)$$

где $E$ – модуль упругости рельсовой стали;

$J$ – момент инерции рельса относительно нейтральной оси его сечения;

$U$ – модуль упругости железнодорожного пути.

Поведение условного одноосного экипажа характеризовалось системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \ddot{z} + \dfrac{Ж_{р}}{M} z - \dfrac{Ж_{р}}{M} z_{к.п.} = \dfrac{Ж_{р}}{M}\left(h - H_{0}\right); \\ \ddot{z}_{к.п.} + \dfrac{Ж_{р} + Ж_{п}}{m} z_{к.п.} - \dfrac{Ж_{р}}{m} z = -\ddot{h} - \dfrac{Ж_{р}}{m}\left(h - H_{0}\right), \end{cases} \qquad (2)$$

в первом из которых есть постоянные коэффициенты, описывает оно вынужденные колебания подрессоренной массы, а второе имеет переменные коэффициенты и описывает оно вынужденные колебания необрессоренных масс локомотива. На рисунке 1 приняты следующие обозначения: $Ж_{р}$, $Ж_{п}$ – жесткость рессорного комплекта и пути соответственно; $M$, $m = m_{к.п.} + m_{п}$ – масса обрессоренных частей, «приведенная» масса колесной пары; $h$, $H_{0}$ – прогиб пути в зоне стыка и в средине звена.

Вычисления по системе уравнений (2) учитывали лишь зону стыка, которая составляет 2,4 – 3 м. Так как второе уравнение системы (2) из-за неравноупругости пути, изменяющейся достаточно плавно в зоне стыка, имеет переменные коэффициенты, то был использован метод интегрирования в конечных разностях и получены рекуррентные соотношения для вычисления динамических прогибов рельсов и добавок к силам.

Такая постановка задачи не является всеобъемлющей. Известно, что жесткость пути под шпалой несколько выше, чем в междушпальном пролете и изменяется она случайным образом. Известно также и то, что этому случайному процессу присущи гармонические компоненты, поэтому в левой части уравнений (2) должны стоять периодические коэффициенты. Однако такие системы дифференциальных уравнений не имеют регулярных методов решения и периодических решений, у них есть ряд специфических особенностей, которые остались неизученными [10, 11].

Исследованию влияния неравножесткости железнодорожного пути на шпалах и в междушпальных пролетах на силы взаимодействия пути и подвижного состава посвящена статья доцента Леванкова И. С. [2]. В ней рельс рассматривается как балка, лежащая на сплошном неравноупругом основании, упругие характеристики которого изменяются вдоль пути по синусоидальному закону с длиной волны, равной расстоянию между осями шпал. Дифференциальное уравнение, описывающее поведение колесной пары, имеет вид:

$$\ddot{y}_1 + 2h\dot{y}_1 + \nu^2 y_1 = \frac{d}{M}\left[\left(Ж_3 - m_2\omega^2\right)\cos\omega t - \alpha_3\omega\sin\omega t\right], \quad (3)$$

где $\omega = \dfrac{2\pi V}{l}$;

$M = m_1 + m_2$;

$2h = \dfrac{\alpha_1 + \alpha_3}{M}$;

$\nu^2 = \dfrac{Ж_1 + Ж_3}{M}$;

$V$ – линейная скорость колеса;

$l$ – длина волны (равная расстоянию между осями шпал $l \approx 0{,}544$ м);

$m_1$ – «приведенная» масса пути;

$m_2$ – неподрессоренная масса, приходящаяся на одно колесо;

$Ж_1$, $Ж_3$ – жесткость пути и рессор соответственно;

$\alpha_1$, $\alpha_3$ – коэффициент пропорциональности в выражении сил сопротивления колебаниям в пути и рессоре;

$d$ – амплитуда неровности.

Уравнение (3) имеет постоянные коэффициенты, а неравножесткость пути учитывается как возмущающий фактор в правой части уравнения (3) и таким образом представляет собой некоторую геометрическую неровность. На основании проведенных расчетов утверждается, что движение колеса подвижного состава по траекториям с критической или близкой к ней скоростью (см. рисунок 2) будет сопровождаться увеличением давления колеса на рельс. При этом наибольшее давление будет в момент нахождения колеса над шпалами или вблизи них. В момент прохождения колесом середины междушпального пролета давление его на рельс уменьшается.

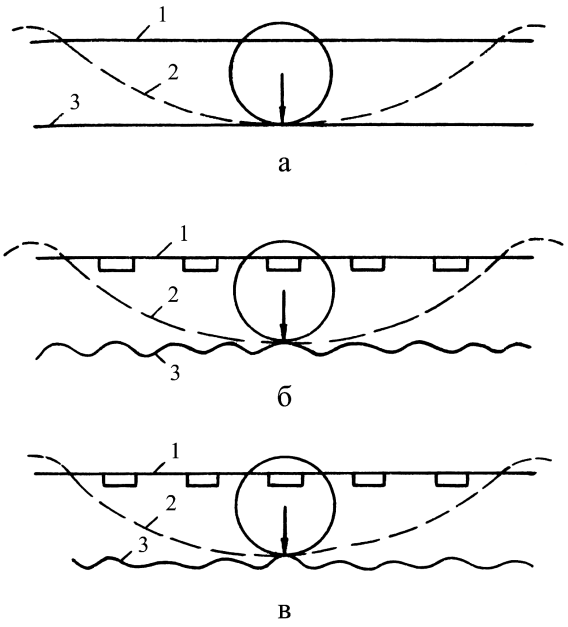



Рисунок 2 – Траектории движения колеса при равноупругом основании (а), при учете разной упругости на шпале и в пролете (б), при разной упругости на шпалах (в): 1 и 2 – линии ненагруженного и загруженного рельсов; 3 – траектория перемещения точки контакта колеса и рельса

В работе Фришмана М. А. и Леванкова И. С. [3] приводятся результаты натурных измерений и изучения особенностей изменения жесткости пути по его длине на участке со следующими характеристиками: балласт – щебеночный; шпалы – железобетонные; рельс – Р50. В ходе анализа эмпирического материала была построена корреляционная функция жесткости пути, важной особенностью которой является наличие в ней периодических составляющих с различными периодами. Это указывает на наличие в случайном характере изменения жесткости по длине пути ряда гармонических составляющих.

С целью выявления периодических составляющих, присущих характеру изменения жесткости по длине пути, были выполнены расчеты по определению численных значений функций спектральной плотности. График этой функции представлен на рисунке 3, из которого видно, что в графике спектральной плотности жесткости пути имеется много пиков гармони-

ческих составляющих. По уровню спектральной плотности, соответствующему определенной частоте, можно судить о роли той или иной гармонической составляющей в формировании характера изменения жесткости по длине пути.

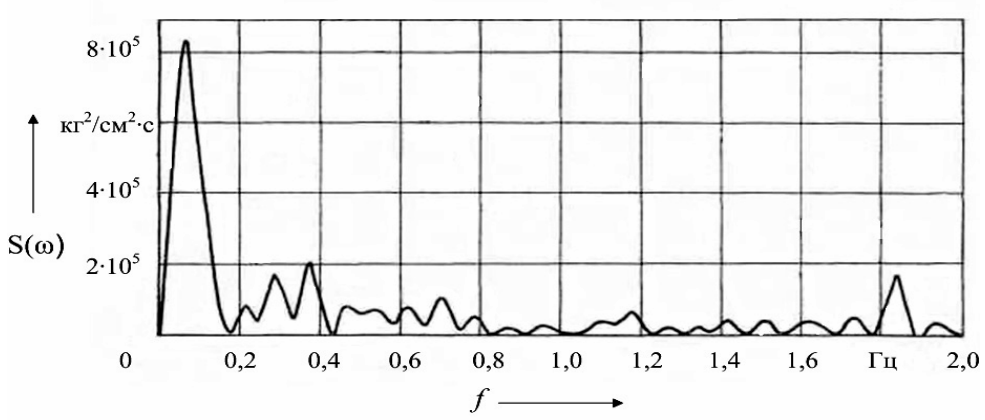



Рисунок 3 – График спектральной плотности жесткости пути

На основании анализа графика, приведенного на рисунке 3, можно сделать вывод о том, что наибольший уровень спектральной плотности приходится на гармоническую составляющую с частотой $f_1$, равной 0,064 Гц. Кроме того, выделяются пики, соответствующие частоте: $f_2$, равной 0,28; $f_3$ – 0,375; $f_4$ – 0,7 и $f_5$ равной 1,84 Гц.

В связи с тем, что график спектральной плотности жесткости пути был построен для единичной скорости ($V$ =1 м/с), длина волны $l_k$ $k$-й гармонической составляющей определена авторами статьи путем деления единичной скорости на соответствующую частоту $f_k$ по выражению:

$$l_k = \frac{1}{f_k}. \tag{4}$$

По уровням спектральной плотности авторами работы [3] была определена величина средней амплитуды гармонических составляющих изменяющейся вдоль пути жесткости по формуле:

$$A_k = \sqrt{\frac{4\pi\sigma^2}{T_0} S^*(\omega_x)}, \tag{5}$$

где $A_k$ – средняя амплитуда $k$-й гармоники;

$\sigma^2$ – дисперсия;

$S^*(\omega_x)$ – уровень спектральной плотности;

$T_0$ – продолжительность корреляционной функции жесткости пути.

Рассчитанные по формулам (4) и (5) основные параметры гармонических составляющих жесткости пути приведены в таблице.

Аналогичные исследования в течение многих лет проводились кафедрой «Взаимодействие подвижного состава и пути и динамика локомотивов» ОмИИТа [4] на различных железных дорогах Сибирского региона и на дороге с вечной мерзлотой (Норильская железная дорога). Характеристика участка, на котором производились измерения: балласт – щебеночный; шпалы – деревянные; рельс – Р50. Полученные характеристики гармонических составляющих жесткости пути приведены в таблице. Из приведенных в таблице данных видно, что длина волны самой высокочастотной гармонической составляющей, изменяющейся вдоль пути жесткости, соответствует расстоянию между осями шпал.

Таблица – Характеристики гармоник

| Номер гармоники $k$ | Частота $k$-й гармоники $f_k$, Гц | Длина волны $k$-й гармоники $l_k$, м | Амплитуда изменения жесткости пути $k$-й гармоники $A_k$, тс/мм |
|---|---|---|---|
| 1 | 0,064/0,179* | 15,62/5,59 | 0,19/0,27 |
| 2 | 0,28/0,528 | 3,57/1,89 | 0,1/0,23 |
| 3 | 0,375/0,635 | 2,67/1,57 | 0,1/0,29 |
| 4 | 0,7/0,932 | 1,43/1,07 | 0,06/0,1 |
| 5 | 1,84/1,197 | 0,544/0,84 | 0,08/0,08 |

* – в знаменателе указаны данные, полученные сотрудниками кафедры "Взаимодействие подвижного состава и пути и динамика локомотивов" ОмИИТа.

В проводимых исследованиях в преобладающем большинстве рассматривалось движение идеализированного груженого вагона по неравноупругому пути вдоль рельса [8]. Одна из полученных расчетных схем представлена на рисунке 4.

Для приведенной на рисунке 4 расчетной схемы были составлены уравнения Лагранжа и после подстановки в них соответствующих производных была получена система дифференциальных уравнений с периодическими коэффициентами (6), в которых продольная неравноупругость пути уже входит в левую и правую части уравнений как мультипликативно, так и аддитивно:

$$\begin{cases} M\dot{q}_1 + -\beta_{\text{р}}\dot{q}_2 + C_{\text{р}}q_1 - C_{\text{р}}q_2 = -M\ddot{f}_{\text{ст. п}}; \\ M_{\text{п}}\ddot{q}_2 - \beta_{\text{р}}\dot{q}_1 + \left(\beta_{\text{р}} + \beta_{\text{п}}\right)\dot{q}_2 - C_{\text{р}}q_1 + \\ + \left(C_{\text{р}} + C_{\text{п}}\right)q_2 = -M_{\text{п}}\ddot{f}_{\text{ст. п}} - \beta_{\text{п}}\dot{f}_{\text{ст.п}}, \end{cases} \qquad (6)$$

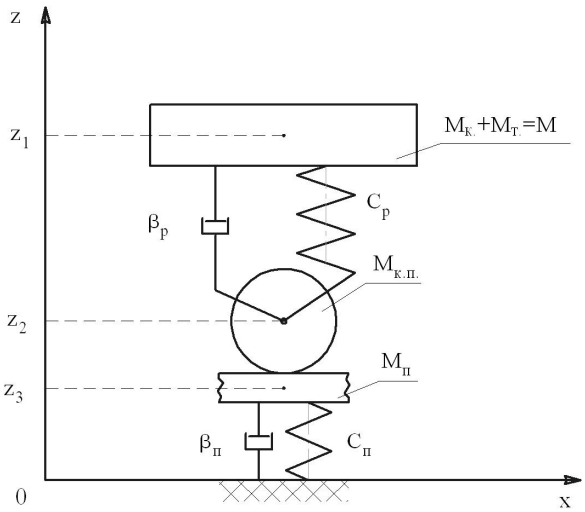



Рисунок 4 – Расчетная схема идеализированного груженого вагона

где $M = M_{\text{к}} + M_{\text{т}}$ – масса кузова и тележки;

$M_{\text{п}}$ – "приведенная" масса пути;

$C_{\text{р}}$, $C_{\text{п}}$ – жесткость рессорного комплекта и вертикальная жесткость пути, которая определяется по формуле:

$$C_{\text{п}} = C_0\left[1 - 2\sum_{k=1}^{S}\mu_k\cos\left(\omega_k t + \varphi_k\right)\right], \qquad (7)$$

где $C_0$ – средняя вертикальная жесткость пути;

$\mu_k$ – коэффициент параметрического возбуждения;

$\omega_k$ – частота $k$-й гармоники;

$\varphi_k$ – угол сдвига $k$-й гармоники;

$\beta_{\text{р}}$, $\beta_{\text{п}}$ – коэффициенты вязкого трения в рессорах и пути;

$q$ – обобщенная координата подпрыгивания колесной пары и пути;

$f_{\text{ст. п}}$ – статический прогиб пути, определяемый по приближенной формуле:

$$f_{\text{ст. п}} \approx f_0\left[1 + 2\sum_{k=1}^{S}\mu_k\cos\left(\omega_k t + \varphi_k\right)\right], \qquad (8)$$

здесь $f_0 = (M+m)g/C_0$ – средний на рельсовом звене статический прогиб пути, равный для рассматриваемых условий примерно 0, 005 м.

Далее были найдены зоны динамической неустойчивости идеализированного груженого вагона для простых и комбинационных типов параметрических резонансов (рисунок 5). Критические значения $\mu^{(кр)}$ для простых главных резонансов первой зоны (кузова) $\mu_1^{(кр)}$ и второй зоны (колесной пары) $\mu_2^{(кр)}$ имеют значения $1,07$ и $1,88$ соответственно, а критический коэффициент параметрического возбуждения для главной зоны комбинационного резонанса $\mu_*^{(кр)}$ равен $0,9$.

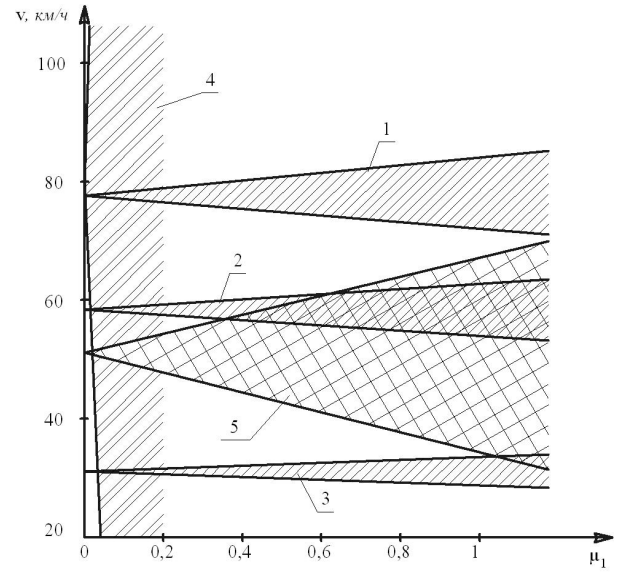



Рисунок 5 – Области динамической неустойчивости идеализированного груженого вагона: 1 – 3 – зоны параметрических резонансов кузова для второй, третьей и четвертой гармоник; 4 – зона параметрического резонанса колесной пары для пятой гармоники; 5 – зона комбинационного резонанса суммарного типа

Из рисунка 5 видно, что колесная пара вагона имеет самую широкую зону динамической неустойчивости и откликается в основном на пятую гармонику жесткости пути, которая определяется наличием шпал. Было выявлено также, что динамическая составляющая от воздействия на путь растет с увеличением скорости движения вагона, особенно интенсивно при скоростях движения 40 – 50 и 80 – 100 км/ч, при которых и обнаруживаются зоны областей неустойчивости системы.

Здесь достаточно ярко представлены особенности поведения дифференциальных уравнений с периодическими коэффициентами в левой части. Если бы в левой части уравнений стояли постоянные коэффициенты, то такая система представляла бы только два резонанса: один – для кузова, второй – для колесной пары вагона.

Однако в работе не учитывается наличие на поверхности катания рельсов геометрических неровностей. Вызывает возражение и тот факт, что статический прогиб пути определялся по приближенной формуле (8), которая приводит к достаточно существенной ошибке из-за того, что входящий в эту формулу коэффициент параметрического возбуждения $\mu_k$ на самом деле не является достаточно малой величиной, а равен единице [9].

В результате описанных выше исследований показано, что продольная неравноупругость железнодорожного пути должна входить в качестве возмущения как в левую часть дифференциальных уравнений в виде переменных коэффициентов перед обобщенными координатами, описывающими подпрыгивание колесных пар подвижного состава, так и в правую часть уравнений. А это приводит к тому, что мультипликативные и аддитивные свойства полученных дифференциальных уравнений могут приводить как к увеличению, так и к уменьшению воздействия различного вида геометрических неровностей на динамическую составляющую силу, действующую от подвижного состава на железнодорожный путь [11].

Следовательно, совместное воздействие продольной неравноупругости пути и геометрической неровности рельса или неровности на поверхности катания колеса может привести как к увеличению, так и к уменьшению действия динамической составляющей от подвижного состава на железнодорожный путь, все зависит от некоторых условий, а именно от фазовых соотношений между внешним и параметрическим возмущениями. Поэтому в последующих исследованиях по данной тематике необходимо корректно рассматривать одновременное действие геометрических неровностей и неравноупругости пути на подвижной состав железных дорог, что будет выполнено в дальнейшем и позволит сблизить результаты теоретических и экспериментальных исследований.

*Список литературы*

1. Пахомов, М. П. Воздействие электровоза на путь в зоне стыка [Текст] / М. П. Пахомов // Вестник ВНИИЖТа. 1957. – № 34. – С. 30 – 34.

2. Леванков, И. С. Влияние неравножесткости пути на шпалах и в междушпальных пролетах на силы взаимодействия пути и подвижного состава [Текст] / И. С. Леванков // Вопросы путевого хозяйства: Науч. тр. / Днепропетровский ин-т инж. ж.-д. трансп. – Днепропетровск, 1964. – № 57. – С. 63 – 79.

3. Фришман, М. А. Исследование особенностей изменения вертикальной жесткости пути по его длине [Текст] / М. А. Фришман, И. С. Леванков // Исследование взаимодействия пути и подвижного состава: Науч. тр. / Днепропетровский ин-т инж. ж.-д. трансп. – Днепропетровск. 1972. – № 138. – С. 48 – 57.

4. Теоретические и натурно-экспериментальные исследования динамических процессов взаимодействия подвижного состава и пути в вертикальной и горизонтальной плоскостях зимой и летом: Отчет о НИР (заключит.) [Текст] / Омский ин-т инж. ж.-д. трансп.; Руководитель М. П. Пахомов. № ГР 76005445; Инв. № Б862362. – Омск, 1980. – 198 с.

5. Панькин, Н. А. Колебательные движения экипажей при параметрическом стохастическом возбуждении [Текст] / Н. А. Панькин, И. М. Стесин, В. П. Ценов // Вестник ВНИИЖТа. 1978. – №1. – С. 27 – 30.

6. Галиев, И. И. О влиянии неравноупругости пути на резонансные скорости подвижного состава [Текст] / И. И., Галиев, В. А. Нехаев // РЖ ВИНИТИ «Железнодорожный транспорт». 1979. – №10. – С. 48 – 57.

7. Бурчак, Г. П. Колебания неподрессоренной массы на неравноупругом пути с неровностями [Текст] / Г. П. Бурчак // Науч. тр. – М.: Транспорт, 1980. – №175. – С. 84 – 98.

8. Большакова, А. В. Движение грузового вагона по неравноупругому по длине рельсовому пути [Текст] / А. В. Большакова // Повышение динамических качеств подвижного состава и поезда в условиях Сибирского региона / Омский ин-т инж. ж.-д. трансп. – Омск, 1989. – С. 51 – 60.

9. Сабиров, Р. Д. Движение колесной пары вагона по неравноупругому пути вдоль рельса [Текст] / Р. Д. Сабиров // Транспорт Урала. 2009. – №4 (23). – С. 69 – 72.

10. Якубович, В. А. Линейные дифференциальные уравнения с периодическими коэффициентами и их приложения [Текст] / В. А. Якубович, В. М. Старжинский. – М.: Наука, 1972. – 720 с.

11. Болотин, В. В. Динамическая устойчивость упругих систем [Текст] / В. В. Болотин. – М.: Гостехиздат, 1956. – 600 с.

---

УДК 629.4

А. Н. Смалев

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МАЛЫХ МАСС СИСТЕМЫ «КОЛЕСО – РЕЛЬС» НА СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЕ ДИНАМИКИ

*В статье проведено исследование динамики необрессоренных масс железнодорожного экипажа с применением статистических методов. Выявлена зависимость частотных свойств рассматриваемой системы от малых масс некоторых ее элементов. Сделан вывод о незначительном влиянии масс этих элементов на статистические характеристики колебательных процессов в системе.*

Известно, что при постановке задачи моделирования динамики экипажа, как и любой другой системы, возникает вопрос выбора степени сложности математической модели, описывающей рассматриваемые процессы. Есть основание полагать, что любое усложнение мо-

дели, например, учет большего числа параметров процесса, уточнение связей между ними, добавление в модель второстепенных внешних факторов (возмущений), влечет за собой более точные результаты расчетов. С другой стороны, это увеличивает нагрузку на вычислительные мощности, временные затраты возрастают не только в связи с увеличением объема вычислений, но и вследствие необходимости отладки более сложного алгоритма. К тому же, вероятность накопления значительной погрешности в конечном результате может стать существенной, что, как следствие, не гарантирует достижения исходной цели. Таким образом, требуется выяснить, насколько целесообразным является исследование системы в полной мере или можно просто составить ряд допущений без ущерба достоверности результата.

Понятно, что стремление к упрощению математической модели появляется в случае большого порядка ее размерности, когда ее расчет затруднителен не только аналитически, но и численными методами с помощью вычислительных машин. Тем не менее некоторые ее качественные особенности можно проанализировать и в случае более простого описания системы. Так, в данной работе рассмотрим вертикальную динамику необрессоренных масс экипажа и оценим влияние на результаты расчетов присущих пути и элементам буксовой ступени подвешивания экипажа малых масс по сравнению с остальными элементами механической части локомотива. Приведенная на рисунке 1 расчетная схема исследуемой системы является в значительной мере простой: механическая система имеет всего две степени свободы, все обрессоренные массы считаются неподвижными и соответствующим образом обозначены на схеме. Это сделано на основании возможности разделения движения [1] благодаря тому, что частоты возмущения при больших скоростях движения на порядок выше собственных частот экипажа, поэтому параметры экипажа, относящиеся к надрессорному строению, в решении задачи динамики не участвуют.

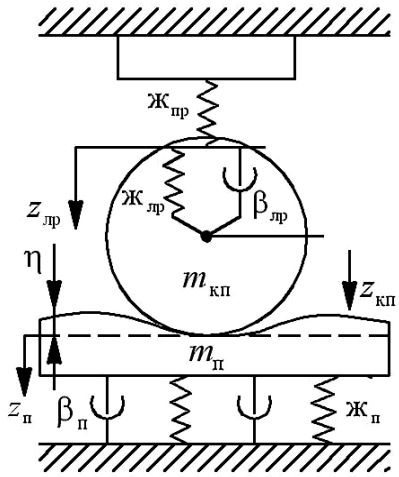



Рисунок 1 – Расчетная схема механической системы

Согласно расчетной схеме на рисунке 1 движение экипажа происходит по упругому пути с некоторой массой и диссипативными свойствами. Все параметры пути являются приведенными к оси колесной пары. Кроме этого продольный профиль рельса принимается неидеальным, его поверхность катания характеризуется некоторой геометрической неровностью, описываемой случайной функцией.

Обозначим координаты, присутствующие в рассматриваемой механической системе: $z_{лр}$ – вертикальные колебания упругих элементов с диссипацией энергии в буксовой ступени подвешивания экипажа; $z_{к.п}$ – вертикальные колебания колесной пары; $z_п$ – вертикальные колебания пути; $\eta$ – случайная функция геометрической неровности рельса. Из перечисленных переменных обобщенными координатами будут первые две, остальные связаны непосредственно с координатой колесной пары на основании гипотезы безотрывного движения:

$$z_п = z_{к.п} - \eta. \qquad (1)$$

Из всех кинематических характеристик вопрос вызывает только одна: что подразумевается под перемещением упругих элементов в буксовой ступени подвешивания (далее будем называть их листовой рессорой)? Сложность заключается в том, что движущаяся масса, соответствующая координате $z_{лр}$, является распределенной и ее, как и массу пути, следует каким-то образом заменить приведенной к некоторой точке. Располагается эта точка между обрессоренными массами экипажа (рамой тележки) и колесной парой и включает в себя некоторую часть массы буксового рессорного комплекта, состоящего из четырех пружин и двух листовых рессор в расчете на колесную пару. Не вдаваясь детально в механизм распределения этой массы, рассчитаем максимальную ее величину, равную массе буксового комплекта: она составляет порядка 360 кг на колесную пару. Фактически же в параметр $m_{лр}$ не должна

входить масса в области крепления листовой рессоры к буксе и пружин к раме тележки, а наибольшие инерционные свойства проявляются в месте соединения пружин с листовыми рессорами, т. е. целесообразно всю движущуюся массу листовой рессоры и пружин отнести именно к этим точкам. Учитывая результаты исследований, приведенные в работе [2], в качестве активной инерционной массы условно примем треть полной массы буксового рессорного комплекта, т. е. 120 кг. Тогда все вычисления, связанные с подстановкой данного значения, опять же – условно, будем считать точными.

Итак, зададим необходимые для решения задачи параметры системы [3] (в расчете на одну колесную пару): $m_{\text{лр}} = 0{,}012$ – «приведенная» масса листовой рессоры, тс·с$^2$/м; $m_{\text{к.п}} = 0{,}662$ – масса необрессоренных частей экипажа, тс·с$^2$/м; $m_{\text{п}} = 0{,}05$ – «приведенная» масса пути, тс·с$^2$/м; $ж_{\text{пр}} = 1120$ – жесткость пружин рессорного комплекта, тс/м; $ж_{\text{лр}} = 244$ – жесткость листовых рессор, тс/м; $ж_{\text{п}} = 70000$ – приведенная жесткость пути, тс/м; $ж_{\text{б}} = 200{,}4$ – суммарная жесткость буксового рессорного комплекта, тс/м; $\beta_{\text{п}} = 23$ – приведенный коэффициент вязкого трения в пути, тс·с/м; $\beta_{\text{лр}} = 87{,}7$ – эквивалентный коэффициент вязкого трения в листовой рессоре, тс·с/м. Приведенные параметры соответствуют экипажной части магистрального локомотива ВЛ10, выполняющего основную грузовую работу на сети постоянного тока.

Для выбранной расчетной схемы составим систему дифференциальных уравнений малых колебаний для двух обобщенных координат: $z_{\text{лр}}$ и $z_{\text{к.п}}$. Решим поставленную задачу с помощью метода Лагранжа аналогично расчетам, проведенным в работе [4]. В результате получим систему уравнений динамики системы:

$$\begin{cases} m_{\text{лр}}\ddot{z}_{\text{лр}} + \beta_{\text{лр}}\dot{z}_{\text{лр}} + \left(ж_{\text{пр}} + ж_{\text{лр}}\right) z_{\text{лр}} - \beta_{\text{лр}}\dot{z}_{\text{к.п}} - ж_{\text{лр}} z_{\text{к.п}} = 0; \\ \left(m_{\text{к.п}} + m_{\text{п}}\right)\ddot{z}_{\text{к.п}} + \left(\beta_{\text{лр}} + \beta_{\text{п}}\right)\dot{z}_{\text{к.п}} + \left(ж_{\text{лр}} + ж_{\text{п}}\right) z_{\text{к.п}} - \beta_{\text{лр}}\dot{z}_{\text{лр}} - ж_{\text{лр}} z_{\text{лр}} = m_{\text{п}}\ddot{\eta} + \beta_{\text{п}}\dot{\eta} + ж_{\text{п}}\eta. \end{cases} \quad (2)$$

Чтобы в дальнейшем определить соответствующие амплитудные частотные характеристики, которые понадобятся нам для вычисления статистических характеристик случайных процессов колебаний колесной пары и листовой рессоры, найдем из системы (2) передаточные функции для каждой из обобщенных координат. Для этого преобразуем оба уравнения системы (2) по Лапласу при нулевых начальных условиях и выразим из полученных выражений необходимые нам по определению соотношения, в результате чего получим искомые передаточные функции для каждой координаты по неровности пути:

$$\begin{cases} W_{\text{лр}}(s) = \dfrac{Z_{\text{лр}}(s)}{\text{Н}(s)} = \dfrac{B(s)}{A(s)}; \\ W_{\text{кп}}(s) = \dfrac{Z_{\text{к.п}}(s)}{\text{Н}(s)} = \dfrac{C(s)}{A(s)}, \end{cases} \quad (3)$$

где $A(s) = a_0 s^4 + a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s + a_4$;

$B(s) = b_1 s^3 + b_2 s^2 + b_3 s + b_4$;

$C(s) = c_0 s^4 + c_1 s^3 + c_2 s^2 + c_3 s + c_4$;

$Z_{\text{лр}}(s)$, $Z_{\text{кп}}(s)$ и $\text{Н}(s)$ – изображения по Лапласу вертикальных колебаний листовой рессоры, колесной пары и случайных геометрических неровностей рельса соответственно.

Коэффициенты передаточных функций выражаются через физические параметры системы «экипаж – путь». Для полинома знаменателя, одинакового для обеих передаточных функций, эти коэффициенты вычисляются по формулам:

$$\begin{cases} a_0 = m_{\text{лр}}\left(m_{\text{к.п}} + m_{\text{п}}\right); \\ a_1 = \left(m_{\text{лр}} + m_{\text{к.п}} + m_{\text{п}}\right)\beta_{\text{лр}} + m_{\text{лр}}\beta_{\text{п}}; \\ a_2 = \beta_{\text{п}}\beta_{\text{лр}} + m_{\text{лр}}(\text{ж}_{\text{лр}} + \text{ж}_{\text{п}}) + \left(m_{\text{к.п}} + m_{\text{п}}\right)\left(\text{ж}_{\text{пр}} + \text{ж}_{\text{лр}}\right); \\ a_3 = \beta_{\text{лр}}\left(\text{ж}_{\text{пр}} + \text{ж}_{\text{п}}\right) + \beta_{\text{п}}\left(\text{ж}_{\text{пр}} + \text{ж}_{\text{лр}}\right); \\ a_4 = \text{ж}_{\text{лр}}\text{ж}_{\text{пр}} + \text{ж}_{\text{п}}\left(\text{ж}_{\text{пр}} + \text{ж}_{\text{лр}}\right). \end{cases} \quad (4)$$

Заметим здесь, что полином числителя передаточной функции для листовой рессоры на порядок меньше, чем для колесной пары; коэффициенты при одинаковых степенях незначительно отличаются друг от друга и определяются выражениями:

$$\begin{cases} b_0 = 0; & c_0 = m_{\text{лр}}m_{\text{п}}; \\ b_1 = m_{\text{п}}\beta_{\text{лр}}; & c_1 = m_{\text{лр}}\beta_{\text{п}} + m_{\text{п}}\beta_{\text{лр}}; \\ b_2 = \beta_{\text{п}}\beta_{\text{лр}} + m_{\text{п}}\text{ж}_{\text{лр}}; & c_2 = m_{\text{лр}}\text{ж}_{\text{п}} + \beta_{\text{п}}\beta_{\text{лр}} + m_{\text{п}}\left(\text{ж}_{\text{пр}} + \text{ж}_{\text{лр}}\right); \\ b_3 = \beta_{\text{лр}}\text{ж}_{\text{п}} + \beta_{\text{п}}\text{ж}_{\text{лр}}; & c_3 = \beta_{\text{лр}}\text{ж}_{\text{п}} + \beta_{\text{п}}\left(\text{ж}_{\text{пр}} + \text{ж}_{\text{лр}}\right); \\ b_4 = \text{ж}_{\text{лр}}\text{ж}_{\text{п}}; & c_4 = \text{ж}_{\text{п}}\left(\text{ж}_{\text{пр}} + \text{ж}_{\text{лр}}\right). \end{cases} \quad (5)$$

Как видно из формул (5), при сравнении коэффициентов *b* и *c* с одинаковыми индексами оказывается, что их различие с учетом малости масс $m_{\text{лр}}$ и $m_{\text{п}}$ действительно несущественно. И все же необходимо кроме этого установить, насколько сильно влияет пренебрежение этими малыми массами при расчете статистических характеристик колебательных процессов в системе, для нахождения которых воспользуемся известным методом Винера – Хинчина [5]. Чтобы применить этот метод, нам как раз и понадобятся полученные передаточные функции для координат системы по возмущению. Тогда для рассматриваемых случайных малых колебаний, имеющих нулевое математическое ожидание, среднеквадратическое отклонение можно определить по формуле:

$$\sigma_{\ddot{z}}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S_{\ddot{z}}(\omega)d\omega, \quad (6)$$

где $S_{\ddot{z}}(\omega)$ – спектральная плотность соответствующей обобщенной координаты системы, рассчитываемая по формуле:

$$S_{\ddot{z}}(\omega) = \left|W_z(j\omega)\right|^2 S_{\ddot{\eta}}(\omega). \quad (7)$$

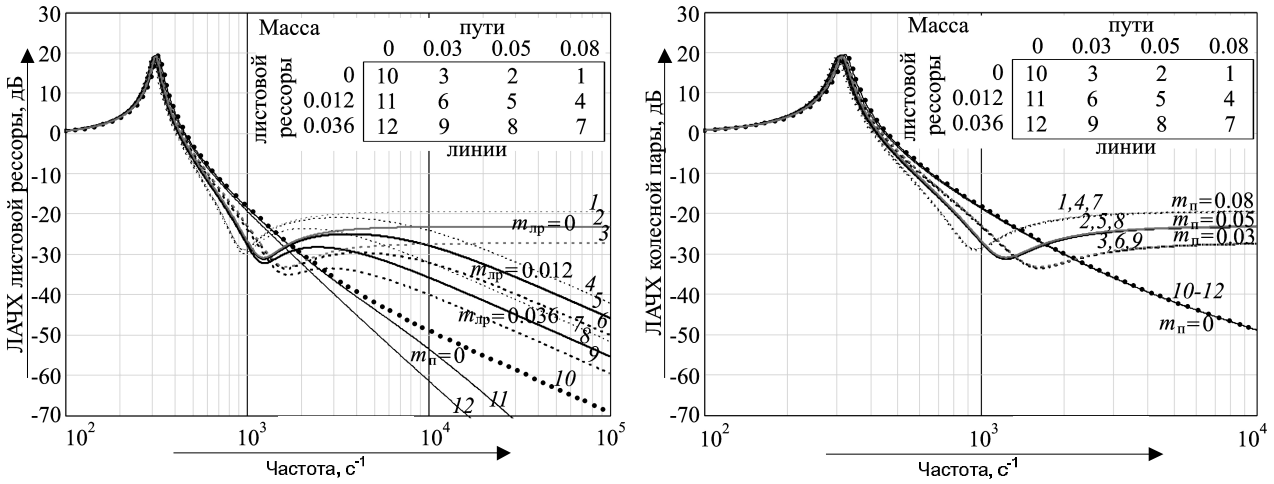
В формуле (7) присутствуют модуль соответствующей частотной передаточной функции, полученной из выражения (3), и спектральная плотность геометрической неровности рельса, характеризующая свойства его поверхности катания, которую примем согласно рекомендациям [6] независимой от частоты и в виде функции скорости экипажа:

$$S_{\ddot{\eta}}(\omega) = 1,24\cdot 10^{-6}V^3 = S_0(V). \quad (8)$$

Очевидно, что такое описание неровности пути является существенно упрощенным, как и сама модель механической системы, и требует проведения анализа с некоторыми допущениями, что будет оговорено далее. Тем не менее оно позволяет при прочих равных условиях провести сравнение результатов при существенно меньших объемах вычислений, т. е. достичь основной цели данной работы с меньшими затратами.

Для начала рассмотрим, как влияют два этих параметра – малые массы пути и листовой рессоры – на свойства самой механической системы. Исследуем логарифмическую частот-

ную характеристику для обеих обобщенных координат. Как видно из рисунка 2, а, для логарифмической амплитудной частотной характеристики (ЛАЧХ) листовой рессоры характерно наличие трех групп кривых 1 – 9 (по три кривых в каждой группе), соответствующих одинаковому значению массы листовой рессоры, а также еще три отдельно расположенные кривые (10 – 12), построенные при равной нулю «приведенной» массе пути. Наибольший интерес представляет высокочастотная область графика (за резонансной частотой), поскольку именно здесь решается вопрос о сходимости интеграла (6) и, как следствие, возможности определить среднеквадратическое отклонение случайного процесса. Первая группа кривых (1 – 3), соответствующая нулевой массе листовых рессор, проходит при больших частотах горизонтально. Это очевидно, поскольку в этом случае согласно формулам (4), (5) передаточная функция представляет собой отношение полиномов третьего порядка. Для таких значений параметров спектральная плотность ускорения колебаний листовой рессоры с увеличением частоты также не будет сходиться к нулю, поэтому рассчитать среднеквадратическое отклонение по формуле (6) нельзя.




а б

Рисунок 2 – ЛАЧХ колебательной системы для листовой рессоры (а) и для колесной пары (б)

Две другие группы кривых (4 – 6 и 7 – 9) изображены с наклоном высокочастотной асимптоты –20 дБ/дек, что свидетельствует о сходимости спектральной плотности и интеграла (6). Такой наклон графиков обусловлен учетом (ненулевыми значениями) масс листовых рессор и пути, вследствие чего числитель и знаменатель имеют исходный порядок, т. е. третий и четвертый соответственно. При нулевых массах листовой рессоры и пути (самый упрощенный случай) понижается порядок как числителя, так и знаменателя, передаточная функция представляет отношение полиномов второго порядка к третьему, и, соответственно, кривая 10 на высоких частотах также проходит с наклоном –20 дБ/дек. Если пренебречь только «приведенной» массой пути, то порядок числителя станет равным двум при неизменном порядке знаменателя; это видно из рисунка 2, а, на котором оставшиеся две кривые (11 и 12) в области высоких частот построены с наклоном –40 дБ/дек. Для всех логарифмических характеристик листовых рессор характерно, что при одинаковом значении массы листовой рессоры, принимаемом в расчете, график на высоких частотах при большей массе пути проходит выше, в области резонанса – наоборот.

Теперь рассмотрим ЛАЧХ колесной пары, представленную на рисунке 2, б. Очевидно, что для данной координаты в любом из случаев учета массы пути получается высокочастотная асимптота с нулевым наклоном, поскольку полиномы числителя и знаменателя передаточной функции имеют одинаковый порядок (в случае нулевой массы листовой рессоры – на

единицу меньше максимального). Следовательно, такой подход к описанию динамики колесной пары не позволяет вычислить среднеквадратическое отклонение по формуле (6). Характерной особенностью изображенных кривых является их близость друг к другу при одинаковом значении массы пути, другими словами, масса листовой рессоры почти не влияет на свойства колебаний колесной пары. «Приведенная» масса пути, наоборот, значительно изменяет свойства логарифмической характеристики на высоких частотах: с ее уменьшением группа кривых (для различных значений массы листовой рессоры) проходит ниже, а в пределе – при расчетах без учета массы пути – в передаточной функции порядок полиномов числителя и знаменателя снижается до двух и трех соответственно, и в этом случае кривые (10 – 12) проходят с наклоном –20 дБ/дек.

Таким образом, рассчитать характеристики колебательных процессов колесной пары аналитически возможно только в случае, когда «приведенная» масса пути в расчетах не учитывается. А если принимать во внимание тот факт, что свойства системы не зависят от массы листовой рессоры, то дополнительно было бы целесообразным принять равным нулю и этот параметр.

Следует указать на общую особенность колебаний для обеих обобщенных координат в области резонанса. Как видно из рисунка 2, вблизи своего пика графики логарифмических характеристик практически совпадают, при этом изменение массы одинаково влияет на все кривые. С уменьшением суммарной массы (независимо от варьирования каждого из параметров в отдельности) резонансная частота возрастает, а пиковое значение характеристики увеличивается. Однако вопрос о пренебрежении параметрами касается малых масс, поэтому эти изменения являются несущественными. Вообще же, нетрудно заметить, что в случае пренебрежения как массой пути, так и листовой рессоры логарифмические характеристики для обеих координат проходят наиболее близко. Это связано в первую очередь с тем, что при таком упрощении, как видно из формул (4), (5), в обоих случаях порядок числителя оказывается на единицу меньше, чем знаменателя, при этом порядки числителей и знаменателей у обеих передаточных функций оказываются соответственно равными. Существенные отличия для разных координат наблюдаются только на малых частотах (менее 100 рад/с), и на рисунке 2 это различие не показано, поскольку на расчетах оно сказывается незначительно.

До текущего момента, очевидно, было рассмотрено влияние малых масс элементов экипажной части локомотива и пути на качественном уровне и установлено их некоторое незначительное влияние на свойства системы, представленные в виде графиков логарифмической амплитудной частотной характеристики. Теперь исследуем непосредственно такую статистическую характеристику, как среднеквадратическое отклонение, в зависимости от конкретных числовых значений этих масс. Как было упомянуто выше, варьироваться эти два параметра будут от нулевых значений (случай пренебрежения ими в полной мере) до 0,036 тс·с$^2$/м для массы листовой рессоры и 0,08 тс·с$^2$/м – для «приведенной» массы пути. Результаты вычислений представим графически и согласно этим данным проведем количественный анализ влияния рассматриваемых параметров на колебательные процессы.

Начнем с более простого случая, когда расчет среднеквадратического отклонения ускорения по формуле (6) сводится к вычислению сходящегося интеграла. Этот случай соответствует согласно выражению (3) анализу колебаний листовой рессоры. На рисунке 3 изображены зависимости среднеквадратического отклонения ускорения вертикальных колебаний листовой рессоры от скорости движения экипажа. Графики приведены для нескольких выбранных значений массы пути и листовой рессоры (условные обозначения приняты аналогично рисунку 2). Сплошными утолщенными линиями показаны кривые, соответствующие среднему значению «приведенной» массы пути, принятой равной 0,05 тс·с$^2$/м. Случаи пренебрежения массой пути показаны тонкой сплошной линией. Особым образом (крупными точками) представлена зависимость, характеризующаяся пренебрежением обеими малыми массами, в общем же случае должны быть показаны графики для нулевой массы только листовой рессоры. Другое дело, что в случае пренебрежения ее массой и одновременно учета

массы пути интеграл (6) не сходится, поэтому остальные зависимости на графике рисунка 3 не показаны. Если же масса листовой рессоры не равна нулю, то при ее уменьшении, равно как и «приведенной» массы пути, наблюдается увеличение среднеквадратического отклонения ускорения для любой скорости экипажа. Точечная линия 10 характеризует наиболее приближенное описание процессов колебаний, но и она располагается рядом с другими кривыми, что говорит о незначительном влиянии рассматриваемых параметров на возникающие вертикальные ускорения колебаний листовой рессоры.

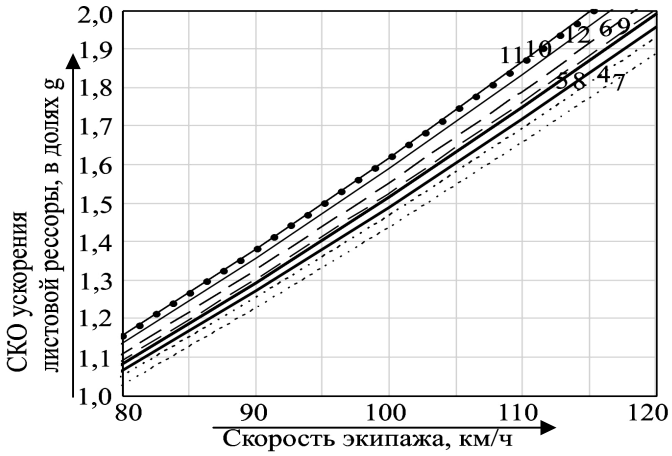



Рисунок 3 – Зависимость среднеквадратического отклонения (СКО) вертикального ускорения листовой рессоры от скорости экипажа

Остановимся подробнее на положениях, касающихся невыполнения условия сходимости интеграла (6). Применительно к колебаниям листовой рессоры было указано на то, что построение этих зависимостей попросту опущено. Тем не менее в случае перехода к анализу вертикальных колебаний колесной пары так поступить нельзя, поскольку согласно выражениям (3) – (5) интеграл будет сходиться только в случае пренебрежения обеими массами. Таким образом, сравнение точного и приближенного расчета вообще теряет смысл. Здесь также следует отметить, что данная проблема связана всего лишь с невозможностью в полной мере применять данный метод для оценки среднеквадратического отклонения колебаний, когда ускорение геометрической неровности рельса описывается случайной функцией типа «белого» шума. Это означает, что значения амплитуды ускорений неровностей равномерно распределены по всему частотному диапазону от нуля до бесконечности. Фактически же в реальной системе «колесо – путь» геометрических неровностей с очень большими значениями частоты почти не существует, что связано в первую очередь с ограничениями, накладываемыми на физические свойства контактирующих материалов. В этом случае интегрирование целесообразно проводить не до бесконечности, а до некоторого фиксированного значения частоты, за которой примем, что свойства геометрической неровности проявляются несущественно, а следовательно, можно ее спектральную плотность на больших частотах считать равной нулю. В качестве граничной частоты интегрирования обычно выбирают равную нескольким десяткам резонансной частоты. Укажем также и на тот факт, что на самом деле среднеквадратические отклонения перемещений как колесной пары, так и листовой рессоры не должны значительно отличаться друг от друга вследствие присутствия между этими элементами упругой связи и их взаимные отклонения, таким образом, ограничены.

Итак, перейдем к анализу колебаний колесной пары. Рассмотрим два случая: частоты, кратные резонансной (округленной до 314 рад/с) сто и пятьсот раз. Зависимость среднеквадратического отклонения ускорения ее вертикальных колебаний от скорости движения экипажа для различных значений варьируемых параметров приведена на рисунке 4, а для первого случая и на рисунке 4, б – для второго. Сразу же отметим, что на том и другом рисунке кривые 10 – 12, полученные интегрированием спектральной плотности до бесконечности, соответствуют только случаю пренебрежения «приведенной» массой пути. Нетрудно заметить, для одного и того же значения массы листовой рессоры эти кривые одинаковы для обоих случаев выбора граничной частоты интегрирования. Наиболее приближенным случаем будет тот, когда пренебрегают обеими массами, эта линия 10 проведена крупными точками. В остальных случаях (кривые 1 – 9) графики проходят снова недалеко от построенных по

приближенной модели, как и для листовой рессоры, за исключением, пожалуй, расчета среднеквадратического отклонения ускорения колесной пары при массе пути выше средней (кривые 1, 4, 7) в случае интегрирования до значения частоты, кратного резонансной пятьсот раз. Но это, в свою очередь, как раз и связано со свойствами передаточной функции колесной пары по неровности рельсового пути и самого подхода к моделированию, и эти особенности гораздо лучше будет исследовать с немного другой позиции. Для этого потребуется построить зависимости непосредственно от задаваемых параметров, т. е. «приведенной» массы пути и листовой рессоры.

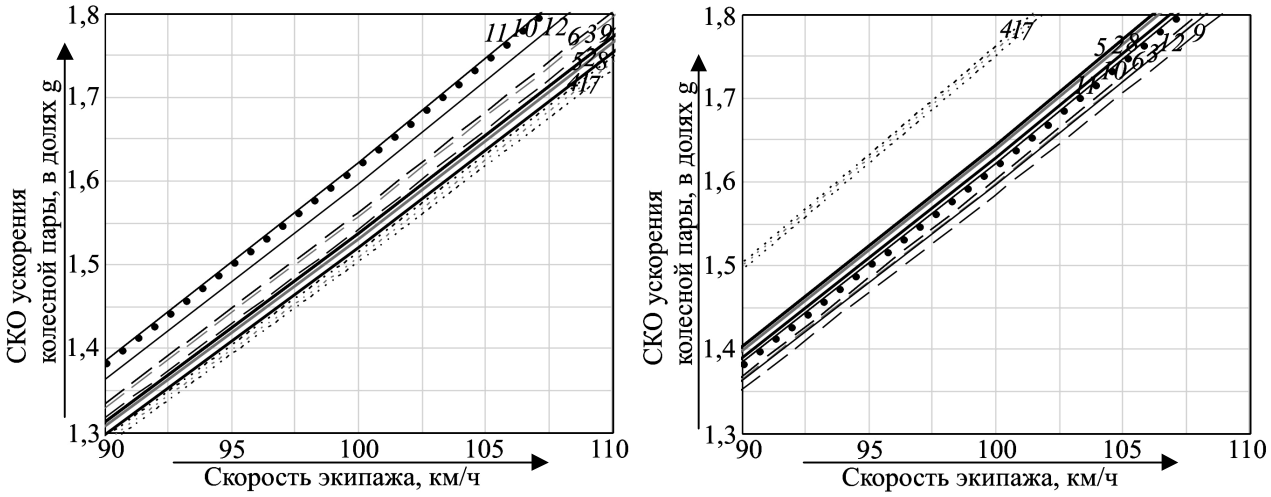



Рисунок 4 – Зависимость СКО вертикального ускорения колесной пары от скорости экипажа при интегрировании до 31400 рад/с (а) и до 157000 рад/с (б)

Рассмотрим рисунок 5, на котором изображена зависимость среднеквадратического отклонения ускорения колебаний колесной пары от массы листовой рессоры. Здесь приведены две серии графиков для разных верхних пределов интегрирования: 1 – 3 – при интегрировании до 31400 рад/с и 4 – 6 – до 157000 рад/с. Особым образом (точечной линией) представлена кривая 7, соответствующая случаю нулевой массы пути. Эти графики делают очевидным тот факт, что среднеквадратическое отклонение почти не зависит от массы листовой рессоры, тем не менее такая зависимость имеет неярко выраженный максимум, приходящийся как раз приблизительно на величину, равную трети этой массы. Другой заметной особенностью является отличие в поведении кривых из разных серий при изменении массы пути. Так, при использовании в расчетах меньшего предела интегрирования с увеличением «приведенной» массы пути линии среднеквадратическое отклонение уменьшается, а что касается большего – наоборот, причем линия для массы пути 0,03 тс·с$^2$/м расположена, тем не менее, ниже соответствующей нулевой. Более наглядно это можно объяснить, построив зависимость среднеквадратического отклонения именно от «приведенной» массы пути, изображенной на рисунке 6. В этом случае видно, что независимо от массы листовой рессоры, которая, как было отмечено, существенного влияния не оказывает, кривые первой серии (1 – 3) оказываются монотонно убывающими функциями. Кривые второй серии (4 – 6) начинаются в той же точке, что и соответствующие кривые, относящиеся к первой серии, и также убывают, хоть и в меньшей степени, до некоторого значения массы пути, а затем начинают резко возрастать, причем на интервале реальных значений массы пути зависимость является строго возрастающей. Это связано с тем, что масса пути входит в коэффициент при старшей степени в числителе передаточной функции в качестве множителя и при уменьшении до нуля понижает порядок полинома числителя. В противном случае порядок числителя и знаменателя становится одинаковым и условие сходимости интеграла (6) перестает выполняться, чем и объясняется резкое возрастание среднеквадратического отклонения с увеличением массы

пути. Такое поведение присуще второй серии, поскольку, как видно из рисунка 6, при интегрировании до более высоких частот гораздо заметнее проявляются высокочастотные свойства амплитудной частотной характеристики, которая не сходится к нулю.

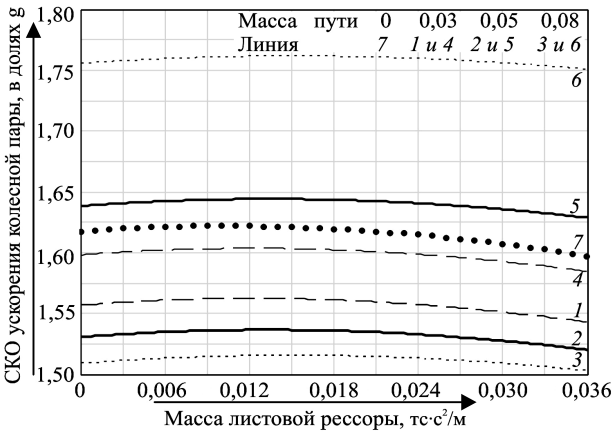



Рисунок 5 – Зависимость СКО ускорения колебаний колесной пары от массы листовой рессоры

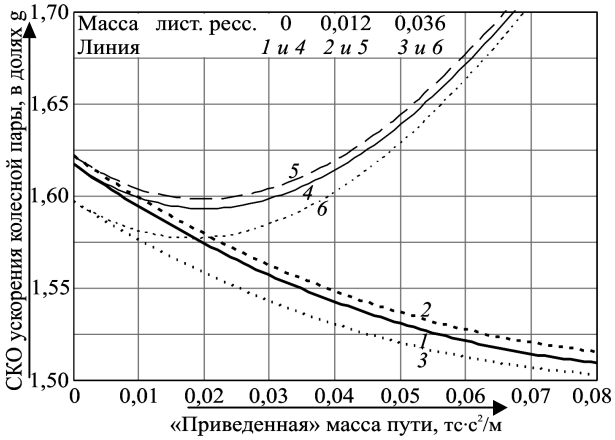



Рисунок 6 – Зависимость СКО ускорения колебаний колесной пары от «приведенной» массы пути

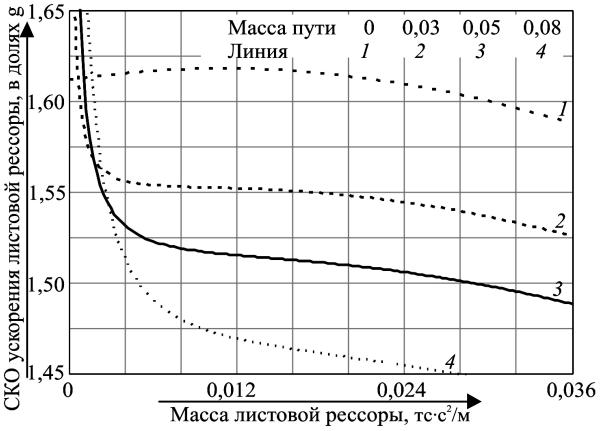



Рисунок 7 – Зависимость СКО ускорения колебаний листовой рессоры от ее массы

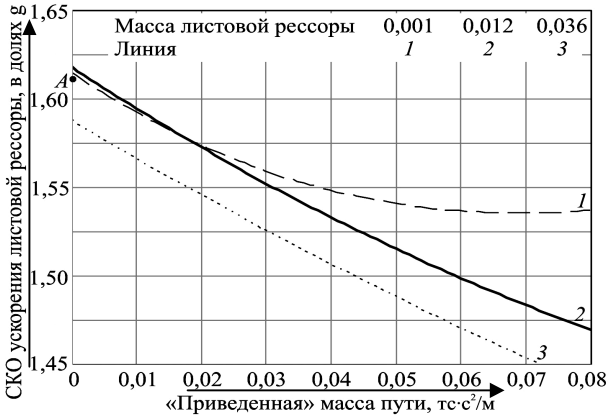



Рисунок 8 – Зависимость СКО ускорения колебаний листовой рессоры от «приведенной» массы пути

Приведем такие же зависимости для среднеквадратического отклонения ускорения колебаний листовой рессоры. Анализируя графики на рисунке 7, можно сделать вывод о том, что и для листовой рессоры параметры колебательных процессов зависят от ее массы несущественно. Другими словами, это явно свидетельствует о возможности пренебречь этим параметром в расчетах колебаний как листовой рессоры, так и колесной пары. Единственное отличие от рисунка 5 заключается в том, что при устремлении массы листовой рессоры к нулю в случае учета в расчетах массы пути линии 2 – 4 уходят в бесконечность. Это снова связано с особенностями модели, так как зануление этой массы понижает порядок знаменателя, что делает выполнение условия сходимости интеграла (6) невозможным кроме случая одновременно пренебрежения и массой пути. Если же использовать описание геометрической неровности с ограничением в высокочастотной области, что фактически выразится в увеличении порядка полинома знаменателя подынтегрального выражения, то три кривые, соответствующие ненулевой массе пути, будут аналогичными самой верхней (кривая 1). В целом графики отражают явление снижения среднеквадратического отклонения с увеличением «приведенной» массы пути. Такой же вывод следует из рисунка 8, на котором представлена его

зависимость уже от массы пути. Здесь опять же присутствует недостаток используемой модели: невозможность рассчитать среднеквадратическое отклонение в случае задания нулевой массы листовой рессоры, кроме единственной точки А, когда масса пути также равна нулю. Для сравнения приведена кривая 1, построенная при очень малом значении массы листовой рессоры (0,001 тс·с$^2$/м), которая, очевидно, с увеличением «приведенной» массы пути начинает возрастать. Для остальных значений этого параметра в интервале его реальных значений функциональные зависимости носят незначительно убывающий характер. Для рассмотренных значений массы пути (соответствующих реальным величинам) уменьшение среднеквадратического отклонения составляет не более 10 %.

Обратимся к рисунку 9, на котором представлены зависимости среднеквадратических отклонений вертикальных ускорений от скорости. Две из них является приближенными, так как построены с допущением о возможности пренебрежения «приведенной» массой пути и листовой рессоры. Другая пара зависимостей рассчитана с учетом этих масс и принята как точная, при этом были взяты некоторые средние параметры (масса пути – 0,05 тс·с$^2$/м, листовой рессоры – 0,012 тс·с$^2$/м). Для модели динамики колесной пары расчет проводился с интегрированием по формуле (6) до частоты, кратной резонансной сто раз (31400 рад/с). Как видно из графиков, приведенных на рисунке 9, разница между приближенной зависимостью и точной не превышает 5 % для листовой рессоры и 7 – для колесной пары.

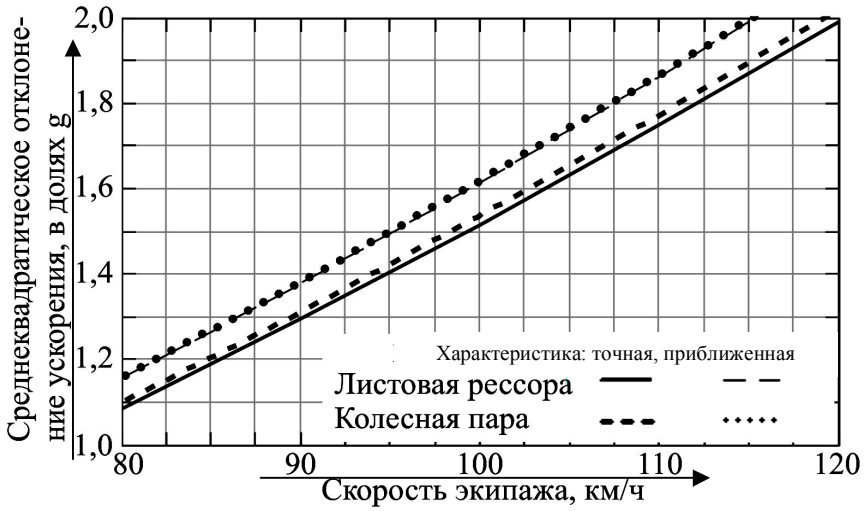



Рисунок 9 – Точные и приближенные зависимости СКО листовой рессоры и колесной пары от скорости экипажа

Таким образом, выполненный анализ дает основания для следующих выводов.

1. Масса упругих элементов с диссипацией энергии в буксовой ступени подвешивания экипажа почти не влияет на характеристики колебаний необрессоренных масс подвижного состава, ее значение можно задавать равным нулю.

2. При варьировании «приведенной» массы пути наибольшее значение среднеквадратического отклонения получается в случае пренебрежения ею, а при ее увеличении в пределах реальной величины оно уменьшается не более чем на 10 %.

3. Наибольшее влияние на среднеквадратическое ускорение оказывает изменение массы пути, пренебрежение обеими массами приводит к увеличению расчетных ускорений не более чем на 7 % по сравнению с точными значениями.

Значения приближенных характеристик оказываются выше, чем точных, тем не менее это является положительным результатом. Это означает, что в случае, если рассчитанные по приближенной модели значения будут меньше критических, допустимых по условиям эксплуатации подвижного состава, то реальные значения будут еще в большей степени удовле-

творять заданным требованиям. В заключение следует добавить, что эти же выводы справедливы и для сил, возникающих в пути и экипажной части подвижного состава при их взаимодействии. В частности, изменения происходят в оцениваемых значениях сил инерции, поскольку они непосредственно связаны с ускорениями движущихся элементов. Однако в целом разница также оказывается несущественной. Силы инерции, в свою очередь, входят, например, в виде составляющих таких величин, как давление колеса на рельс или, соответственно, реакция рельсового пути. Таким образом, существует возможность оценивать эти важные силовые характеристики в системе «экипаж – путь» по приближенной математической модели, пренебрегая достаточно малыми массами ее элементов. Приведенный материал и сделанные выводы имеют большое значение в связи с внедрением и на железных дорогах России высокоскоростных поездов и оценки безопасности условий их движения.

*Список литературы*

1. Галиев, И. И. Метод разделения движения в задачах транспортной механики [Текст] / И. И. Галиев, В. А. Нехаев, В. В. Марковиченко // Исследование динамики транспортных и строительных конструкций: Межвуз. сб. науч. тр. / МИИТ. – М., 1989. – Вып. 817. – С. 4 – 10.

2. Цзе, Ф. С. Механические колебания [Текст] / Ф. С. Цзе, И. Е. Морзе, Р. Т. Хинкл. – М.: Машиностроение, 1966. – 508 с.

3. Вибрации в технике: Справочник: В 6 т. Т. 3. Колебания машин, конструкций и их элементов [Текст] / Под ред. Ф. М. Дементберга и К. С. Колесникова. – М.: Машиностроение, 1980. – 544 с.

4. Нехаев, В. А. Динамика необрессоренных масс электровоза ВЛ10 [Текст] / В. А. Нехаев, В. А. Николаев, А. Н. Смалев // Транспорт Урала. 2010. – № 25. – С. 65 – 68.

5. Лившиц, Н. А. Вероятностный анализ систем автоматического управления: В 2 т. Т. 1. Вероятностные и статистические характеристики воздействий и процессов. Линейные стационарные и нестационарные системы [Текст] / Н. А. Лившиц, В. Н. Пугачев. – М.: Советское радио, 1963. – 896 с.

6. Ушкалов, В. Ф. Статистическая динамика рельсовых экипажей [Текст] / В. Ф. Ушкалов, Л. М. Резников, С. Ф. Редько. – Киев: Наукова думка, 1982. – 360 с.

---

УДК 621.332

А. Н. Смердин, А. С. Голубков, В. А. Жданов

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКЕ НА ОСНОВЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ

*В статье рассмотрены перспективные методы расчета взаимодействия контактных подвесок и токоприемников на основе конечно-элементных моделей, предназначенных для исследования волновых процессов при токосъеме.*

Повышение скоростей движения пассажирских и грузовых поездов на перспективных направлениях российских железных дорог является одним из приоритетных направлений развития ОАО «РЖД». Одним из первых участков, на котором открыто движение пассажирских поездов со скоростями свыше 200 км/ч, стала линия «Москва − Санкт-Петербург» Октябрьской железной дороги.

Необходимым условием для скоростного движения является обеспечение удовлетворительного качества токосъема при низких эксплуатационных расходах и высокой надежности токосъемных устройств.

Для выбора наилучшего варианта из существующих сочетаний контактных подвесок и токоприемников для применения на скоростной магистрали необходимо проводить сравнительные линейные испытания.

Проведение испытаний связано со значительными расходами, с необходимостью прекращения движения поездов во время экспериментальных поездок, со сложными организационными и техническими мероприятиями. Как правило, при проведении линейных испытаний количество экспериментальных поездок бывает достаточным только для качественной оценки характеристик тех или иных систем токосъема. Невозможно получить сведения об эксплуатационных характеристиках, таких как интенсивность износа контактных проводов, надежность токосъемных устройств, влияние разрегулировок контактной подвески и токоприемника на показатели качества токосъема.

С учетом перечисленных особенностей линейных испытаний понятно, что весьма актуальной становится разработка математических способов получения динамических характеристик контактных подвесок с целью выбора наиболее рациональных конструкций и подбора оптимальных параметров.

Движение токоприемника по контактной подвеске со скоростями свыше 200 км/ч связано с возникновением сложных волновых эффектов, оказывающих заметное влияние на динамику токосъема. При создании математической модели взаимодействия токоприемника с контактной подвеской на высоких скоростях движения необходимо детально исследовать волновые процессы, протекающие в контактной подвеске.

Расчет динамики взаимодействия контактной подвески с токоприемником с учетом волновых процессов целесообразно осуществлять на основе моделей с распределенными параметрами. В России и других странах долгое время ведутся работы по созданию таких моделей. Наиболее известной в России является модель, разработанная в Уральском государственном университете путей сообщения (УрГУПСе) специалистами кафедры «Электроснабжение транспорта» [1]. Основными особенностями данной модели являются следующие:

представление контактного и несущего проводов в виде сосредоточенных масс, связанных между собой нерастяжимыми связями;

представление струн в виде невесомых упругих элементов;

моделирование нагрузки от токоприемника как силы, пропорционально распределенной между двумя соседними массами контактного провода;

отсутствие изгибной жесткости контактных проводов.

Однако для выполнения исследования новых конструкций контактных подвесок с возможностью варьирования различных параметров необходимо использовать более точную модель с меньшим количеством допущений.

Зарубежный опыт составления моделей контактной подвески показывает, что наиболее адекватным является представление проводов и тросов в виде системы связанных жестких стержней, причем в местах соединения необходимо учитывать изгибную жесткость материала. Такая конфигурация позволяет обеспечить наиболее адекватное представление физических свойств проводов и тросов (рисунок 1).

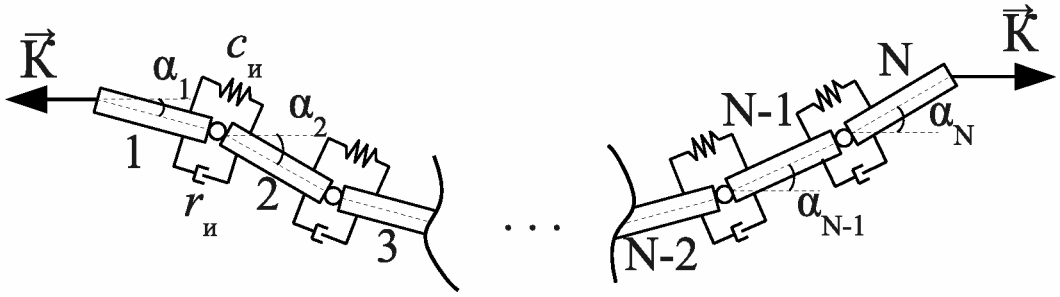



Рисунок 1 − Конечно-элементная модель провода

В основе модели с распределенными параметрами лежит система уравнений, описывающая состояние отдельного элемента. В ходе итерационного вычислительного процесса совместно решаются уравнения для каждого элемента модели на текущем шаге. Результаты вычисления являются исходными данными для следующего шага моделирования.

При моделировании провода в виде сосредоточенных масс состояние отдельного элемента характеризуется его координатами $x_i$, $y_i$ и скоростями $\dot{x}_i, \dot{y}_i$. При использовании стержня в качестве элемента модели его состояние будет описываться не только свойствами материальной точки, но и углом ориентации в пространстве относительно оси $OY$ $\alpha_i$ и угловой скоростью $\omega_i$.

Для учета волновых эффектов в контактной подвеске в модели необходимо реализовать изгибную жесткость проводов, заменив непрерывные свойства материала дискретными упругими элементами (см. рисунок 1), расположенными в местах соединения стержней. В каждом соединении располагаются два взаимно перпендикулярных упругих элемента, обеспечивающих равномерность изгибных свойств провода во всех плоскостях. На рисунке 2 приведена схема сил, действующих на фрагмент модели провода в проекции на плоскость $XOY$. На элемент действуют сила тяжести ($m_i g$), силы натяжения ($K_{i-1}$, $K_{i+1}$), силы, вызванные упругими свойствами провода ($F_{и\,i-1}$, $F_{и\,i+1}$), силы внутреннего сухого трения в проводе ($W_{i-1}$, $W_{i+1}$) и сила внешнего воздействия от токоприемника ($P$).

Система уравнений, описывающих силы и моменты, действующие на единичный элемент модели, имеет вид:

$$\begin{cases} K_{i-1}\cos\alpha_{i-1} + K_{i+1}\cos\alpha_{i+1} - (F_{иi+1} - W_{i-1}\mathrm{th}(\alpha_i - \alpha_{i-1}))\cos\alpha_{i-1} + \\ +(F_{иi+1} - W_{i+1}\mathrm{th}(\alpha_i - \alpha_{i+1}))\cos\alpha_{i+1} = m_i\ddot{x}_i; \\ K_{i-1}\sin\alpha_{i-1} + K_{i+1}\sin\alpha_{i+1} - (F_{иi-1} - W_{i-1}\mathrm{th}(\alpha_i - \alpha_{i-1}))\sin\alpha_{i-1} + \\ +(F_{иi+1} - W_{i+1}\mathrm{th}(\alpha_i - \alpha_{i+1}))\sin\alpha_{i+1} + m_i g + P = m_i\ddot{y}_i; \\ M_{Ki-1} + M_{Ki+1} + M_{иi-1} - M_{Wi-1} + M_{иi+1} - M_{Wi+1} + M_P = J\alpha_i, \end{cases} \quad (1)$$

где $M_{K\,i-1}$, $M_{K\,i+1}$, $M_{и\,i-1}$, $M_{и\,i+1}$, $M_{W\,i-1}$, $M_{W\,i+1}$, $M_P$ − моменты сил натяжения и упругости провода, внутреннего трения проводов и силы воздействия от токоприемника, Н·м.

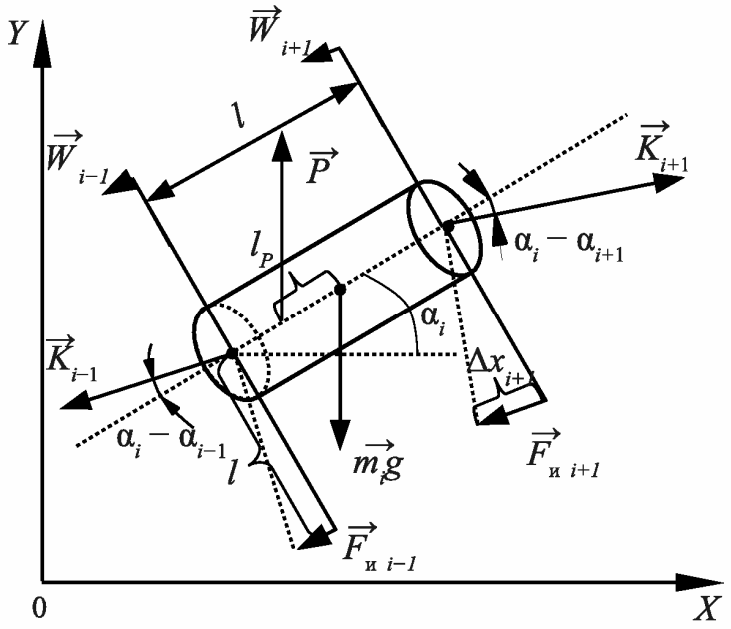



Рисунок 2 − Силы, действующие на элемент модели

Для определения знака действия силы внутреннего сухого трения и предотвращения скачкообразного изменения направления действия используется функция гиперболического тангенса от разности угловых скоростей смежных элементов модели.

Величина сил, имитирующих изгибную жесткость ($F_и$ ) и внутреннее сухое трение ($W$) проводов, определяется взаимным расположением смежных элементов модели. Поскольку угол между смежными элементами имеет малые значения, плечо действия этих сил можно принять равным длине элемента модели $l$. Величина удлинения упругих элементов, имитирующих изгибную жесткость, определяется по формулам:

$$\Delta x_{i-1} = 2l \sin \frac{\alpha_i - \alpha_{i-1}}{2}; \tag{2}$$

$$\Delta x_{i+1} = 2l \sin \frac{\alpha_i - \alpha_{i+1}}{2}. \tag{3}$$

Моменты сил, действующих на элемент модели относительно центра масс, можно вычислить по уравнениям системы:

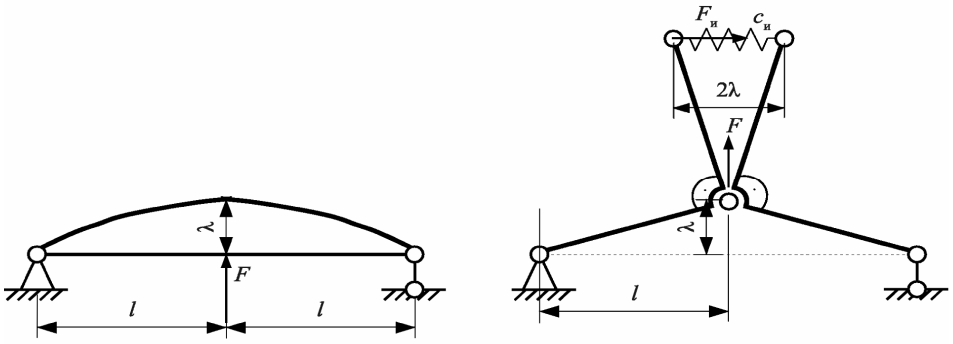
$$\begin{cases} M_{Ki-1} = K_{i-1} \dfrac{l}{2} \sin(\alpha_i - \alpha_{i-1}); \\ M_{Ki+1} = K_{i+1} \dfrac{l}{2} \sin(\alpha_i - \alpha_{i+1}); \\ M_{иi-1} = c_и l \Delta x_{i-1}; \\ M_{иi+1} = c_и l \Delta x_{i+1}; \\ M_{Wi-1} = W_{i-1} \text{th}(\alpha_i - \alpha_{i-1}) l; \\ M_{Wi+1} = W_{i+1} \text{th}(\alpha_i - \alpha_{i+1}) l; \\ M_P = P l_p \cos \alpha_i, \end{cases} \tag{4}$$

где $c_и$ − жесткость упругого элемента, моделирующего изгибную жесткость, Н/м;

$l_Р$ − расстояние между точкой приложения внешней силы и центром масс, м.

Параметры упругих элементов, моделирующих изгибную жесткость, определяются в зависимости от физических свойств материала провода и длины дискретного элемента модели.

При небольших значениях деформации изгиб балки под действием силы может быть представлен в виде соответствующей модели поворота недеформируемых стержней, связанных шарниром в точке приложения силы и снабженных упругим элементом (рисунок 3).




а б

Рисунок 3 − Моделирование изгиба балки: а − схема изгиба балки;
б − эквивалентная схема поворота недеформируемых стержней

Стрела прогиба балки определяется по уравнению:

$$\lambda = \frac{Fl_{б}^{3}}{48EI}, \quad (5)$$

где $F$ – сила, прикладываемая к балке или стержню, Н;

$E$ – модуль упругости балки, Па;

$I$ – момент инерции поперечного сечения балки, м$^4$;

$l_б$ – длина балки, м.

Длина рассматриваемой балки равна удвоенной длине элемента модели провода, следовательно,

$$\lambda = \frac{Fl^{3}}{6EI}, \quad (6)$$

где $l$ – длина элемента модели, м.

Уравнение моментов, действующих на стержень относительно шарнира, имеет вид:

$$M_F - M_{и} = 0, \quad (7)$$

где $M_F$ – момент действия внешней силы, Н·м;

$M_и$ – момент силы упругости $F_и$, Н·м.

Принимая во внимание малую величину отклонения стержня, можно приближенно считать длину плеч действия сил равной $l$, в этом случае справедливо равенство:

$$Fl = F_{и}l, \quad (8)$$

и следовательно,

$$F = F_{и} = 2\lambda c_{и}. \quad (9)$$

Подставив выражение для расчета силы из уравнения (9) в (6), получим формулу для расчета жесткости упругого элемента:

$$c_{и} = \frac{3EI}{l^{3}}. \quad (10)$$

Приняв допущение, что провод имеет круглое сечение радиусом $R$, можно упростить формулу (10). Момент инерции круглого сечения радиусом $R$ определяется по выражению:

$$I = \frac{R^{4}}{4}. \quad (11)$$

В итоге получим формулу для вычисления жесткости упругого элемента при моделировании изгибной жесткости провода:

$$c_{и} = \frac{3E\ R^{4}}{4l^{3}}. \quad (12)$$

Таким образом, при известных модуле упругости материала $E$ и моменте инерции сечения провода $I$, можно определить необходимые параметры для моделирования динамики провода с учетом изгибной жесткости при любой длине элемента модели $l$. При этом необходимо учитывать, что данные расчеты справедливы для малых величин изгиба. Деформации кручения провода не рассматриваются, поскольку в процессе колебаний проводов контактной подвески данный вид деформаций практически отсутствует.

Одной из важнейших задач при моделировании сложной механической системы является реализация корректных и эффективных алгоритмов расчета на целевой вычислительной машине. При составлении программы расчета необходимо обеспечить возможность интерак-

тивного изменения моделируемой системы и оперативного получения сведений о ходе вычислений.

Для реализации описанной модели на кафедре «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПСа разрабатывается специализированный программный комплекс.

При написании программы моделирования взаимодействия контактной подвески и токоприемника целесообразно использовать готовые библиотеки для выполнения низкоуровневых расчетов. В настоящее время существует большое количество библиотек, предназначенных для моделирования динамики механических систем, некоторые из них распространяются на основе лицензии свободного программного обеспечения GPL. Для использования в программном комплексе была выбрана библиотека *DynaMo* [2]. Эта библиотека характеризуется простой архитектурой, хорошим качеством оптимизации алгоритмов и высокой точностью расчетов. В качестве систем пользовательского интерфейса и трехмерной визуализации были использованы свободно распространяемые открытые библиотеки *Qt* и *OpenGL*. На основе этих компонентов была создана гибкая, эффективная, масштабируемая система моделирования динамики контактной подвески (рисунок 4).

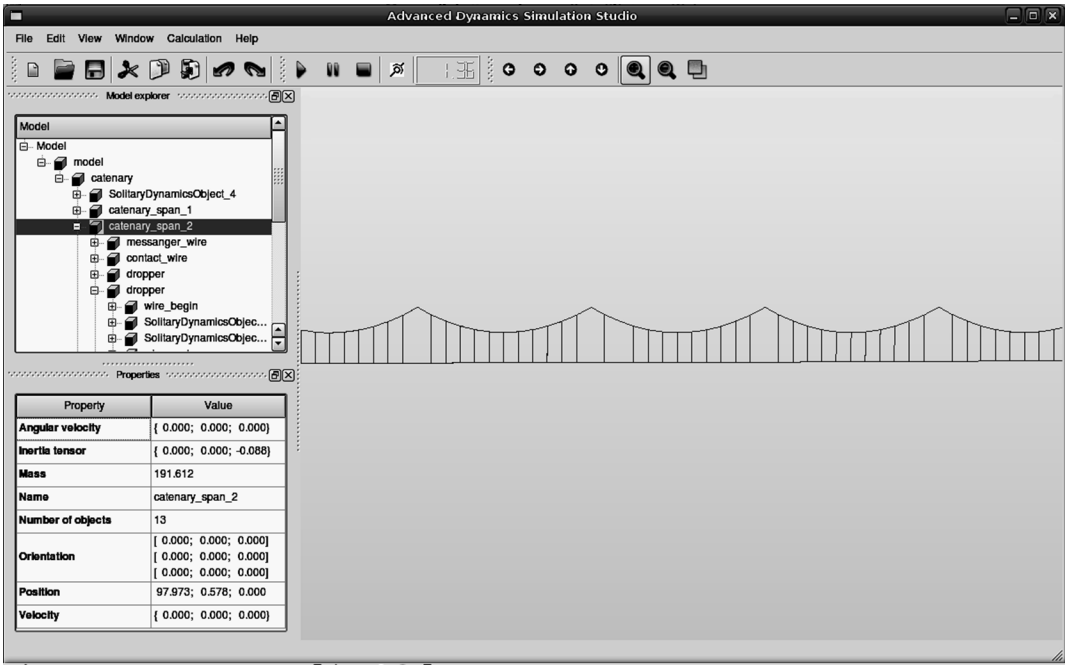



Рисунок 4 − Программа исследования динамики волновых процессов, протекающих в контактной подвеске при токосъеме

Программа позволяет создавать различные конструкции контактных подвесок, задавать состав проводов, длину струн и рессорных тросов, изменять натяжение, величину зигзага контактных проводов и другие параметры. Модель может состоять из произвольного количества пролетов.

Модель подвески составлена по техническим требованиям проекта КС-200. Были созданы модели анкерных участков рессорной и безрессорной подвески. Для верификации модели использовались результаты сравнительных испытаний контактной подвески в 2005 − 2007 гг. на перегоне «Лихославль − Калашниково» Октябрьской железной дороги.

Верификация производилась по основным статическим и динамическим параметрам контактной подвески. Сравнивались стрелы провеса контактного провода и несущего троса, эластичность, собственная частота колебаний контактной подвески, коэффициенты затухания и отражения поперечных волн, величины отжатия при проходе токоприемников и амплитуды колебаний контактных проводов.

Измерение эластичности моделируемой подвески проходит аналогично реальным измерениям при помощи вагона-лаборатории для испытаний контактной сети (ВИКСа): точка приложения постоянной вертикальной силы перемещается по контактному проводу, при этом ведется запись высотного положения контактного провода в месте приложения силы. Вычислительный эксперимент повторяется несколько раз при различных значениях действующей силы. По кривым высотного положения контактного провода определяется эластичность подвески.

Кривые эластичности пролета безрессорной контактной подвески по данным моделирования и экспериментальных измерений приведены на рисунке 5.

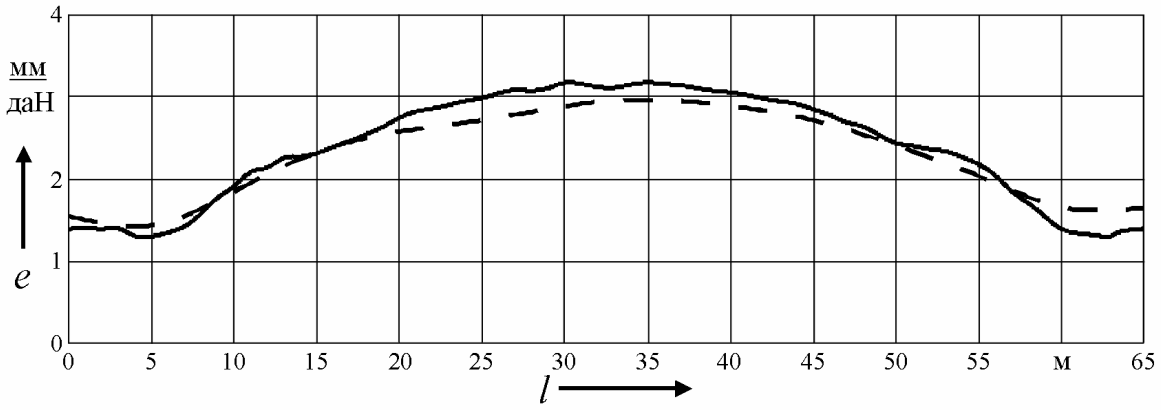



Рисунок 5 − Эластичность пролета безрессорной контактной подвески:
— − результаты моделирования; - - - − экспериментальные измерения

После проведения всех этапов верификации выполняется ряд экспериментов по исследованию поведения контактной подвески при взаимодействии с одним или несколькими токоприемниками при различных скоростях движения ЭПС. В этих экспериментах выполняется регистрация силы контактного нажатия, траектории токоприемника, случаев отрыва полоза токоприемника от контактного провода и колебаний контактных проводов в характерных точках.

Оценить достоверность расчетов волновых процессов в контактной подвеске можно, сравнив графики кривых колебаний контактного провода при прохождении токоприемника в характерных точках (подопорный узел, ¼ и середина пролета).

По графикам на рисунке 5 можно определить величину отжатия контактного провода при проходе токоприемника, частоту колебаний, декремент затухания и наличие отраженных волн. На рисунке 6 приведена запись колебаний контактных проводов при проходе токоприемника в подопорной зоне по результатам вычислений и экспериментальных измерений.

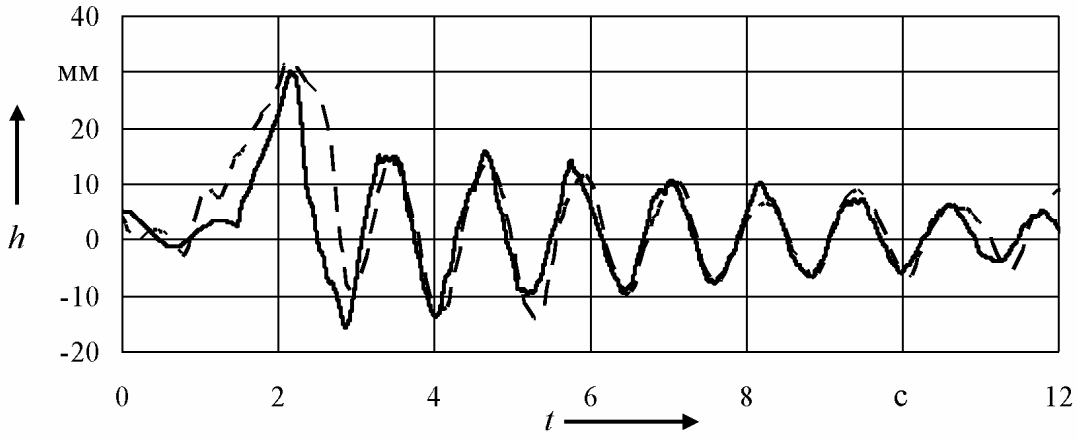



Рисунок 6 − Графики колебаний контактного провода в подопорном узле:
— − результаты моделирования; - - - − экспериментальные измерения

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных позволяет сделать вывод об адекватности разработанной модели. Введение в расчетную схему изгибной жесткости контактных проводов и применение конечных элементов в виде недеформируемых связанных стержней позволило повысить точность вычислений при исследовании динамики волновых процессов в контактной подвеске при токосъеме.

*Список литературы*

1. Применение конечно-элементных моделей взаимодействия контактной сети и токоприемников с целью оптимизации их параметров / А. В. Ефимов, А. Г. Галкин и др. // Математическое моделирование в механике сплошных сред на основе методов граничных и конечных элементов // Тезисы докл. междунар. конф. BEM&FEM-99 XVII / – СПбГУ. СПб, 2000. – С. 72, 73.

2. Barenburg, B. G. Designing a Class Libraryfor Interactive Simulation of Rigid Body Dynamics [Текст] / B. G. Barenburg / Eindhoven University of Techmology. – Eindhoven, 2000. – 143 p.

---

УДК 621.336.7

С. А. Ступаков, В. М. Филиппов

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОКОВОЙ НАГРУЗКИ НА ИЗНОС КОНТАКТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТОКОПРИЕМНИКА ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

*В статье представлены результаты экспериментальных исследований износа контактных вставок для токоприемников высокоскоростного электрического транспорта.*

Решение проблемы надежной и экономичной передачи электроэнергии подвижному составу является актуальной задачей, которая обусловлена необходимостью экономии как электроэнергии, так и ресурсов, в частности, элементов контактной пары устройств токосъема. Проблема надежности и экономичности токосъема особенно актуальна в настоящее время в условиях создания в России высокоскоростного электрического транспорта. В свете этой проблемы при разработке новых или совершенствовании существующих устройств токосъема наряду с требованиями надежности и экономичности к ним предъявляется требование увеличения срока их службы. Увеличение срока службы элементов устройств токосъема может быть обеспечено различными способами, в том числе путем выбора таких материалов контактной пары, которые наиболее полно отвечают требованиям качества токосъема [1].

Коллектив кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» (ЭЖТ) ОмГУПСа с 1977 г. принимает участие во всех отечественных программах, связанных с теоретическими и экспериментальными исследованиями по совершенствованию и разработке новых вариантов токоприемников. В настоящее время коллектив кафедры принимает участие в выполнении комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства с участием российского высшего учебного заведения по теме «Разработка и организация высокотехнологичного производства нового магистрального токоприемника для применения на линиях с модернизированной инфраструктурой системы токосъема» (договор от 7 сентября 2010 г. № 13.G25.31.0034). Токоприемник предназначен для использования на электроподвижном составе постоянного и переменного тока и должен обеспечивать передачу тока до 2000 А при движении со скоростью 160 км/ч.

Полоз токоприемника оснащается контактными вставками, материал которых должен обеспечивать пропускание необходимого для подвижного состава тока и отвечать требова-

ниям к сроку службы для этих элементов. Для полозов токоприемников могут быть использованы контактные вставки угольные (ТУ 1916-020-27208846-99) или металлокерамические (ТУ 32 ЦТ 2041-97), причем металлокерамические – на медной или железной основе. В соответствии с планом-графиком договора предусмотрены следующие исследования контактных вставок токоприемника (рисунок 1): механические исследования материалов (трибосовместимость, задиростойкость и износостойкость), исследования износа от плотности тягового тока, исследования износа от температуры, исследования износа от контактного давления.

Результаты исследований физико-механических характеристик исследуемых материалов приведены в таблице.

Методика исследований износа материалов контактных вставок реализована на кольцевой установке горизонтального типа (рисунок 2), входящей в состав экспериментального комплекса лаборатории кафедры ЭЖТ. С целью исследования влияния абразивного потока на износ контактных вставок указанная установка использовалась совместно с аэродинамической.

Результаты исследований износа контактных вставок от нагрузки и от плотности тягового тока приведены на рисунках 3 – 8.




Рисунок 1 – Виды испытаний контактных вставок токоприемника

Физико-механические параметры исследуемых контактных материалов

| Материал | Параметр | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | сопротивление, Ом | удельное сопротивление, Ом·мм$^2$/м | твердость по Бриннеллю | плотность, г/см$^3$ | водопоглощение, % | удельная теплоемкость, Дж/кг·К |
| Угольные вставки | 1,15 | 27,633 | 86,81 | 1,749 | 0,992 | 720 |
| Металлокерамические вставки на медной основе | 1,1 | 26,432 | 121,23 | 9,508 | 0,076 | 385 |
| Металлокерамические вставки на железной основе | 1,2 | 28,834 | 129,04 | 8,627 | 0,091 | 444 |
| Контактный провод БрМг0,25Ф | 1,52 | 22,000 | 102,56 | 8,143 | 0,082 | 390 |

Кольцевая установка содержит раму 1 с установленным на ней кольцевым токопроводом 2, с возможностью вращения в горизонтальной плоскости со скоростью $v_{лк}$, управляемый привод 3 вращения и испытуемый токоприемник 4, контактные элементы 5 которого введены в контакт с указанным токопроводом 2. Вентилятор 6 оснащен регулятором скорости $v_в$ воздушного потока 7, датчиком скорости воздушного потока в зоне контакта 8, датчиком линейной скорости кольца 9 и блоком формирования сигнала управления 10, выход которого связан с управляющим входом указанного регулятора 7, а входы – с выходами упомянутых датчиков 8 и 9. Блок 10 выполнен в виде соединенных последовательно элемента сравнения 11 и усилителя мощности 12, причем входы элемента сравнения 11 соединены с выходами датчиков 8 и 9 через делители напряжения 13.

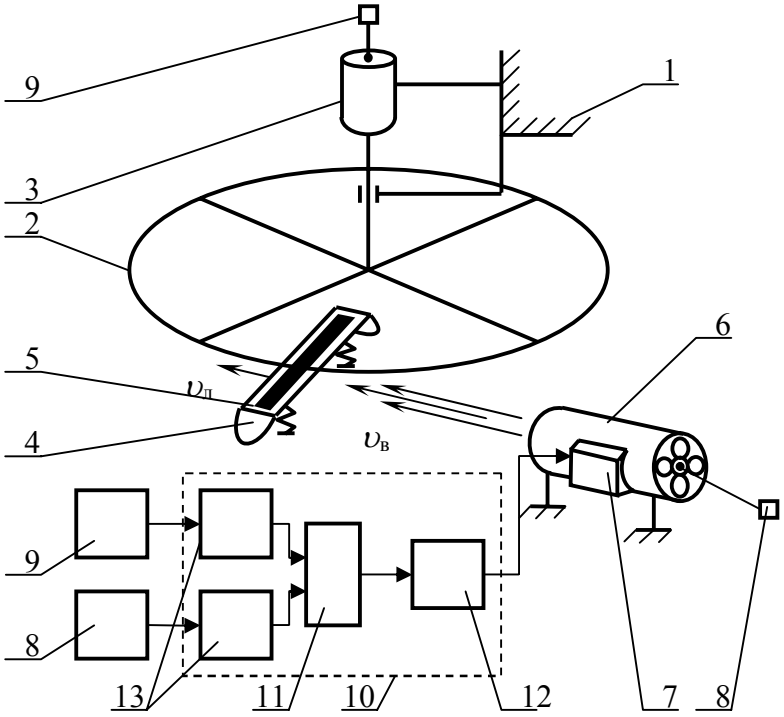



Рисунок 2 – Схема взаимодействия кольцевой и аэродинамической установок

На основе исследования совместимости элементов трибосистемы «контактная вставка – контактный провод» и их износостойкости можно сделать вывод о том, что металлокерамические контактные вставки менее подвержены износу по сравнению с угольными. Результаты исследований износа контактных вставок от нажатия в контакте приведены на рисунке 3.

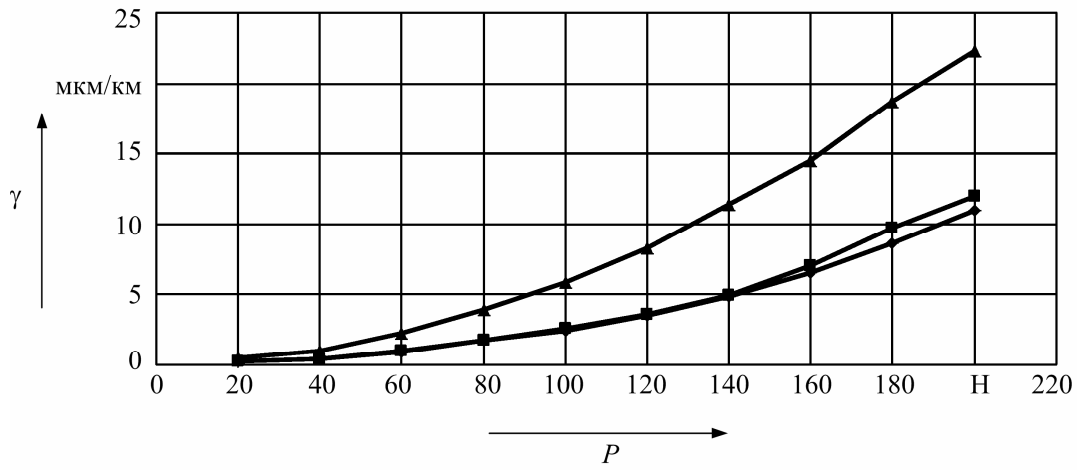



Рисунок 3 – Износ контактных вставок от нажатия в контакте:
– угольных; – металлокерамических на основе железа; – металлокерамических на основе меди

На рисунках 4 – 8 условные обозначения материалов соответствуют обозначениям, принятым на рисунке 3.

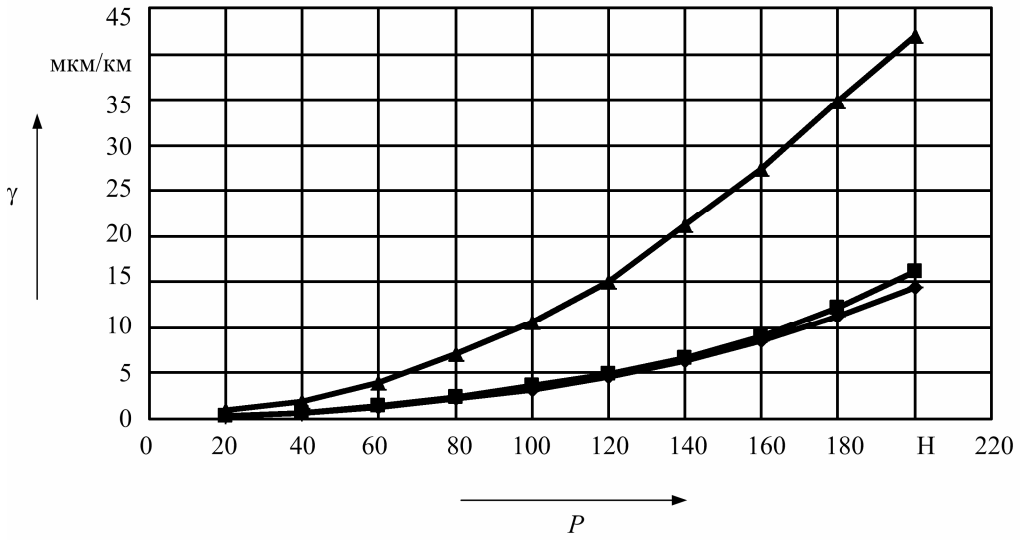



Рисунок 4 – Износ контактных вставок от нажатия при наличии абразива в контакте

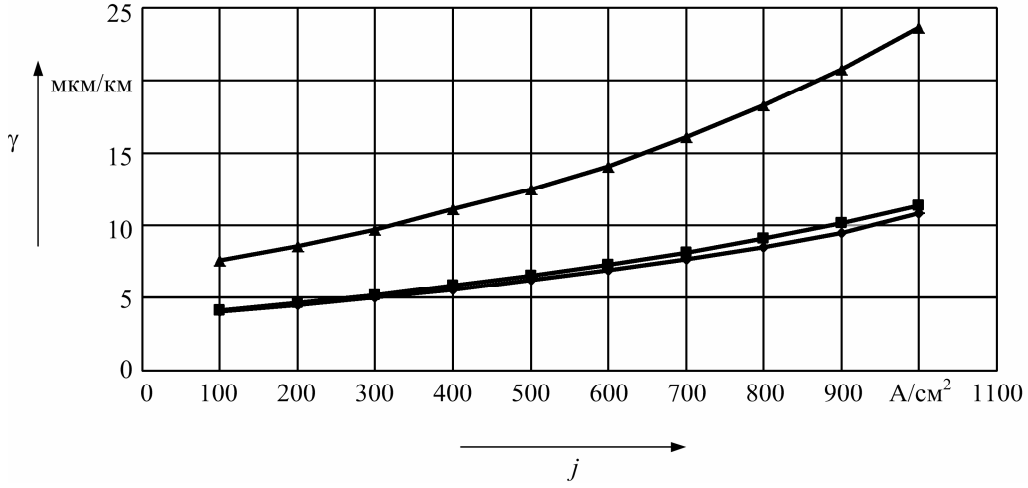



Рисунок 5 – Износ контактных вставок от плотности тягового тока (постоянный ток)

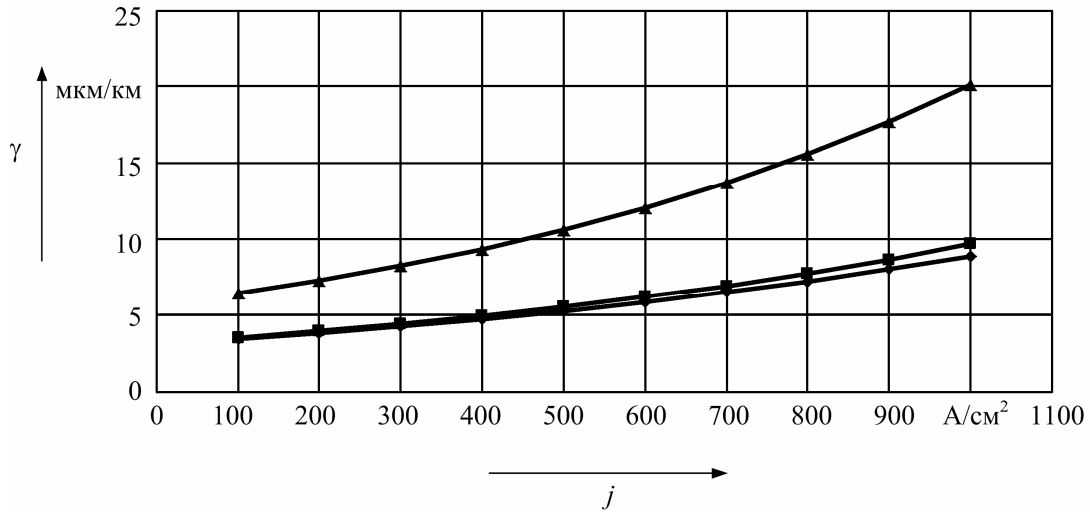



Рисунок 6 – Износ контактных вставок от плотности тягового тока (переменный ток)

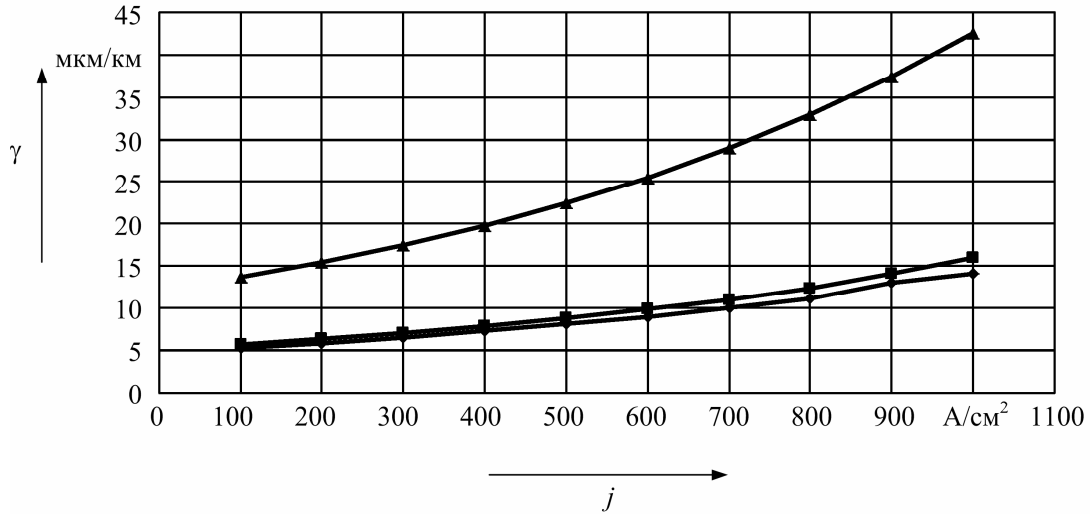



Рисунок 7 – Абразивный износ контактных вставок от плотности тягового тока (постоянный ток)

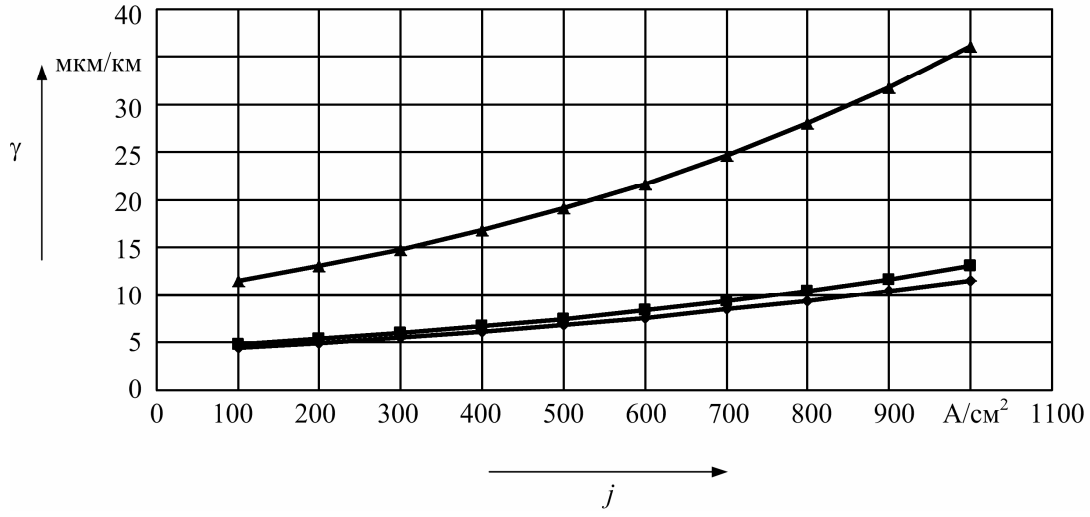



Рисунок 8 – Абразивный износ контактных вставок от плотности тягового тока (переменный ток)

По результатам проведенных испытаний можно сделать следующие выводы:

1. Все исследуемые материалы контактных вставок (углерод, металлокерамика на железной основе и металлокерамика на медной основе) при взаимодействии с бронзовым контактным проводом являются трибосовместимыми.

2. Для всех исследуемых материалов наблюдается увеличение износа с ростом токовой нагрузки в контакте.

3. Более износостойким материалом из исследуемых является металлокерамика на железной основе. Сравнение значений износа при одинаковых значениях плотности тока в контакте позволяет сделать вывод о том, что износ металлокерамических вставок на основе железа 47,2 % ниже, на чем угольных, а износ металлокерамических вставок на основе меди на 41,5 % ниже износа угольных.

4. Привнесение частиц абразива в зону контакта повышает износ контактных вставок на основе углерода в 1,8 раза. Наименее чувствительными к воздействию абразива в контакте являются металлокерамические вставки на железной основе, износ которых увеличился в 1,3 раза. При наличии в контакте тягового тока тенденция увеличения износа для всех материалов сохраняется.

5. Наиболее чувствительным к повышению влажности окружающей среды являются угольные контактные вставки, повышение влажности до 80 % увеличивает их износ в 1,44 раза. Повышение влажности незначительно повышает износ металлокерамических контактных вставок рассматриваемых типов.

6. Характер износа угольных и металлокерамических контактных вставок не изменяется от рода тока (постоянный или переменный ток).

7. Повышение плотности тягового тока до 1000 А/см$^2$ сопровождается увеличением износа угольных вставок в 3,13 раза, металлокерамических на железной основе – в 2,6 раза, металлокерамических на медной основе – в 2,75 раза.

---

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

---

УДК 621.331:621.311

А. А. Хряков, М. М. Никифоров

## СНИЖЕНИЕ КОММЕРЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ТЯГУ ПОЕЗДОВ НА ПОЛИГОНЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

*В статье рассмотрена структура потерь электрической энергии на тягу поездов, представлен новый цифровой электронный счетчик электроэнергии постоянного тока, дана оценка технико-экономической эффективности его внедрения на электроподвижном составе и фидерах контактной сети тяговых подстанций.*

Уровень потребления электрической энергии на тягу поездов на полигоне постоянного тока сети железных дорог в 2010 г. составил 12,24 млрд кВт·ч. При этом небаланс электрической энергии, отпущенной на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций и потребленной по счетчикам электроподвижного состава (далее – небаланс электрической энергии на тягу поездов), на полигоне постоянного тока за указанный период составил 18,6 %. Согласно методике, представленной в работе [1], составляющие технологических потерь электрической энергии на полигоне постоянного тока не превышают 10,4 %, а уровень нерациональ-

ных потерь электрической энергии на тягу поездов на полигоне постоянного тока сети железных дорог (коммерческой составляющей небаланса) в 2010 г. составил 8,2 %, или около 1 млрд кВт·ч.

Основными причинами повышенных значений коммерческой составляющей небаланса электрической энергии на тягу поездов на полигоне постоянного тока являются следующие:

использование на электроподвижном составе счетчиков СКВТ-Д600М класса точности 3,0 и СКВТ-Д621 класса точности 2,5;

отсутствие приборов учета электрической энергии на фидерах контактной сети тяговых подстанций полигона постоянного тока, так как до последнего времени немногочисленные счетчики электрической энергии постоянного тока либо не отвечали требованиям коммерческого учета (ввиду недостаточной точности или отсутствия интерфейсов связи с системами сбора данных), либо отличались высокой стоимостью (приборы зарубежного производства) [2].

В 2010 г. в Омском государственном университете путей сообщения разработан цифровой электронный счетчик для учета электрической энергии на электроподвижном составе постоянного тока [3]. Счетчик обеспечивает учет электрической энергии постоянного тока с точностью 0,5 %, имеет интерфейсы связи для подключения к системам сбора данных. При установке на электроподвижном составе к счетчику подключаются навигационная система GLONASS/GPS, обеспечивающая учет электрической энергии для различных тарифных зон и синхронизацию часов реального времени и средства радиосвязи для передачи показаний счетчиков в систему сбора данных локомотивных депо. Измерительная система счетчика имеет высокое напряжение гальванической изоляции – 15 кВ, что соответствует испытательному напряжению при проведении регламентных работ на тяговой подстанции и электроподвижном составе.

Установка систем учета на основе предлагаемого счетчика электрической энергии обеспечит возможность определения уровня удельного расхода и небаланса электрической энергии на тягу поездов [4]:

– в границах межподстанционных зон;

– в границах участков обслуживания локомотивных бригад;

– на участках заездов локомотивных бригад смежных железных дорог.

Разработанный счетчик может быть установлен также на вводах 3,3 кВ постоянного тока и фидерах контактной сети тяговых подстанций полигона постоянного тока, а имеющиеся интерфейсы и разработанное программное обеспечение позволяют построить на базе данного счетчика автоматизированную систему учета электрической энергии тяговых подстанций постоянного тока, что позволит уточнить структуру небаланса электрической энергии на тягу поездов.

В настоящее время приборы учета электрической энергии на тягу поездов на подстанциях постоянного тока установлены до выпрямительных (выпрямительно-инверторных) преобразователей, а в качестве средств измерения применяются счетчики электрической энергии, трансформаторы тока и напряжения классом точности не ниже 0,5.

Установка приборов учета электрической энергии на вводах 3,3 кВ тяговых подстанций позволит достоверно определять значения технологических потерь в тяговых трансформаторах и выпрямительных (выпрямительно-инверторных) преобразователях, которые по экспертным оценкам составляют 1,5 – 2,0 % [1].

Одной из причин, оказывающих существенное влияние на уровень технологических потерь электрической энергии в тяговой сети, является неравномероность загрузки смежных тяговых подстанций, обусловленная

различием входных сопротивлений в систему внешнего электроснабжения;

различием внешних характеристик выпрямительных преобразователей при различном числе пульсаций;

наличием на смежных тяговых подстанциях присоединений различной мощности;

применением на смежных тяговых подстанциях различающегося по мощности трансформаторного оборудования.

Все перечисленное выше приводит к появлению уравнительных потоков мощности и, как следствие, к дополнительным потерям в тяговой сети постоянного тока.

Проведенные специалистами Омского государственного университета путей сообщения на участке Северной железной дороги Нерехта – Кострома исследования показали, что при существенно неравномерной загрузке подстанций недогруженная тяговая подстанция начинает через соседнюю тяговую подстанцию подпитывать межподстанционную зону, на которой находится тяговая нагрузка. При этом потери в тяговой сети при передаче электрической энергии в несмежную с тяговой подстанцией межподстанционную зону аналогичны потерям при питании тяговой нагрузки на удаленном конце собственной межподстанционной зоны по схеме длинной консоли. В этом случае потери передаваемой электрической энергии увеличиваются на 8 % по сравнению со схемой двухстороннего питания.

Исследование расхода электрической энергии на тягу на уровне депо показало, что объем подпитки межподстанционных зон от недогруженных тяговых подстанций составил 6,4 % от общего расхода электрической энергии на тягу поездов. Технологические потери в контактной сети от неравномерной загрузки подстанций можно оценить как 0,51 % от общего объема потребляемой электрической энергии на тягу поездов на полигоне постоянного тока, или около 62,4 млн кВт·ч в год.

Следует отметить, что на практике невозможно полностью устранить эффект неравномерности загрузки смежных тяговых подстанций, поэтому при определении технико-экономической эффективности выравнивания загрузки смежных тяговых подстанций снижение потерь электрической энергии на тягу поездов можно оценить равным 0,25 % от общего объема потребляемой электрической энергии на тягу поездов на полигоне постоянного тока, или 30,6 млн кВт·ч в год.

После завершения установки на электроподвижном составе постоянного тока сети железных дорог предложенного счетчика электрической энергии и внедрения на тяговых подстанциях полигона постоянного тока сети железных дорог автоматизированных систем учета электрической энергии на вводах 3,3 кВ и фидерах контактной сети ожидается снижение уровня небаланса электрической энергии на тягу поездов на величину коммерческой составляющей.

Следует отметить, что само по себе снижение уровня небаланса электрической энергии на тягу поездов не повлечет за собой автоматического снижения платы за электроэнергию на тягу поездов. Однако составляющая небаланса электрической энергии на тягу поездов, превышающая значение расчетных технологических потерь, расходуется на тягу поездов бесконтрольно, а следовательно, нерационально. Обеспечение контроля использования этого объема электрической энергии позволит, согласно результатам экспериментальных исследований, снизить расход электрической энергии на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций на 20 % от коммерческой составляющей небаланса электрической энергии на тягу поездов, т. е. на 1,64 % от расхода электрической энергии на тягу поездов на полигоне постоянного тока, или 200,8 млн кВт·ч в год.

Таким образом, эффект от внедрения разработанного счетчика электрической энергии на вводах 3,3 кВ, фидерах контактной сети тяговых подстанций и электроподвижного состава постоянного тока включает в себя снижение

расхода электрической энергии на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций за счет обеспечения контроля рациональности использования электрической энергии на 1,64 % от тяги, или на 200,8 млн кВт·ч в год;

технологических потерь электрической энергии в тяговой сети, обусловленных неравномерностью загрузки смежных тяговых подстанций, на 0,25 % от тяги, или на 30,6 млн кВт·ч в год.

Суммарный эффект от внедрения цифрового электронного счетчика постоянного тока на электроподвижном составе и фидерах контактной сети тяговых подстанций полигона постоянного тока составит 231,4 млн кВт·ч, или около 1,9 % от расхода электрической энергии на тягу поездов на полигоне постоянного тока, что при средневзвешенном тарифе на электроэнергию на тягу поездов 1,64 р. за 1 кВт·ч составляет 379,5 млн р.

Кроме того, внедрение указанных систем учета на фидерах контактной сети тяговых подстанций и на электроподвижном составе полигона постоянного тока позволит сформировать базу данных о потреблении и потерях электрической энергии на тягу поездов в границах участков работы локомотивных бригад, а также в границах межподстанционных зон полигона постоянного тока, что позволит

анализировать величину потерь в тяговой сети в зависимости от ограничений скорости и внеграфиковых остановок;

уточнять нормативные значения расхода электрической энергии на тягу и потерь электрической энергии в тяговой сети;

сформировать рекомендации по снижению расхода электрической энергии на тягу поездов и потерь в тяговой сети;

оценить уровень потерь для включения в сетевую составляющую тарифа на электроэнергию, потребляемую электроподвижным составом.

Использование базы данных о потреблении и потерях электрической энергии на тягу поездов в совокупности с информацией об ограничениях скорости движения поездов, предоставлении «окон», участках применения рекуперативного торможения и других факторах, влияющих на организацию движения поездов, позволит разрабатывать адресные меры по улучшению основных показателей эффективности использования электроподвижного состава и по снижению удельного расхода электрической энергии на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций, что в свою очередь приведет к снижению себестоимости перевозочного процесса.

По экспертным оценкам использование указанной базы данных обеспечит снижение удельного расхода электрической энергии на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций на 2 – 2,5 %.

*Список литературы*

1. Методика расчета расхода электрической энергии на тягу поездов в границах железных дорог и участков работы локомотивных бригад (с учетом заездов на соседние железные дороги): Инструктивно-методические указания [Текст]. 2-изд., перераб. / Под ред. В. Т. Черемисина / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2006. – 31 с.

2. Фирсанов, К. А. Счетчики постоянного тока для систем учета электрической энергии на тягу поездов на основе процессоров цифровой обработки сигналов [Текст]. / К. А. Фирсанов, А. А. Хряков // Материалы 62-й науч.-техн. конф. / Сибирская гос. автомобильно-дорожная акад. – Омск, 2008. – Кн. 2. – С. 190 – 196.

3. Пат. 97829 Российская Федерация, МПК[7] G01R11/54. Универсальный электронный счетчик для учета электрической энергии на электроподвижном составе постоянного и переменного тока [Текст] / Черемисин В. Т., Грицутенко С. С., Никифоров М. М., Чижма С. Н., Хряков А. А.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – № 2010118148/10; заявл. 05.05.2010; опубл. 20.09.2010.

4. Хряков А. А. Концепция построения коммерческих систем учета электрической энергии на электроподвижном составе [Текст] / А. А. Хряков // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы IV междунар. науч.-техн. конф. / Томский техн. ун-т. – Томск, 2009. – С. 323 – 326.

УДК 621.311:621.331

С. Н. Бренков

# УПРАВЛЕНИЕ УСТРОЙСТВАМИ ПОПЕРЕЧНОЙ ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ С ЗАВИСИМОЙ ВЫДЕРЖКОЙ ВРЕМЕНИ

*В статье приведен основной принцип расчета выдержки времени на включение и отключение устройства компенсации реактивной мощности при автоматическом регулировании его работы. Выдержка времени является зависимой от потребляемой тяговой нагрузки активной и реактивной мощности.*

Актуальность применения устройств поперечной емкостной компенсации (КУ) на железнодорожном транспорте определяется технико-экономическим обоснованием и является одним из наименее капиталоемких способов усиления системы тягового электроснабжения. В отдельных случаях для обеспечения пропуска поездов конденсаторные установки являются единственно возможным рациональным способом усиления системы тягового электроснабжения. Располагаемая мощность таких установок может доходить до 7000 квар.

Учитывая значительные мощности КУ, а также то, что тяговая нагрузка имеет резкопеременный характер, в процессе работы постоянно включенной установки можно столкнуться с проблемами повышения напряжения в тяговой сети выше максимально допустимых значений, генерации реактивной мощности в систему внешнего электроснабжения, перетоков реактивной мощности по электрическим сетям, которые приводят к увеличению потерь мощности. Следовательно, чтобы обеспечить эффективное использование КУ большой мощности, установки должны быть регулируемыми. Закон управления мощностью должен быть таким, чтобы при эффективном использовании мощности КУ число коммутаций было минимальным.

Существует множество способов управления мощностью КУ – от простых до сложных, требующих применения интеллектуальных систем:

включения-отключения КУ дежурным персоналом или энергодиспетчером в периоды по заданию энергосистемы;

регулирования, выполненного по контролю полного тока, потребляемого тяговой нагрузкой;

с применением регулятора реактивной мощности Б2201;

комбинированного регулирования КУ, предложенного дорожной электротехнической лабораторией Горьковской железной дороги;

схема управления, разработанная проектно-конструкторским бюро Главного управления электрификации и энергетического хозяйства;

схема управления, разработанная Всесоюзным заочным институтом инженеров железнодорожного транспорта.

Однако все указанные способы имеют одно общее свойство, заключающееся в отсутствии или строго фиксированной выдержке времени при включении и отключении КУ, не зависящей от местной и внешней информации.

Дорожной электротехнической лабораторией Западно-Сибирской железной дороги предложен алгоритм с зависимой выдержкой времени. Чем больше отклонение рассматриваемых величин от значения уставки, тем меньше выдержка времени при включении-отключении устройства.

В качестве примера ниже приведен вывод функции зависимости времени от контролируемой величины для случая, когда КУ установлена в отстающей фазе тяговой подстанции.

В общем случае закон регулирования конденсаторной установки построен на сравнении затрат, выраженных в денежном эквиваленте, при работе системы тягового электроснабжения при отключенном и включенном КУ и имеет следующее выражение:

$$З_{КУ} = Э_{КУ}, \quad (1)$$

где $З_{КУ}$ и $Э_{КУ}$ – затраты и экономия, связанные при работе системы тягового электроснабжения с КУ.

В случае, когда $З_{КУ}$ превышает $Э_{КУ}$, необходимо отключать КУ, если до этого момента она была введена в работу, в противном случае – включать.

Составляющие $З_{КУ}$ и $Э_{КУ}$ зависят от того, включена или отключена электроустановка.

При отключенном КУ в состав затрат входит стоимость потерь электроэнергии в элементах КУ ($C_{\Delta РКУ}$) и переключения коммутационных аппаратов КУ ($C_{пер}$).

В состав экономии входят

– стоимость снижения потерь электроэнергии в трансформаторах подстанции ($C_{\Delta РТР}$);

– стоимость снижения затрат, связанных с уменьшением коэффициента реактивной мощности в точках общего присоединения ($C_{tg\varphi}$);

– экономия, связанная с повышением уровня напряжения на шинах тяговой подстанции и, как следствие, в контактной сети ($C_{\Delta U ш}$);

– экономия, связанная с повышением качества электроэнергии в точках общего присоединения ($C_{КЭЭ}$).

При включенном КУ в состав затрат входят

– стоимость переключения коммутационных аппаратов КУ ($C_{пер}$);

– затраты, связанные со снижением уровня напряжения на шинах тяговой подстанции и, как следствие, в тяговой сети ($C_{\Delta U ш}$);

– затраты, связанные со снижением качества электроэнергии в точках общего присоединения ($C_{КЭЭ}$).

В состав экономии входят

– стоимость потерь электроэнергии в элементах КУ ($C_{\Delta РКУ}$);

– стоимость снижения потерь электроэнергии в трансформаторах подстанции ($C_{\Delta РТР}$);

– экономия, связанная с исключением генерации реактивной мощности в систему внешнего электроснабжения ($C_{ген}$).

Расчет $C_{КЭЭ}$, $C_{ген}$, $C_{\Delta U ш}$, $C_{tg\varphi}$ является весьма непростой задачей. Кроме того, в законодательстве РФ отсутствуют утвержденные и применяемые на практике нормативные документы, на которые можно сослаться при расчете затрат (экономии) при превышении соответствующих показателей нормируемых значений, поэтому указанные составляющие в дальнейшем не учитываются. Однако в случае утверждения и применения на практике нормативных документов, позволяющих подсчитать затраты и экономию по этим составляющим, предложенная ниже методика может быть дополнена.

С учетом сказанного при отключенном КУ

$$З_{КУ} = C_{\Delta РКУ} + C_{пер}; \quad (2)$$

$$Э_{КУ} = C_{\Delta РТР}. \quad (3)$$

При включенном КУ

$$З_{КУ} = C_{пер}; \quad (4)$$

$$Э_{КУ} = C_{\Delta РКУ} + C_{\Delta РТР}. \quad (5)$$

Стоимость разницы потерь энергии в понижающих трансформаторах

$$C_{\Delta PTP} = \frac{C_{кВт\cdot ч}}{3600} \Delta P t \,, \tag{6}$$

где $C_{кВтч}$ – удельная стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, р./кВт·ч;

$\Delta P$ – разница потерь мощности в понижающих трансформаторах при отключенном и включенном КУ, кВт;

$t$ – время, с.

Стоимость переключения коммутационных аппаратов в простейшем случае определяется их стоимостью и механическим ресурсом:

$$C_{пер} = \frac{C_1}{2n_1} + \frac{C_2}{2n_2}, \tag{7}$$

где $C_1$ и $C_2$ – стоимость первого и второго выключателей КУ, р.;

$n_1$ и $n_2$ – нормированное количество циклов включения-отключения выключателей.

Стоимость потерь мощности в конденсаторной установке на основной частоте

$$C_{\Delta PKK} = \frac{c_{кВт\cdot ч}}{3600} \Delta P_{КУ} t \,, \tag{8}$$

где $c_{кВт\cdot ч}$ – удельная стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, р./кВт·ч;

$\Delta P_{КУ} t$ – потери мощности в конденсаторной установке на основной частоте, кВт;

$t$ – время, с.

Согласно выводам работы [1] потери мощности в трансформаторе при отсутствии КУ

$$\Delta P_{тр} = \frac{2\cdot 10^{-3}}{U_н^2} R_т \left[ \left( P_{от}^2 + Q_{от}^2 \right) k_{эот}^2 + \left( P_{оп}^2 + Q_{оп}^2 \right) k_{эоп}^2 + 0{,}5 (P_{от} P_{оп} + Q_{от} Q_{оп}) \right]. \tag{9}$$

При включении КУ в отстающей фазе:

$$\Delta P_{тр\,КУ\,от} = \frac{2\cdot 10^{-3}}{U_н^2} R_т \left[ \left( P_{от}^2 + Q_{от}^2 \right) k_{эот}^2 + \left( P_{оп}^2 + Q_{оп}^2 \right) k_{эоп}^2 + Q_{кот}^2 + 0{,}5 (P_{от} P_{оп} + Q_{от} Q_{оп}) - \right.$$
$$\left. - 2 Q_{от} Q_{кот} - \frac{1}{2} Q_{от} Q_{кот} - \frac{\sqrt{3}}{2} P_{оп} Q_{кот} \right]. \tag{10}$$

Максимальное снижение потерь мощности в трансформаторе для рассматриваемого случая достигается при мощности КУ

$$Q_{кот}^{опт} = Q_{от} + \frac{1}{4} Q_{оп} + \frac{\sqrt{3}}{2} P_{оп} \,. \tag{11}$$

$\Delta P_{тр}$ и $\Delta P_{тр\,КУ\,от}$ определяют разницу потерь в трансформаторе $\Delta P$, входящую в выражение (6),

$$\Delta P = \Delta P_{тр} - \Delta P_{тр\,КУ\,от} = \frac{2\cdot 10^{-3}}{U_н^2} R_т \left( 2 Q_{от} Q_{кот} + \frac{1}{2} Q_{оп} + \frac{\sqrt{3}}{2} P_{оп} Q_{кот} - Q_{кот}^2 \right) \tag{12}$$

или

$$\Delta P = \Delta P_{тр} - \Delta P_{тр\,КУ\,от} = \frac{2\cdot 10^{-3}}{U_н^2} R_т Q_{кот} \left( 2 Q_{от} + \frac{1}{2} Q_{оп} + \frac{\sqrt{3}}{2} P_{оп} - Q_{кот} \right) \tag{13}$$

и в соответствии с выражением (11)

$$\Delta P = \Delta P_{\text{тр}} - \Delta P_{\text{тр КУ от}} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{U_{\text{н}}^2} R_{\text{т}} Q_{\text{кот}} (2Q_{\text{кот}}^{\text{опт}} - Q_{\text{кот}}). \quad (14)$$

Согласно выражениям (2) – (8) получаем, что при отключенном КУ выражение (1) запишется в виде:

$$\frac{c_{\text{кВт·ч}}}{3600} \Delta P t + \frac{C_1}{2n_1} + \frac{C_2}{2n_2} = \frac{c_{\text{кВт·ч}}}{3600} \Delta P t . \quad (15)$$

Из уравнения (15) зависимая выдержка времени определяется по выражению:

$$t = \frac{3600}{c_{\text{кВт·ч}}} \frac{\frac{C_1}{2n_1} + \frac{C_2}{2n_2}}{\Delta P - \Delta P_{\text{КУ}}} . \quad (16)$$

При включенном КУ выражение (1) имеет вид:

$$\frac{C_1}{2n_1} + \frac{C_2}{2n_2} = \frac{c_{\text{кВт·ч}}}{3600} \Delta P t + \frac{c_{\text{кВт·ч}}}{3600} \Delta P_{\text{КУ}} t . \quad (17)$$

В соотвествии с формулой (17) зависимая выдержка времени определяется по выражению:

$$t = \frac{3600}{c_{\text{кВт·ч}}} \frac{\frac{C_1}{2n_1} + \frac{C_2}{2n_2}}{\Delta P + \Delta P_{\text{КУ}}} . \quad (18)$$

Однако отсчет времени при включенном и при отключенном КУ должен осуществляться в тот момент, когда в этом возникает необходимость. Для этого производится постоянный анализ оптимальной мощности КУ относительно установленной.

Так, для случая с включением КУ мощностью $Q_{\text{К}}$ в отстающую фазу происходит ее сравнение с оптимальным значением $Q_{\text{К опт}}$, определяемым по формуле (11).

Когда $Q_{\text{К опт}} > Q_{\text{К}}$ и КУ отключено, запускается таймер и начинается отсчет времени до значения, определенного выражением (16). Если КУ включено, то отсчет времени не производится.

В случае, когда $Q_{\text{К опт}} < Q_{\text{К}}$ и КУ включено, начинается отсчет времени до значения, определенного выражением (18), КУ отключено – таймер не запускается.

Если при последующем измерении условия сохраняются, то таймер продолжает отсчет, а отсчитанная выдержка времени суммируется с предыдущими значениями, т. е. когда КУ отключено и $Q_{\text{К опт1}} > Q_{\text{К}}$, расчетная выдержка времени по уравнению (16) составляет $t_1$. В случае сохранения на следующем шаге измерений условия $Q_{\text{К опт2}} > Q_{\text{К}}$ отсчет времени продолжается, но уже до значения $t_2$. Если $t_2$ будет меньше, чем уже отсчитанное время, то подается команда на включение КУ. Аналогично происходит процесс, когда КУ включено, а $Q_{\text{К опт}} < Q_{\text{К}}$.

Такой подход с применением зависимой выдержки времени позволит более эффективно использовать мощность фильтрокомпенсирующего устройства (ФКУ). Кроме того, решение о необходимости включения-отключения КУ будет приниматься на основе подробного анализа, включающего в себя стоимость износа выключателей КУ и потери мощности в его силовой цепи.

В случае утверждения и практического применения нормативных документов, позволяющих учесть затраты, связанные с улучшением качества электроэнергии, генерацией и по-

треблением реактивной мощности, эти составляющие можно будет включить в функцию равенства затрат и получить обновленную функцию зависимости выдержки времени.

1. Бородулин, Б. М. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог [Текст] / Б. М. Бородулин. – М.: Транспорт, 1983. – 183 с.

УДК 621.331:621.311.4:621.317.3

А. С. Вильгельм, А. Н. Ларин

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОЦЕНКЕ ПОТЕНЦИАЛА ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЯГИ ПОЕЗДОВ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ

*В данной статье рассматриваются экспериментальные исследования, направленные на оценку потенциала повышения энергоэффективности тяги поездов за счет применения рекуперативного торможения. В первую очередь рекуперативное торможение является средством обеспечения безопасности движения поездов, однако его применение для снижения скорости движения поезда также является дополнительным резервом экономии электроэнергии. Эти факторы обусловливают необходимость поддержания в исправном состоянии систем рекуперативного торможения на электроподвижном составе и инверторов тяговых подстанций постоянного тока, необходимых для преобразования постоянного тока в переменный и обеспечения возврата электроэнергии в энергосистему.*

Одним из главных целевых ориентиров в соответствии с «Транспортной стратегией Российской Федерации на период до 2030 г.» является снижение энергоемкости перевозочного процесса, в том числе и на железнодорожном транспорте. В связи с этим в настоящее время актуальным остается вопрос о повышении эффективности работы железнодорожного транспорта, которое можно осуществить на основе внедрения ресурсосберегающих технологий перевозок. Применение режима рекуперативного торможения является важнейшей составляющей энергосбережения.

К комплексу факторов, определяющих необходимость применения рекуперативного торможения, относятся следующие:

для хозяйства движения –

увеличение пропускной способности участков железных дорог за счет повышения скорости на спусках, снижение времени обработки составов после спуска;

ускорение оборота локомотивов и вагонов, а значит, и снижение в их потребности;

повышение безопасности движения поездов за счет наличия в поезде дополнительного средства торможения;

для локомотивного хозяйства –

снижение удельного расхода электроэнергии на тягу поездов за счет ее возврата в контактную сеть и снижения расхода на собственные нужды подвижного состава;

повышение технической скорости движения за счет поддержания постоянной скорости на спусках;

увеличение среднесуточного пробега и производительности локомотива за счет повышения технической скорости, а также снижения времени простоя локомотива с поездом на станциях оборота (нет массовой смены колодок);

для хозяйства электроснабжения –

экономия электрической энергии при рекуперативном торможении;

для вагонного хозяйства –

экономия тормозных колодок, снижение затрат на их замену;

экономия на обточке колесных пар вагонов.

К основным условиям, необходимым для применения рекуперативного торможения, относятся наличие благоприятного профиля пути, исправность оборудования электровозов и тяговых подстанций, квалификация машинистов.

Перевозочный процесс на исследуемом участке работы в течение многих лет характеризуется достаточно интенсивным применением рекуперации в силу осознанных преимуществ применения этого вида независимого торможения, а также наличия необходимых для этого условий. Но в последние шесть – семь лет эффективность применения рекуперативного торможения в границах работы участка стала снижаться. Связанно это прежде всего с увеличением доли подвижного состава, не оборудованного системами рекуперации.

В свою очередь веским аргументом со стороны энергосбытовых компаний при отказе от так называемого сальдированного учета электроэнергии является ссылка на несоответствие показателей качества электроэнергии (ПКЭ) требованиям ГОСТ 13109-97 при ее возврате в первичную сеть. В частности, высказывается мнение о значительном превышении искажения синусоидальности напряжений при возврате избыточной энергии рекуперации выпрямительно-инверторными преобразователями (ВИПами) по сравнению с режимом работы подстанций при потреблении энергии на тягу поездов, а также о низкой загрузке трансформаторов тока присоединений, на которых установлены приборы учета электроэнергии, возвращаемой в первичную сеть.

С целью подтверждения или опровержения приведенных аргументов, а также оценки потенциала повышения энергетической эффективности тяги поездов за счет применения рекуперации были проведены экспериментальные исследования на действующем участке железной дороги.

Анализ объемов переработки избыточной энергии рекуперации по вводам ВИПов тяговых подстанций исследуемого участка за период январь – декабрь 2010 г. показал, что возврат электроэнергии по вводам выпрямительно-инверторных агрегатов составил: на ТП 4 – 5,48 % от объема переданной по фидеру электроэнергии; на ТП 7 – 2,75 %; ТП 2 – 0,44; ТП 3 – 0,30; ТП 5 – 0,04; ТП 1 и ТП 6 – 0,00 %. Стоит отметить значительный помесячный разброс объемов переработки энергии рекуперации по всем тяговым подстанциям участка.

Для проведения эксперимента была выбрана тяговая подстанции ТП 7 с шестипульсовой схемой инвертора. Продолжительность эксперимента составляла трое суток (с 21.12.2010 по 24.12.2010) в соответствии с утвержденной программой (рисунок 1). Средняя температура наружного воздуха за время эксперимента составила –21˚ С, осадков не было, поверхность рельсов чистая, искрения токоприемника электровоза не наблюдалось.

Локомотивным депо были предоставлены электровоз серии ВЛ-11 и грузовой поезд массой 2786 т. Общий пробег локомотива за время эксперимента составил 176 км, время хода – 4,1 ч.

В процессе эксперимента на локомотиве фиксировались показания счетчиков моторного режима и рекуперации во время поездки. По каждой секции электровоза велась непрерывная фиксация значений напряжения контактной сети и токов секций в режиме рекуперации.

Измерения показателей качества электрической энергии производились двумя измерительно-вычислительными комплексами «ИВК-Омск». Один комплекс был установлен на вводе 6 кВ тяговой подстанции, второй – на вводе выпрямительно-инверторного преобразователя. Интервал фиксации данных измерительными комплексами составлял 15 с. Стоит отметить, что на всех тяговых подстанциях на участке ТП 1 – ТП 8 выпрямительно-инверторные преобразователи находились в рабочем состоянии.

Анализируя профиль участков ТП 6 – ТП 7 – ТП 8, необходимо отметить наличие затяжных спусков длиной 12 км с перепадом высот 100 м и длиной 6 км с перепадом высот 40 м. На этих участках имеется значительный потенциал для возврата электроэнергии при рекуперативном торможении.

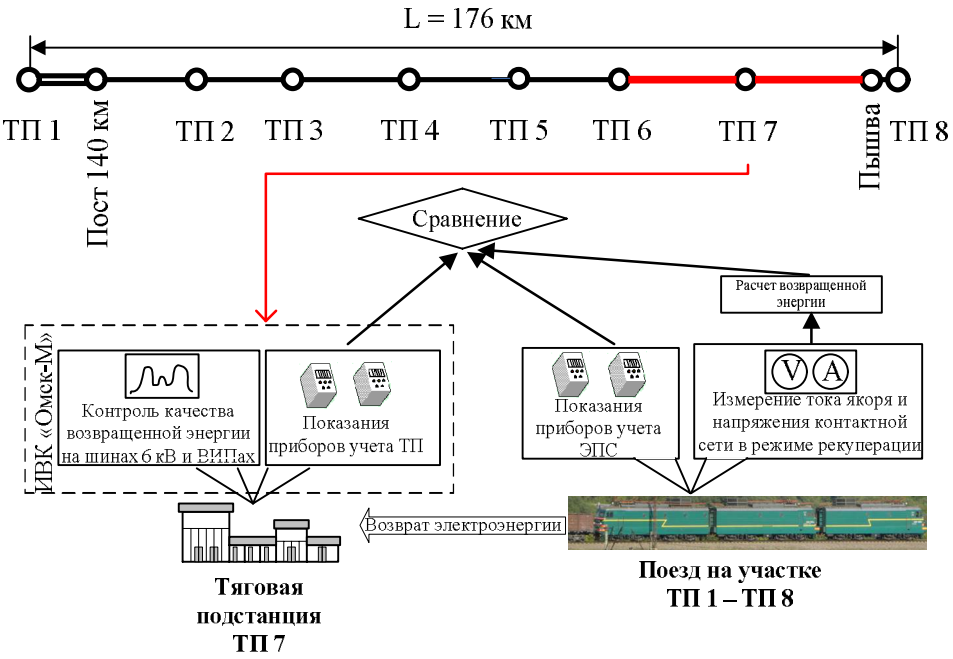



Рисунок 1 – Схема эксперимента на участке ТП 1 – ТП 8

Зафиксированные значения потребленной и возвращенной в ходе эксперимента электрической энергии по счетчикам электровоза на участке ТП 1 – ТП 8 приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Зафиксированные значения потребленной и возвращенной электрической энергии по счетчикам ЭПС

| Номер секции локомотива | Показания счетчика моторного режима, 100 кВт·ч | | Расход электроэнергии, кВт·ч | Показания счетчика рекуперации, ·100 кВт·ч | | Возврат электроэнергии, кВт·ч |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | в начале поездки | в конце поездки | | в начале поездки | в конце поездки | |
| Секция 1 | 12641,6 | 12662,2 | 2060 | 82495,6 | 82500,0 | 440 |
| Секция 2 | 21091,0 | 21116,6 | 2560 | 85597,0 | 85601,0 | 400 |
| Секция 3 | 88447,6 | 88468,8 | 2120 | 78571,5 | 78577,0 | 550 |
| Всего | – | – | 6740 | – | – | 1390 |

В ходе движения по участку ТП 6 – ТП 7 – ТП 8 выявлено значительное расхождение токов секций электровоза в режиме рекуперации, вызывающее различное тормозное усилие по секциям, что влечет за собой разницу в величине возврата энергии. С целью исключения данного явления необходима своевременная настройка схем рекуперации по секциям электровозов. В пределах участка ТП 6 – ТП 7 – ТП 8 по вольтметру электровоза дважды зафиксировано повышение напряжения контактной сети свыше 4 кВ, вызывающее отключение режима рекуперации. Величина возврата электроэнергии при рекуперативном торможении в ходе эксперимента на этих участках приведена в таблице 2.

Для оценки потенциала применения рекуперативного торможения в границах участка ТП 6 – ТП 7 – ТП 8 во время прохождения поезда по исследуемому участку фиксировался расход электроэнергии по вводу 6 кВ (прием и отдача) и на вводе выпрямительно-инверторного преобразователя в режимах тяги и рекуперации.

Данные о расходе электрической энергии по вводу 6 кВ (прием и отдача) и на вводе выпрямительно-инверторного преобразователя (тяга и рекуперация) приведены в таблице 3.

Таблица 2 – Величина возврата электроэнергии при рекуперативном торможении на участках ТП 6 – ТП 7 и ТП 7 – ТП 8

| Участок | Возврат электроэнергии при рекуперативном торможении, кВт·ч | | | |
|---|---|---|---|---|
| | секция 1 | секция 2 | секция 3 | по электровозу |
| ТП 6 – ТП 7 | 80 | 70 | 100 | 250 |
| Тп 7 – ТП 8 | 100 | 90 | 130 | 320 |
| Всего | 180 | 160 | 230 | 570 |

Таблица 3 – Расчет небаланса между отпущенной (принятой) и потребленной (рекуперируемой) электровозом электрической энергией

| Межподстанционная зона | По вводам 6 кВ | | По ВИПам | | Электровоз | | Небаланс (электровоз – ВИП) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | прием, кВт·ч | отдача, кВт·ч | прием, кВт·ч | рекуперация, кВт·ч | тяга, кВт·ч | рекуперация, кВт·ч | абсолютный, кВт·ч | | относительный, % | |
| | | | | | | | тяга | рекуперация | тяга | рекуперация |
| ТП 6 – ТП 7 | 978,2 | 121 | 727 | 224,2 | 680 | 250 | 47,0 | -25,8 | 6,9 | -10,3 |
| ТП 7 – ТП 8 | 804 | 188 | 664 | 298,2 | 620 | 320 | 44,0 | -21,8 | 7,1 | -6,8 |
| Суммарно по зоне | 1782,2 | 309 | 1391 | 522,4 | 1300 | 570 | 91,0 | -47,6 | 7,0 | -8,4 |

Потери электрической энергии в тяговой сети в режиме рекуперации составили 8,4 %, а в режиме тяги – 7,0 %.

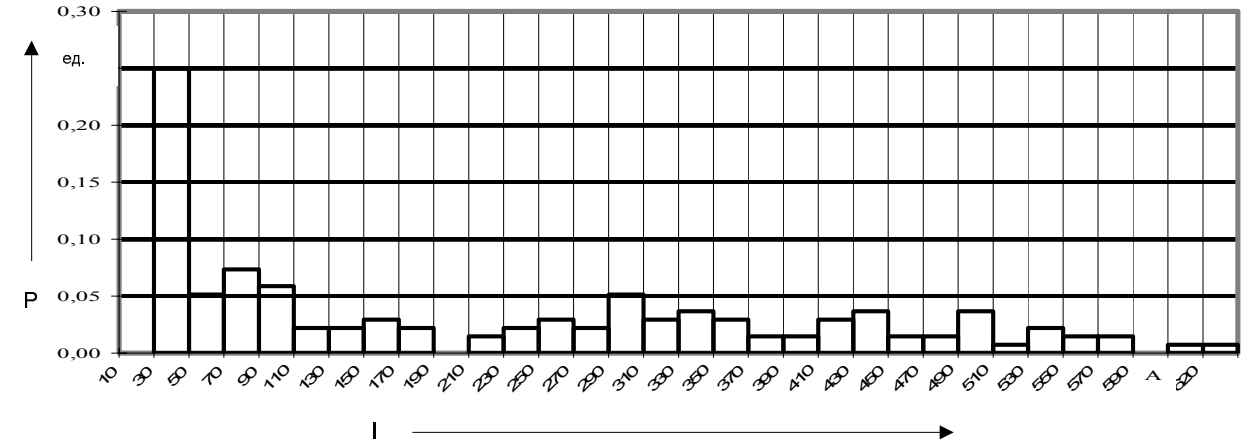
В результате обработки данных измерений нагрузки ввода 6 кВ и выпрямительно-инверторного преобразователя подстанции ТП 7, выполненных в интервалах времени работы выпрямительно-инверторных преобразователей отдельно в режиме выпрямления и в режиме инвертирования энергии, и обработки статистических данных токов нагрузки были построены функции плотности распределения токов. Средние за период измерения значения токов тяговой подстанции в режимах потребления энергии на тягу поездов и рекуперации составили по вводу 6 кВ 212,77 и 58,44 А соответственно; по вводу ВИПов – 212,35 и 62,64 А.

Значения загрузки трансформаторов тока и их процентное отношение к номинальному значению в режиме потребления и рекуперации представлены в таблице 4.

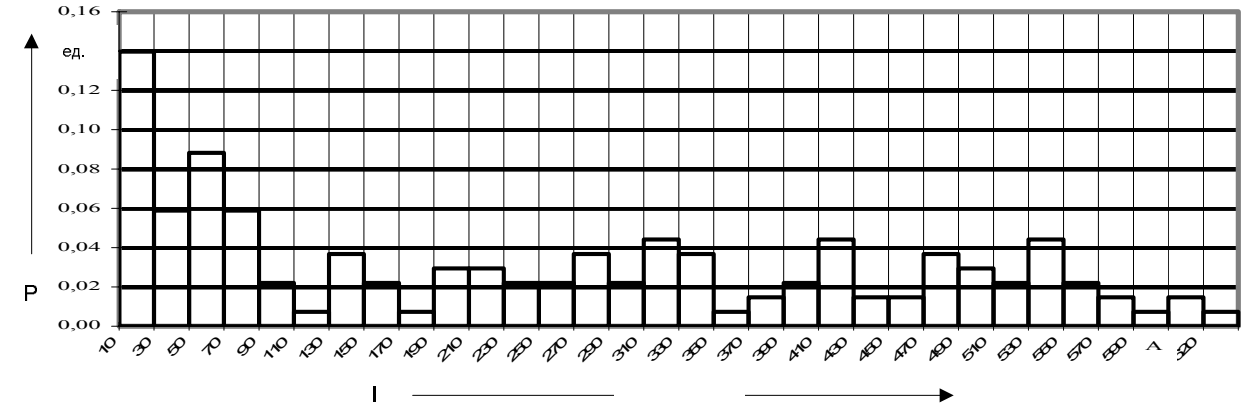
Таблица 4 – Значения загрузки трансформаторов тока в режиме потребления и рекуперации

| Тяговая подстанция | Загрузка трансформатора тока от номинального значения первичной обмотки трансформатора тока, % | | | |
|---|---|---|---|---|
| | рекуперация | | потребление | |
| | ввод 6 кВ | ВИПы | ввод 6 кВ | ВИПы |
| ТП 7 | 5,8 | 6,26 | 21,3 | 21,24 |

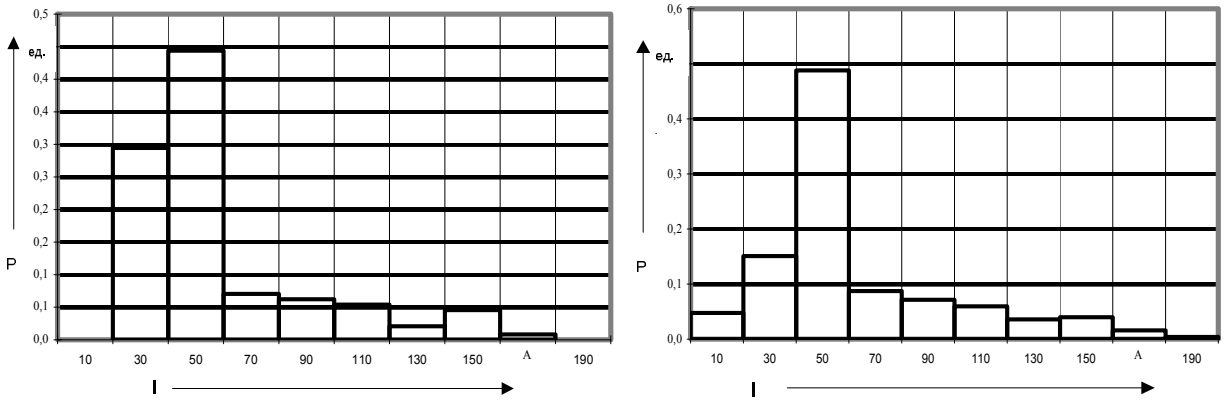
Из графиков функций плотности распределения тока на рисунке 2 и данных таблицы 4 можно сделать вывод о том, что в условиях эксплуатации токи избыточной энергии рекуперации, возвращаемой в сеть общего назначения, превышают 5 %-ный порог. Следовательно, ссылки энергоснабжающих организаций на низкую загрузку трансформаторов тока присоединений, на которых установлены приборы учета электроэнергии, при отказе от взаиморасчетов за электрическую энергию, возвращаемую в первичную сеть, не имеют должного обоснования.




а




б




в г

Рисунок 2 – Функция плотности распределения тока на ТП 7: а – по вводу 6 кВ при тяге; б – по вводу ВИПов при тяге; в – по вводу 6 кВ при возврате; г – по вводу ВИПов при возврате

Нормально и предельно допустимые значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения в точках общего присоединения к электрическим сетям с разным номинальным напряжением установлены ГОСТ 13109-97 и составляют 5,0 и 8,0 % соответственно.

В результате экспериментальных исследований качества электроэнергии на вводе 6 кВ тяговой подстанции при максимальной нагрузке в режимах инвертирования и потребления установлено, что в режиме инвертирования искажение кривой тока несколько выше, чем в режиме потребления энергии на тягу поездов. Однако это не означает, что коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения при работе ВИПов в режиме инвертирования

во всех случаях превышает допустимые значения, установленные ГОСТ 13109-97. Это следует из результатов статистической обработки коэффициентов искажения синусоидальности кривой напряжения для интервалов времени работы ВИП отдельно в режиме выпрямления и отдельно в режиме инвертирования.

По результатам обработки данных, полученных в результате эксперимента, определены средние значения и получены функции плотности распределения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения в режимах тяги и возврата избыточной энергии рекуперации. Анализ полученных значений показывает, что при возврате электрической энергии вероятность превышения нормально допустимого значения на шинах 6 кВ составляет 50 %, а вероятность превышения предельно допустимого значения на шинах 6 кВ – 28 %.

В режиме потребления электроэнергии вероятность превышения нормально допустимого значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения на шинах 6 кВ уменьшается до 48 %, а вероятность превышения предельно допустимых значений уменьшается до 26 %.

Показатели качества электрической энергии за полный период измерений, за период режима потребления и возврата электрической энергии приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения на шинах 6 кВ тяговой подстанции ТП 7

| Наименование коэффициента | Период измерений | | |
|---|---|---|---|
| | полный | при тяге | при возврате электроэнергии |
| 6 кВ | | | |
| $k_u$ | 6,2 | 11,38 | 7,59 |

Анализ данных таблицы 5 показывает, что при максимальном тяговом режиме (P = 6849,6 кВт) коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения на шинах 6 кВ больше значения, полученного за весь период измерений, а также больше, чем при максимальном возврате (11,38 % против 7,59).

Среднее значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения приведено в таблице 6.

Таблица 6 – Среднее значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения

| Режим работы ВИПа | Среднее значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения на шинах тяговой подстанции, % |
|---|---|
| | ТП 7 |
| Инвертирование | 5,48 |
| Выпрямление | 6,92 |

По функциям распределения коэффициентов искажения синусоидальности кривой напряжения и данным, приведенным в таблице 6, можно сделать вывод о том, что превышения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения при возврате избыточной энергии рекуперации ВИПов не наблюдалось.

Таким образом, ухудшение показателей качества электрической энергии, вызванное влиянием системы тягового электроснабжения постоянного тока, в том числе и в режиме инвертирования энергии, не может являться основанием для отказа в оплате электроэнергии при ее возврате в первичную сеть.

В результате проведенного эксперимента можно сделать следующие выводы.

1. В ходе экспериментальной поездки на участке ТП 1 – ТП 8 (176 км) при проведении грузового поезда массой 2786 т выполнена работа 49,2·104 ткм брутто, расход электроэнергиии по счетчикам электровоза составил 6740 кВт·ч, величина возврата электроэнергии при

рекуперативном торможении по счетчикам электровоза – 1390 кВт·ч, что составляет 20,6 % от расхода на тягу, удельная рекуперация – 28,3 кВт·ч / 104 ткм брутто.

2. По данным за 2010 г. по тяговому плечу в направлении ТП 1 – ТП 8 проводится девять пар грузовых поездов в сутки, т. е. 3285 поездов в год. Таким образом, возврат электроэнергии при рекуперативном торможении по опытным данным может составить 4 566 150 кВт·ч, или при действующем тарифе на электроэнергию на тягу поездов 2,06 р. / кВт·ч экономия за счет использования рекуперации в направлении ТП 1 – ТП 8 составит 9,4 млн р. в год.

3. На участке ТП 6 – ТП 7 расход электроэнергии составил 680 кВт·ч, возврат электроэнергии – 250 кВт·ч (36,8 %), на участке ТП 7 – ТП 8 расход составил 620 кВт·ч, возврат – 320 кВт·ч (51,6 %).

4. Экспериментальные исследования распределения потоков мощностей электрической энергии в режимах тяги и рекуперации показали следующее:

рекуперируемая электровозом электрическая энергия частично была возвращена в энергосистему и частично была потреблена на собственные нужды подстанции;

небаланс между отпущенной по межподстанционным зонам и потребленной электрической энергией электровозом составил 7,0 %;

небаланс между рекуперируемой электроэнергией электровозом и принятой подстанцией составил 8,4 %.

5. Выполнен сравнительный анализ показателей качества электрической энергии в режимах максимальной тяговой нагрузки и возврата электроэнергии. Анализ результатов проведенного сравнения показывает, что при возврате электрической энергии показатели качества электроэнергии сопоставимы с показателями качества электроэнергии в режиме тяги. Таким образом, неудовлетворительное качество электрической энергии, вызванное влиянием системы тягового электроснабжения, не может являться основанием для отказа принятия сальдированного учета электроэнергии.

6. Проведена оценка загрузки трансформаторов тока. Полученные в ходе экспериментальных исследований данные позволяют сделать вывод о том, что токи избыточной энергии рекуперации, возвращаемой в сеть общего назначения, превышают минимальный порог в 5 %. Следовательно, загрузка трансформаторов тока присоединений, на которых установлены приборы учета в режиме возврата электроэнергии, удовлетворяет требованиям правил устройства электроустановок.

---

УДК 629.423.1

А. И. Давыдов

# АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗВРАТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В КОНТАКТНУЮ СЕТЬ ПРИ РЕКУПЕРАТИВНОМ ТОРМОЖЕНИИ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МАРШРУТОВ МАШИНИСТОВ

*Статья посвящена описанию методики анализа эффективности возврата электроэнергии в контактную сеть при рекуперативном торможении на электровозах переменного и постоянного тока по данным маршрутов машинистов.*

В настоящее время актуален вопрос о повышении эффективности работы железнодорожного транспорта на основе внедрения ресурсосберегающих технологий перевозок. Применение режима рекуперативного торможения является важнейшей составляющей энергосбережения. В современной литературе рассматриваются различные схемотехнические решения для повышения эффективности рассматриваемого режима, однако при этом не уделя-

ется должного внимания анализу достигнутых результатов с целью выявления возможностей повышения количества электрической энергии, возвращаемой в контактную сеть при рекуперативном торможении.

Анализ, проведенный специалистами Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (ВНИИЖТа), Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПСа) и Восточно-Сибирской железной дороги в 2005 – 2007 гг., показал, что существует ряд причин субъективного и объективного характера, тормозящих применение рекуперации. Ее использование затрагивает интересы многих служб: движения, электроснабжения, локомотивной, пути, вагонного хозяйства, автоматики и телемеханики, связи. Различные подразделения железных дорог имеют как положительные, так и отрицательные примеры влияния данного вида электрического торможения на их эксплуатационные показатели. Комплекс факторов, определяющих необходимость применения рекуперативного торможения, приведен в схематическом виде на рисунке 1.

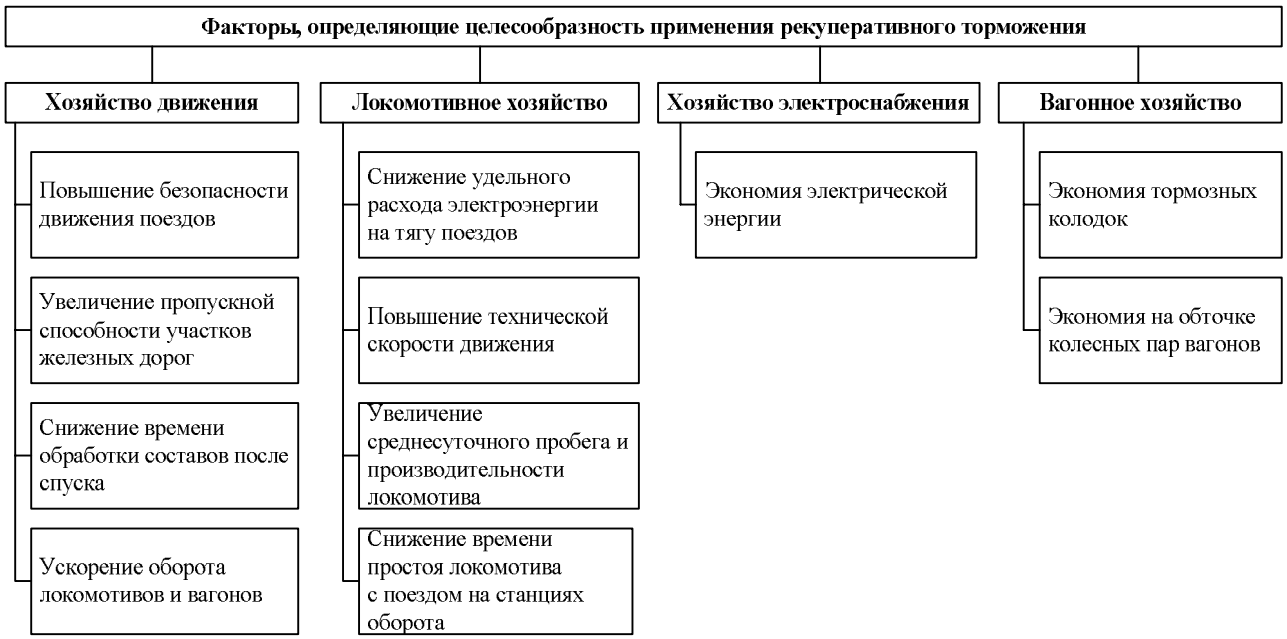



Рисунок 1 – Комплекс факторов, определяющих целесообразность применения рекуперативного торможения

Комплексная оценка влияния всех факторов в общем технико-экономическом эффекте позволяет сделать вывод о целесообразности применения режима рекуперативного торможения.

Разработанный на кафедре «Прикладная математика и механика» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПСа) метод анализа эффективности рекуперации по данным маршрутов машинистов основан на сравнительной оценке показателей результативности возврата электроэнергии на различных уровнях интеграции данных об энергопотреблении: на уровне железной дороги (рисунок 2, а) и на уровне локомотивного депо (рисунок 2, б).

Первоисточником данных об эксплуатационной работе, затратах энергии на тягу и возвращенной электроэнергии при рекуперативном торможении являются маршруты машинистов (ММ), интегрированная обработка которых осуществляется в специальной автоматизированной системе (АС ИОММ) в информационно-вычислительных центрах железных дорог. Данные АС ИОММ служат основой для составления отчетов форм ТХО-1 и ТХО-9, которые могут быть использованы при проведении анализа эффективности применения рекуперации. При этом следует иметь в виду, что в случае сомнительных показаний счетчика моторного

режима расход электроэнергии принимается равным начисленной по поездке норме, что не всегда адекватно отражает фактическое энергопотребление и может привести к искажению результатов исследования. Более широкие возможности для анализа результативности возврата электроэнергии при рекуперативном торможении дает специальный отчет в программном комплексе анализа расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов (ПК АРТЭР), разработанном на кафедре «Прикладная математика и механика» Омского государственного университета путей сообщения и внедренном в 2009 г. во всех локомотивных депо Западно-Сибирской железной дороги. Окно параметров отчета приведено на рисунке 3.

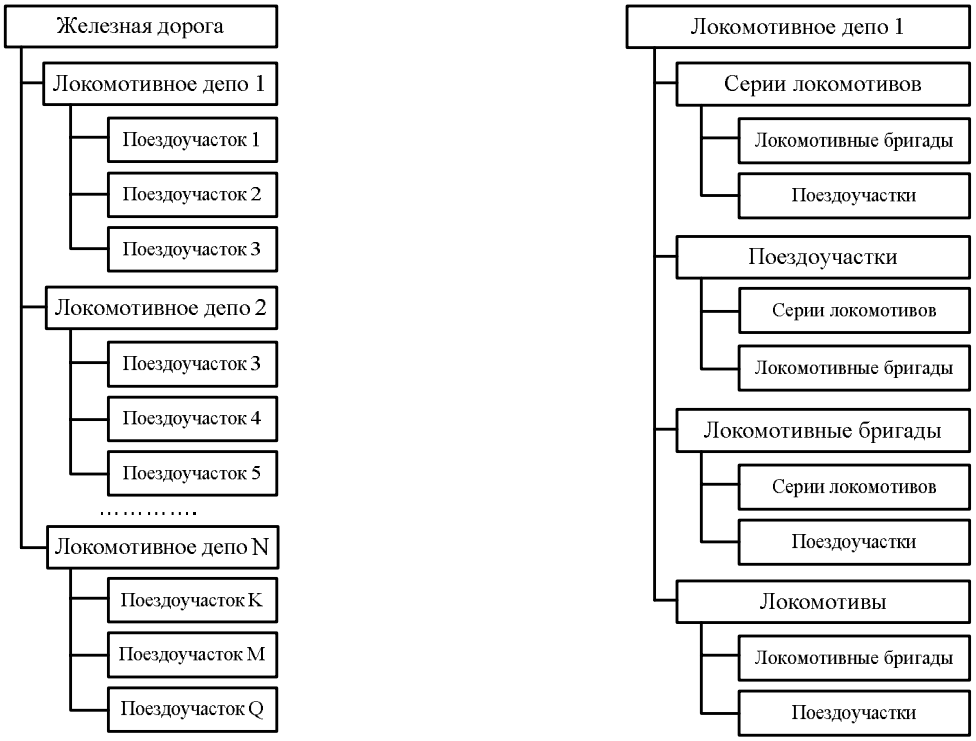



Рисунок 2 – Уровни анализа эффективности рекуперации:
а – железная дорога; б – локомотивное депо

В настоящее время в качестве показателя для оценки использования режима возврата электроэнергии широко применяется отношение энергии на *i*-м уровне исследования, возвращенной электровозами при рекуперации, к энергии, затраченной на тягу, выраженное в процентах [1]:

$$r_i^{э} = \frac{\sum_{m=1}^{k} W_{R\,m}}{\sum_{m=1}^{k} W_{A\,m}} \cdot 100\,; \qquad (1)$$

где $W_{R\,m}$ – величина возврата электроэнергии при рекуперативном торможении по маршруту машиниста, кВт·ч;

$W_{A\,m}$ – полный расход электроэнергии по ММ, кВт·ч;

$k$ – количество исследуемых маршрутов машинистов.

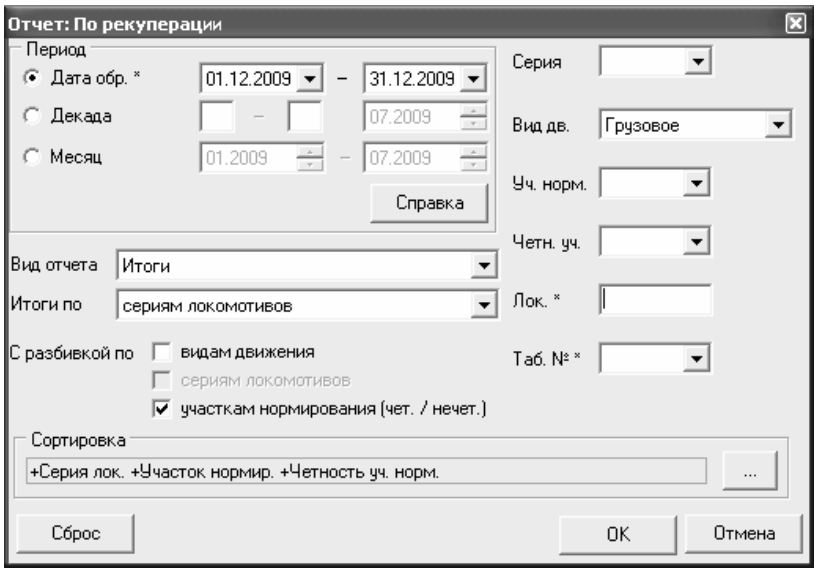



Рисунок 3 – Вид окна параметров отчета по рекуперации в ПК АРТЭР

Однако наличие случаев недостоверных результатов данных по ММ (неисправный моторный счетчик или его отсутствие, случайное или умышленное искажение его показаний) может привести к получению некорректных значений этого показателя и к неверным выводам по результатам анализа. Поэтому более адекватным показателем эффективности применения рекуперативного торможения является удельная рекуперация – отношение величин возврата электроэнергии к тоннокилометровой работы:

$$r_i^{QL} = \frac{\sum_{m=1}^{k} W_{Rm}}{\sum_{m=1}^{k} (QL)_m}, \qquad (2)$$

где $(QL)_m$ – тоннокилометровая работа, $10^4$ ткм брутто.

Этот показатель является базовым при предлагаемом методе анализа эффективности применения рекуперативного торможения, обобщенная графическая схема алгоритма данного анализа приведена на рисунке 4. Выход из алгоритма возможен практически на любом этапе вычислительного процесса в зависимости от поставленных целей и глубины анализа. В блоках сравнения, отмеченных знаком «*», на каждом уровне обозначена операция выделения группы анализируемых объектов, которые отклоняются от заданного критического значения.

Оценивать объемный показатель применения рекуперативного торможения в целом по структурному подразделению (железной дороге) целесообразно по величине доли тоннокилометровой работы по маршрутным листам с использованием рекуперации относительно работы в целом по виду тяги:

$$\gamma_p = \frac{\sum_{t=1}^{N_p} (QL)_t}{\sum_{v=1}^{N} (QL)_v}, \qquad (3)$$

где $N$ – общее количество ММ в целом по виду тяги;

$N_p$ – количество ММ с рекуперацией.

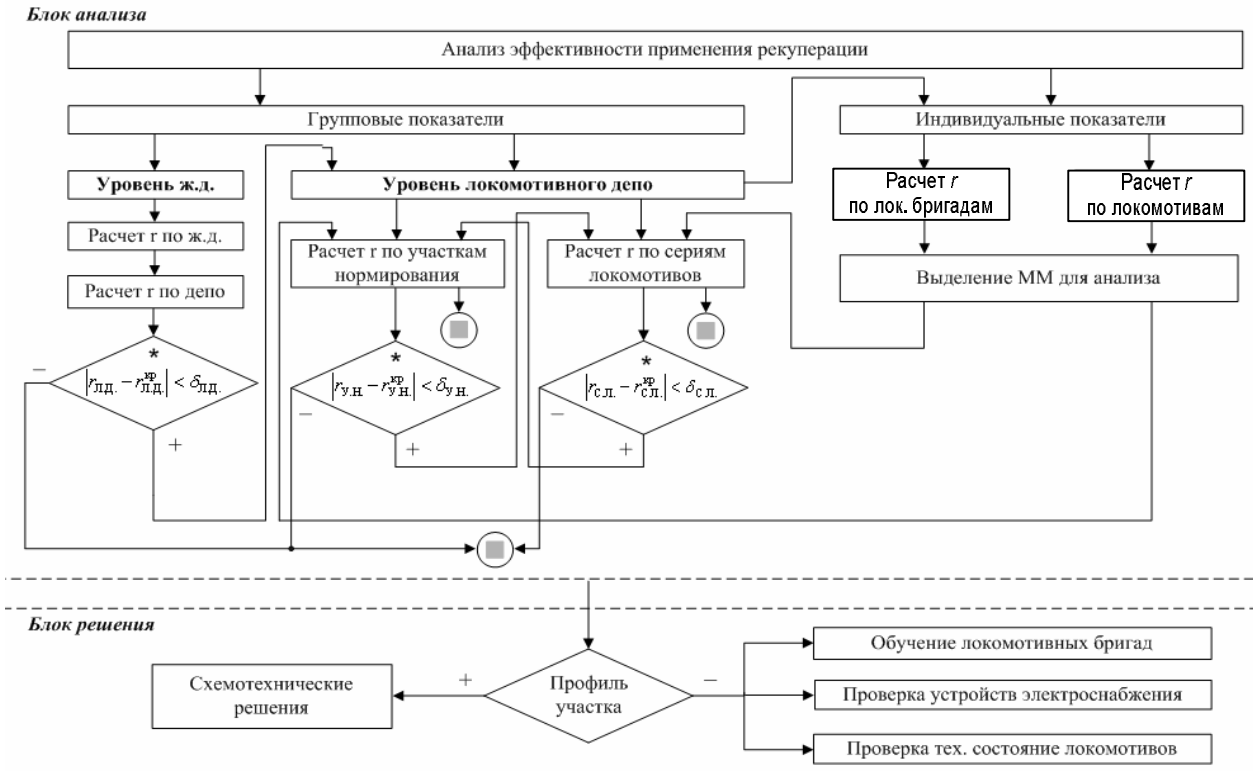



Рисунок 4 – Обобщенная графическая схема алгоритма анализа эффективности рекуперации

Рассмотрим особенности реализации описываемого алгоритма на примере одного из локомотивных депо Урало-Сибирского региона. Из генеральной совокупности ММ в электрической тяге за июль 2009 г., включающей в себя около 8 тыс. элементов, отберем только те, в которых использовалось рекуперативное торможение, обозначим выборку $\Omega_1$. Для этой выборки на рисунке 5 приведена диаграмма, показывающая распределение по видам движения этих маршрутных листов, а также основных объемных показателей в рассматриваемом структурном подразделении.

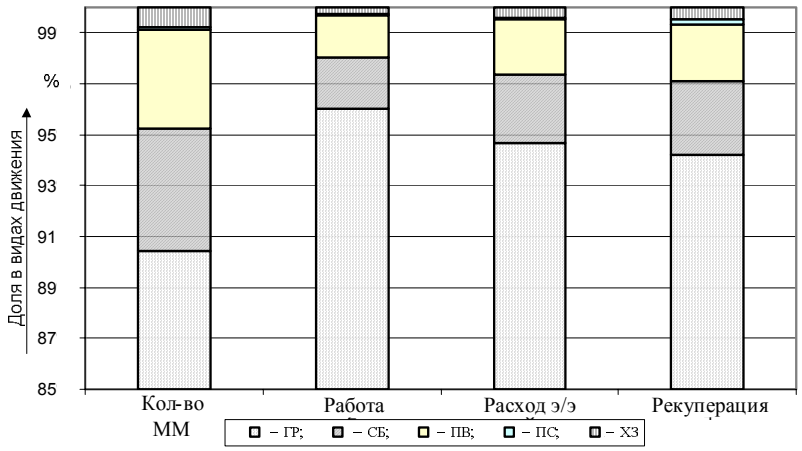



Рисунок 5 – Вклад видов движения в формирование объемных показателей
(ГР – грузовое; ПС – пассажирское; ПВ – передаточно-вывозное;
СБ – сборное; ХЗ – хозяйственное)

Диаграммы на рисунке 5 свидетельствуют о том, что максимум всех параметров приходится на грузовой вид движения, поэтому для дальнейшего анализа отберем только ММ в этом виде движения на локомотивах одной серии с исправными моторными счетчиками и с нулевой величиной пробега в одиночном следовании, этот набор данных насчитывает 1766 элементов, обозначим его $\Omega_2$. По полученной выборке вычисляется значение эффективности

рекуперации по формуле (2), в рассматриваемом депо оно составило 6,1 кВт·ч / $10^4$ ткм брутто. Полученную выборку разобьем на кванты. Для определения числа интервалов группирования воспользуемся эвристической формулой Старджесса [2]:

$$k = [1 + log_2 N'_p], \quad (4)$$

где $N'_p$ – число элементов полученной выборки $\Omega_2$.

Для выборки $\Omega_2$ $k = 12$. Гистограмма распределения значений удельной рекуперации для рассматриваемого примера приведена на рисунке 6.

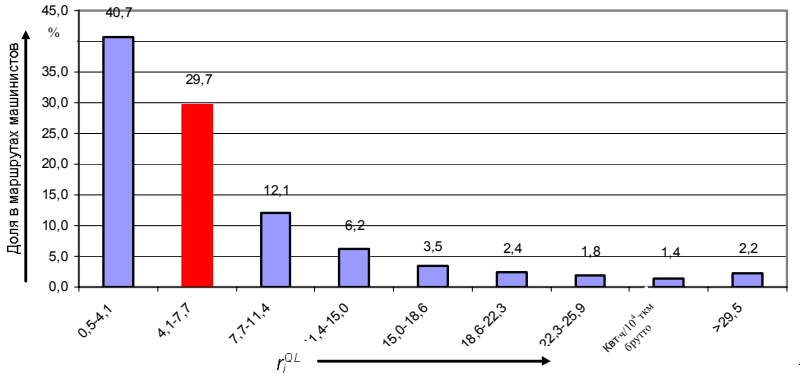



Рисунок 6 – Гистограмма интервального распределения значений эффективности рекуперации

Гистограмма на рисунке 6 свидетельствует о том, что в интервал [4,1; 7,7], содержащий «среднюю» по выборке $\Omega_2$ величину эффективности рекуперации, попадает 29,7 % маршрутных листов. В зависимости от заранее определенного критерия наиболее тщательному анализу могут быть подвергнуты случаи как со значениями в интервале [0,5; 4,1), так и с $r_i^{QL} > 7,7$ кВт·ч / $10^4$ ткм брутто.

Для определения направления дальнейшего анализа на каждом этапе исследования целесообразно учитывать объем тоннокилометровой работы на рассматриваемом уровне исследования. Для этого предлагается использовать комплексный показатель $\varphi_j$, рассчитываемый по формуле:

$$\varphi_j = r_j^{QL} \cdot \gamma_j, \quad (5)$$

где $\gamma_j$ – доля работы в величине работы на вышестоящем уровне исследования в относительных единицах (о.е.).

В таблице 1 приведен пример результатов анализа эффективности применения рекуперативного торможения по поездоучасткам в рассматриваемом депо. По данным таблицы 1 на рисунке 7 построены гистограммы удельной рекуперации и долей работы по участкам работы локомотивных бригад. Данные по формированию структуры удельной рекуперации по депо приведены на рисунке 8.

Таблица 1 – Результаты применения рекуперации по поездоучасткам по выборке ММ

| Поездоучасток («ч» – четный, «н» – нечетный) | Доля работы по поездоучастку от работы в целом по выборке, о.е. | Удельная рекуперация, кВт·ч /$10^4$ ткм | Произведение доли работы на удельную рекуперацию |
|---|---|---|---|
| 3н | 0,018 | 4,00 | 0,07 |
| 3ч | 0,221 | 3,59 | 0,79 |
| 1ч | 0,210 | 3,39 | 0,71 |
| 4н | 0,117 | 3,18 | 0,37 |
| 1н | 0,253 | 3,06 | 0,77 |
| 2н | 0,010 | 2,58 | 0,03 |
| 2ч | 0,010 | 2,41 | 0,02 |
| **4ч** | **0,161** | **1,76** | **0,28** |
| Всего | 1,000 | 3,06 | 3,06 |

Данные таблицы 1 и рисунка 7 позволяют сделать следующие выводы:

1) наибольший вклад в значение эффективности рекуперации по выборке маршрутных листов имеют поездоучастки 3ч, 1н, 1ч, 4ч;

2) наименьшее значение удельной рекупеации наблюдается в четном направлении участка № 4, несмотря на то, что на нем выполняется 16,1 % работы депо. Этот факт свидетельствует о необходимости дальнейшего анализа эффективности применения режима возврата электроэнергии в контактную сеть со стороны специалистов теплотехнического профиля, а также о целесообразности проведения нескольких контрольных поездок по тяговому плечу № 4 с составами различной массы с целью проверки соблюдения и возможной корректировки действующих режимных карт ведения поездов. На основании результатов нескольких поездок можно сделать вывод о потенциале снижения удельного расхода на конкретном участке.

Подобные экспериментальные исследования были проведены специалистами ОмГУПСа на одной из железных дорог России, при этом величина возврата электроэнергии при рекуперативном торможении составила около 20 % от расхода на тягу.

Разработанная методика позволяет выявить резервы повышения энергетической эффективности тяги поездов за счет применения рекуперативного торможения путем определения комплекса технических и организационных мероприятий.

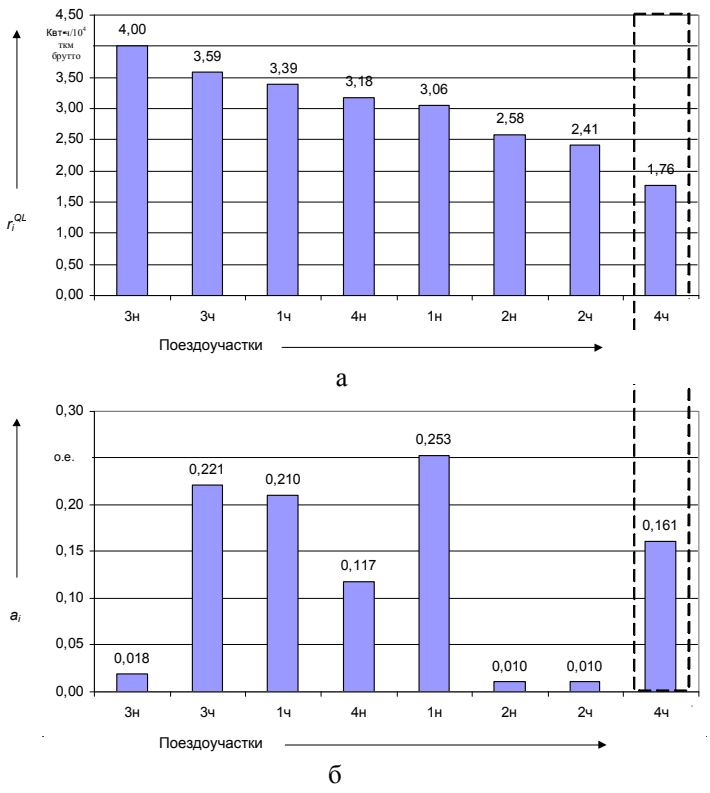



Рисунок 7 – Эффективность рекуперации и долей работы по участкам работы локомотивных бригад депо: а – удельная рекуперация; б – доли работы по поездоучасткам общей работы

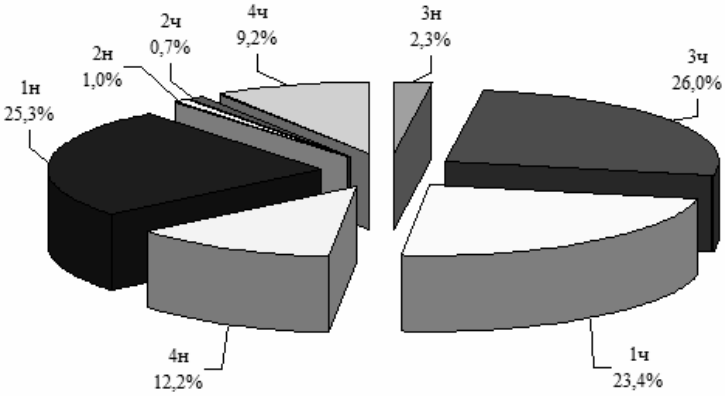



Рисунок 8 – Структура удельной рекуперации в депо по участкам нормирования

*Список литературы*

1. Кучумов, В. А. Рекуперация электроэнергии: достижения и резервы [Текст] / В. А. Кучумов, Б. Н. Ребрик // Железнодорожный транспорт. 2002. – № 11. – С. 50 – 55.

2. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебное пособие [Текст] / В. Е. Гмурман. – М.: Высшая школа, 2003. – 479 с.

УДК 621.331:621.311.004.18

А. А. Комяков, А. В. Пономарев, О. А. Комякова

# ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА НЕТЯГОВЫЕ НУЖДЫ СТРУКТУРНЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

*В статье рассмотрена возможность применения современного математического аппарата искусственных нейронных сетей для планирования расхода электрической энергии нетяговых железнодорожных потребителей различной хозяйственной принадлежности с учетом влияния внешних факторов.*

В последнее время на железнодорожном транспорте широко внедряются автоматизированные системы коммерческого учета топливно-энергетических ресурсов (АСКУ ТЭР, АСКУЭ). Возможности, предоставляемые этими системами, чрезвычайно широки. К ним относятся:

1) сбор, обработка и представление информации об энергопотреблении;

2) предоставление отчетов и справок о деятельности объекта на основе автоматизированного составления различных форм и видов информационных документов;

3) обработка информации на основе научно обоснованной методологии и поддержки принятия решений;

4) планирование энергопотребления объектов предприятий, контроль за энергопотреблением и управление им.

Первые две возможности являются практически стандартными для любого потребителя. Реализация третьей и четвертой возможностей в настоящее время не осуществляется в полном объеме. Это относится и к функции планирования энергопотребления на нетяговые нужды.

В настоящее время планирование расхода электроэнергии на нетяговые нужды структурных подразделений железных дорог на уровне дорожных топливно-энергетических центров (НТЭЦ) в большинстве случаев осуществляется по принципу «от достигнутого уровня», т. е. исходя из фактического расхода за предшествующий период. Такая система планирования не позволяет определить возможное изменение расхода электрической энергии за счет влияния таких факторов, как температура воздуха, изменение ремонтно-эксплуатационной работы структурных подразделений, ввод или вывод из эксплуатации энергопотребляющего оборудования, внедрение современных технических средств и ресурсосберегающих технологий. При существующей системе планирования расхода электроэнергии на нетяговые нужды расхождение $\delta$ между планируемым и фактическим расходом по отдельным структурным подразделениям в основном превышает 5 %, а в ряде случаев достигает 15 % (рисунок 1). В итоге это приводит к установлению недостоверных лимитов электропотребления и к неэффективному использованию денежных средств на приобретение энергоресурсов.

В связи с этим возникает необходимость в разработке новой, научно обоснованной системы планирования расхода электрической энергии на нетяговые нужды. В настоящее время в России и за рубежом при планировании нагрузок электроэнергетических систем и промышленных предприятий применяются методы, которые можно классифицировать следующим образом.

*Эвристические методы.* Эвристическое планирование заключается в интуитивном выборе из множества обстоятельств важнейших и решающих. Данные методы применимы для прогнозирования любых процессов, независимо от того, непрерывный процесс или дискретный, стационарный или нестационарный, требуется качественный или количественный, имеется статистика или не имеется, описаны ли математически закономерности процесса или нет. Результаты эвристического прогнозирования представляются различными видами экспертных оценок.

Основные методы коллективных экспертных оценок включают в себя методы комиссий,

«Делфи», коллективной генерации идей, матричный метод и др.

*Методы,* в которых потребление электрической энергии рассматривается как *детерминированный процесс.* К ним можно отнести методы с применением средних характеристик ряда динамики электропотребления: среднего абсолютного прироста и среднего темпа роста. В эту же группу входит метод удельных нагрузок на 1 м$^2$ производственной площади предприятия, используемый применительно к силовой нагрузке машиностроительных предприятий и получивший распространение при предварительных расчетах для производства с неустановившейся технологией.

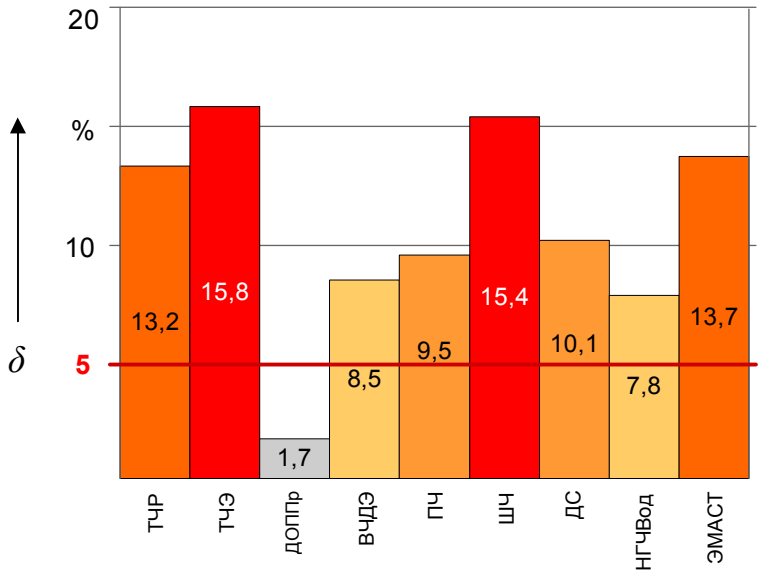



Рисунок 1 – Погрешность планирования расхода электроэнергии для различных структурных подразделений

*Вероятностные методы* основаны на вероятностном характере электропотребления и объединяют в своем составе самые разнообразные способы планирования, которые базируются на принципах и законах теории вероятностей и математической статистики. К подобным методам можно отнести методы прогнозирования с помощью скользящей средней, метод экспоненциального сглаживания, корреляционного и регрессионного анализа, адаптивной фильтрации, метод с использованием цепей Маркова и некоторые другие.

Перечисленные математические модели потребления электрической энергии имеют следующие недостатки:

– линейная функциональная зависимость выходной величины от набора входных факторов;

– детерминированный характер используемых моделей;

– ограниченный объем входных факторов.

Математический аппарат, положенный в основу современной системы планирования потребления электроэнергии на железнодорожном транспорте, должен удовлетворять следующим требованиям:

– иметь возможность задания наиболее подходящей под процесс энергопотребления функциональной зависимости, в том числе нелинейной;

– учитывать случайный характер реального процесса энергопотребления;

– иметь возможность учитывать множество внешних и внутренних факторов (в том числе неявно заданных).

Поставленным требованиям в полной мере удовлетворяет математический аппарат искусственных нейронных сетей (ИНС). ИНС представляют собой современный математический аппарат, который нашел широкое применение как за рубежом (в качестве системы принятия решений), так и в России для прогнозирования нагрузок электроэнергетических систем [1, 2].

Основу каждой ИНС составляют относительно простые, в большинстве случаев однотипные элементы (ячейки), имитирующие работу нейронов мозга (рисунок 2). Каждый нейрон характеризуется своим текущим состоянием по аналогии с нервными клетками головного мозга, которые могут быть возбуждены или заторможены, и имеет группу синапсов – однонаправленных входных связей, соединенных с выходами других нейронов, а также аксон – выходную связь данного нейрона, с которой сигнал (возбуждения или торможения) поступает на

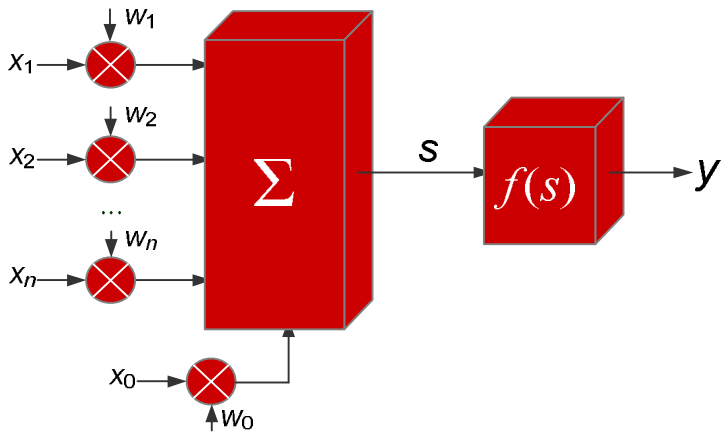



Рисунок 2 – Общий вид искусственного нейрона

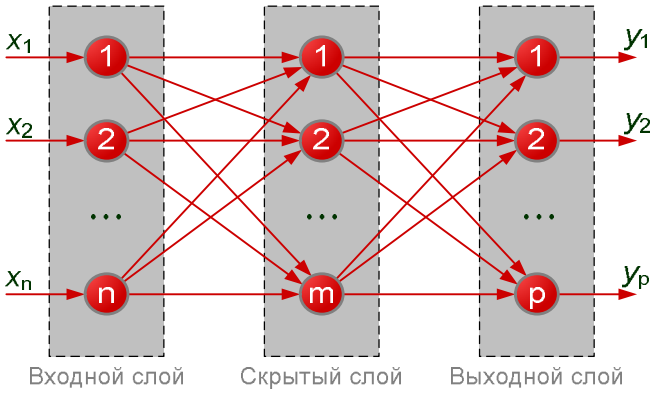



Рисунок 3 – Структура искусственной нейронной сети

синапсы следующих нейронов. Каждый синапс характеризуется величиной синаптической связи или ее весом $w_i$.

Текущее состояние нейрона определяется как взвешенная сумма его входов:

$$s = \sum_{i=1}^{n} x_i w_i. \qquad (1)$$

Выход нейрона есть функция его состояния:

$$y = f(s). \qquad (2)$$

Нелинейная функция $f$ называется активационной.

Для обеспечения параллельной обработки сигналов осуществляется объединение большого числа нейронов в так называемые слои и соединение определенным образом нейронов различных слоев, а также, в некоторых конфигурациях, и нейронов одного слоя между собой, причем обработка взаимодействия всех нейронов ведется послойно. Функционирование многослойной ИНС, структура которой представлена на рисунке 3, достаточно простое. Входные сигналы $x_i$, подаваемые на сеть, поступают на нейроны входного слоя, проходят по очереди через все скрытые слои и выделяются с нейронов выходного слоя, формируя при этом выходные сигналы $y_i$. По мере распространения сигналов по сети они претерпевают ряд преобразований, которые зависят от их начального значения, от преобразующей функции и величин весов связей. Определение структуры ИНС (структуры реализуемой ею функции) сводится к выбору подходящей модели нейрона, достаточного числа нейронов в скрытом слое, входных и выходных параметров и формы их представления на основании результатов экспериментальных расчетов.

Нейросеть используется как «черный ящик», который можно «обучать» решению задач из какого-нибудь класса. ИНС предъявляются входные данные задачи и ответ, полученный любым способом, который соответствует этим данным. ИНС должна сама построить внутри «черного ящика» алгоритм решения этой задачи, чтобы выдавать ответ, совпадающий с правильным. Чем больше различных пар «исходные данные – ответ» будет предъявлено ИНС, тем адекватнее решаемой задаче она «сконструирует» модель. После этапа обучения ИНС предполагается, что если ей предъявить ранее неизвестные исходные данные, она тем не менее выдаст правильное решение – в этом заключается способность ИНС к обобщению [3].

Процесс обучения состоит в настройке параметров сети. При этом, как правило, топология сети остается неизменной, а к настраиваемым параметрам обычно относятся параметры нейронов и величины синаптических весов. Под обучением принято понимать процесс изменения весов связей между нейронами.

Среди основных особенностей, определяющих эффективность применения ИНС при планировании расхода электрической энергии, следует отметить следующие:

способность осуществлять планирование с учетом большого количества влияющих факторов;

высокая оперативность прогнозирования за счет максимальной распараллеленности процесса обработки информации;

нечувствительность к недостатку априорной информации о динамике прогнозируемого процесса;

способность решать слабо формализованные задачи, т. е. выявление неявных аналогий прецедентов наблюдений;

способность к дообучению.

Для определения входных переменных нейронной сети при решении задачи планирования электропотребления на нетяговые нужды предлагается воспользоваться моделью, описывающей изменения во времени фактических значений расхода электроэнергии, которая в общем виде представляется нелинейной функцией:

$$W_\tau = f(W_{\tau-n}, T_{\tau-n}, \varepsilon_\tau), \qquad (3)$$

где $W_\tau$ – фактический расход электроэнергии за промежуток времени $\tau$;

$W_{\tau-n}$ – предшествующие наблюдения расхода электроэнергии;

$T_{\tau-n}$ – предшествующие наблюдения внешних факторов, влияющих на объем электропотребления;

$n$ – индекс ретроспективы данных;

$\varepsilon_\tau$ – случайная составляющая, представляющая ненаблюдаемые эффекты, влияющие на объем электропотребления.

Пилотное внедрение нейросетевой модели планирования электропотребления на нетяговые нужды предполагается осуществить в дорожном топливно-энергетическом центре Южно-Уральской железной дороги. При этом данные об изменении влияющих факторов предоставляются в НТЭЦ от структурных подразделений (рисунок 4). Контроль за планированием расхода электроэнергии осуществляется Управлением планирования и нормирования материально-технических ресурсов (ЦУНР).

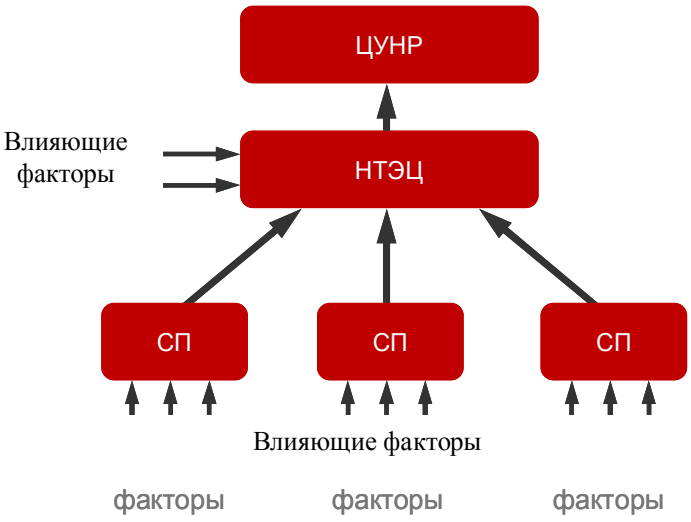



Рисунок 4 – Структурная схема функционирования нейросетевой модели планирования электропотребления

Реализация проекта по разработке системы планирования расхода электроэнергии на нетяговые нужды с использованием ИНС включает в себя пять основных этапов.

На первом этапе осуществляется исследование процесса электропотребления в конкретных условиях выбранных структурных подразделений. В результате формируется перечень факторов, которые необходимо учитывать при построении нейросетевой модели.

В качестве основных факторов, влияющих на расход электрической энергии на нетяговые нужды, принимаются следующие [4]:

– объем ремонтно-эксплуатационной работы структурного подразделения $V$;

– температура воздуха $t$;

– приведенная мощность электрооборудования, используемого в СП, $P_{\text{пр}}$.

Информация о предшествующих наблюдениях расхода электроэнергии $W_{\tau-n}$ принимается по данным АСКУЭ железнодорожных узлов.

Огромную роль при работе с нейронными сетями играет область изменения влияющих факторов. Для снижения риска появления сбоев в процессе использования ИНС обучение последней следует осуществлять с помощью выборки, содержащей близкие к минимально и максимально возможным значения выбранных входных параметров (например, все возможные диапазоны температуры, широкий выбор объемов ремонтно-эксплуатационной работы по данному структурному подразделению).

Результатом выполнения первого этапа разработки системы планирования расхода электроэнергии должны стать выборки данных для обучения и тестирования ИНС и база знаний о процессе электропотребления исследуемых данных. Эта информация используется при построении ИНС на втором этапе.

Второй этап разработки состоит в построении ИНС на основе полученных выборок и обучении нейронной сети.

Работа с нейронными сетями не вполне удобна и интуитивно понятна, поэтому на третьем этапе реализации проекта предусмотрена разработка программного обеспечения с удобным пользовательским интерфейсом. В качестве основной характеристики разрабатываемого программного обеспечения целесообразно использовать максимально возможную величину погрешности планирования (с заданной доверительной вероятностью).

Четвертый этап предполагает разработку нормативно-технической документации, которая будет включать в себя методику планирования потребления электроэнергии на основе нейронных сетей и инструкцию по использованию программного продукта.

Завершает проект пятый этап, когда осуществляется внедрение программного обеспечения в НТЭЦ и тестирование его на корректность работы.

Ожидаемый эффект от внедрения указанной системы формируется за счет повышения точности планирования и достоверности установления лимитов электропотребления и оценивается в 1 – 2 % от общих затрат на приобретение электроэнергии.

В рамках реализации предложенного проекта достигаются следующие результаты:

более эффективно используется потенциал автоматизированных систем коммерческого учета энергоресурсов;

повышение точности планирования энергоресурсов и эффективности использования денежных средств на их приобретение.

Внедрение указанной системы позволит ОАО «Российские железные дороги» перейти на качественно новый, современный уровень планирования потребления энергоресурсов, что повышает инвестиционную привлекательность компании.

*Список литературы*

1. Hippert, H. Large neural networks for electricity load forecasting: Are they overfitted? [Текст] / H. Hippert, D. Bunn, R. Souza. Int. J. Forecasting. Vol. 21, n. 3, 2005. P. 425 – 434.

2. Мунхжаргал, С. Разработка и исследование нейросетевых алгоритмов краткосрочного прогнозирования нагрузки центральной электроэнергетической системы Монголии [Текст]: Дис… канд. техн. наук. Новосибирск, 2004. – 177 с.

3. Крюков, А. В. Прогнозирование электропотребления с применением аппарата нейронных сетей [Текст] / А.В. Крюков, Н.В. Раевский, Д.А. Яковлев // Proceedings of the International conference 29-31 March 2004. Irkutsk state transport university-Technological educational institution of Athens. – Irkutsk, 2004. – P. 240 – 247.

4. Комяков, А. А. Анализ факторов, влияющих на расход электрической энергии на нетяговые нужды структурных подразделений железнодорожного транспорта [Текст] / А. А. Комяков // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – Новосибирск, 2009. – № 1. – С. 151 – 153.

УДК 621.332.31:625.1:642.078.5

В. Н. Ли, А. С. Сапов

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИНЫ ЗАЛОЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОПОР АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

*В статье рассматриваются основные факторы, влияющие на устойчивость опор контактной сети. Особое внимание уделяется проектно-строительным издержкам: низкому качеству строительных работ, отсутствию методики проверки и контроля. Для повышения контроля качества выполнения строительных работ предлагается воспользоваться методикой, базирующейся на возбуждении акустических волн ударным методом.*

Известно [1], что на устойчивость опор контактной сети оказывает влияние множество факторов: природно-климатические, техногенные и эксплуатационные.

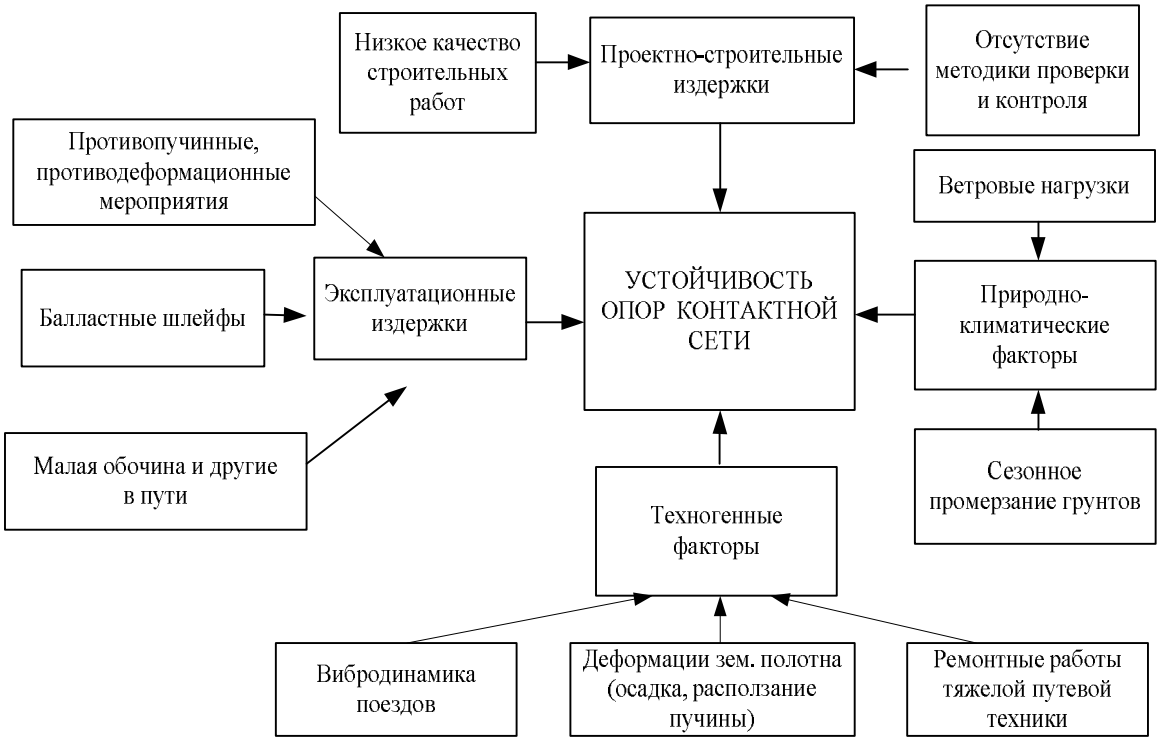



Рисунок 1 – Схема влияния различных факторов на устойчивость опор контактной сети

В представленной работе особое внимание уделяется проектно-строительным издержкам, которые приводят к нарушению устойчивости опор из-за недостаточного защемления последних в теле земляного полотна. Чаще всего этот факт имеет место в тех случаях, когда установка опор происходит на высоких насыпях или при обрубке комлевой части опоры при строительстве.

В настоящее время существует несколько способов определения заглубления опор – это метод непосредственного измерения путем частичного освобождения «подземной части» и метод визуальных измерений по длине надземной части опоры. Методы непосредственных измерений достаточно трудоемки, а в некоторых случаях вообще не допустимы. Что касается метода визуального измерения, то при его применении могут возникнуть достаточно грубые ошибки вследствие неправильного выполнения строительных работ.

Именно поэтому возникает необходимость разработки методики и устройств для определения заглубления опор контактной сети.

Учитывая сказанное выше, необходимо применять неразрушающие методы контроля, которые будут способствовать уменьшению трудозатрат и повышению уровня контроля за качеством выполнения строительных работ.

В качестве решения данной задачи предложен виброакустический метод, работающий на принципе возбуждения колебаний в измеряемом объекте [2].

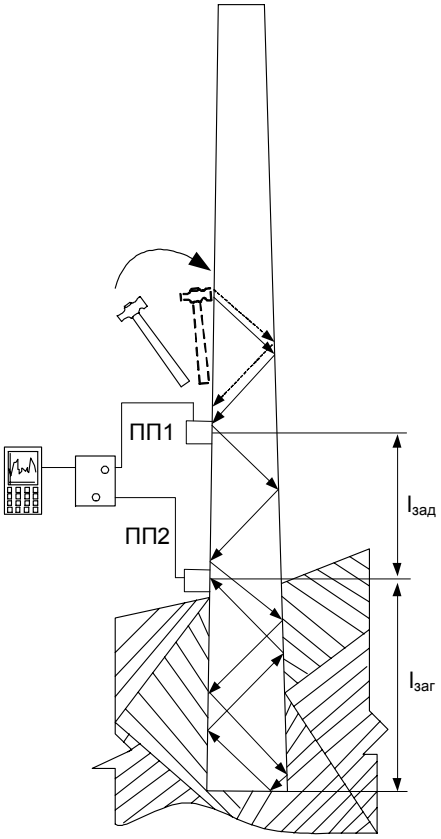



Рисунок 2 – Схема проведения виброакустических измерений на опоре

Виброакустичекий метод для измерения заглубления опор контактной сети основан на измерении скорости перемещения волны в бетонной части опоры под воздействием возмущающего удара [1]. Возникающая при этом волна сжатия отражается от комлевой части опоры (или дефектов) и возвращается к ее верхушке. Измеряя время прихода отраженной волны, можно определить и скорости ее распространения, а следовательно, и длину опоры от второго пьезопреобразователя до комля (рисунок 2).

Отработка данной методики разбита на два этапа:

расчет скорости распространения ультразвуковой волны в материале;

определение расстояния от второго пьезопреобразователя до дна опоры.

Проведенные лабораторные и натурные эксперименты позволили установить, что осуществление измерений по предложенной методике позволяет произвести вывод информации о глубине заложения опоры в грунт в виде кривых прохождения сигнала через опору (рисунок 3).

В регистрирующей аппаратуре появляются осциллограммы, которые необходимо обработать.

По осциллограммам определяются скорость расспространения звуковой волны в каждом конкретном образце, время прохождения сигнала до дна и обратно. Скорость определяют исходя из времени между запуском осциллографа по первому каналу (время испускания первичной звуковой волны верхним преобразователем) и появлением амплитуды первичного импульса на втором канале осциллографа (время прохождения импульса через нижний преобразователь).

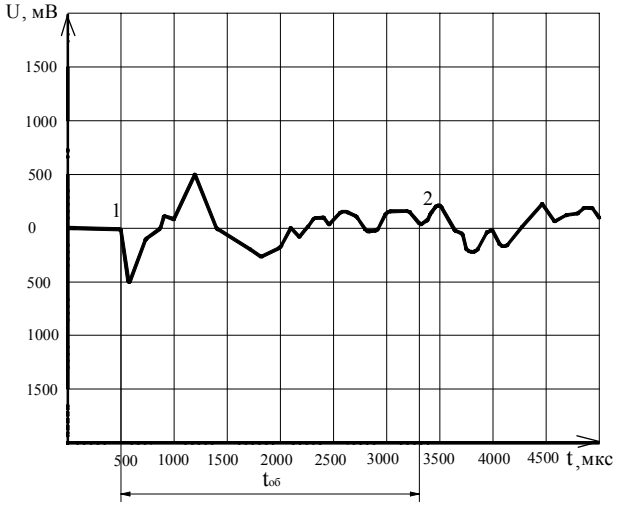



Рисунок 3 – Осциллограмма основной информационной несущей волны

Анализ полученных осциллограмм представляет определенную сложность, так как по мере прохождения волны по телу опоры сигнал затухает и изменяет свою форму вследствие влияния волновых свойств объекта. Увидеть переотраженный сигнал первоначальной формы становится сложнее, поэтому для определения глубины залегания опоры целесообразно рассчитать форму сигнала и по полученным результатам искать на осциллограмме повторяющиеся области.

Без учета волновых свойств форму сигнала можно рассчитывать по уравнению [3]:

$$u(t,x) = \left| \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f^*(\omega) e^{-\alpha(\omega)x} e^{j\omega t} dt \right|, \quad (1)$$

где ω – частота; α – коэффициент затухания, t – время; $f^*(\omega)$ – спектр исходного ультразвукового импульса.

Коэффициент затухания α вычисляется по формуле:

$$\alpha = a_0 \cdot \omega , \tag{2}$$

где $a_0$ – параметр, определяющий коэффициент затухания.

Спектр исходного ультразвукового импульса

$$f^*(\omega) = \exp(-\frac{T_и^2(\omega-\omega_0)^2}{4}), \tag{3}$$

где $\omega_0$ – резонансная частота датчика;

$T_и$ – период импульса.

После интегрирования формулы (1) получаем выражение для определения формы сигнала:

$$u(t,x) = \frac{\sqrt{2}\cdot u_0}{T_и} \exp\left( -\frac{t^2}{T_и^2} - \frac{T_и^2 \cdot \omega_0 \cdot a_0 \cdot x - a_0^2 \cdot x^2}{T_и^2} \right). \tag{4}$$

Из формулы (4) видно, что при линейной равномерности $a$ и $\omega$ форма импульса сохраняется, поэтому анализ полученных результатов сводится к точному определению одинаковых областей на осциллограмме принадлежащих первичному и переотраженному сигналам.

Реализация разработанной методики проведена в макетном образце, представленном на рисунке 4.

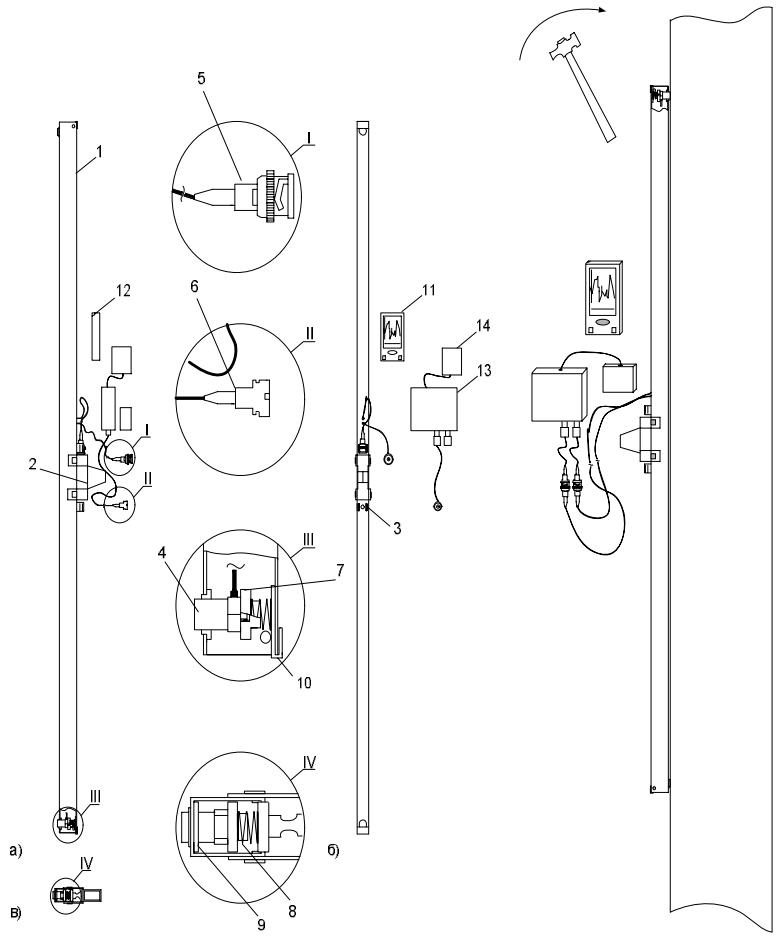



Рисунок 4 – Макетный образец устройства для оперативного измерения заглубления опор: вид спереди (а), сбоку (б) и сверху (в)

Макетный образец устройства для оперативного измерения заглубления опор должен отвечать следующим требованиям:

быстрота установки устройства на опоре;

жесткое закрепление датчиков для исключения их смещения во время измерений;

возможность изменения положения конструкции вокруг тела опоры;

простота в использовании.

В рабочее состояние данное устройство собирается следующим образом. Предварительно пьезопреобразователи, установленные в каркас устройства 1, соединяют через разъединитель 5 и разъем 6 с микропроцессорным блоком 13, который необходим для приема ультразвуковых колебаний и первоначальной обработки данных. Запитка микропроцессорного блока происходит через аккумуляторную батарею 14. Передача данных карманному персональному компьютеру 11 от микропроцессорного блока происходит по каналу блютуз.

Измерения начинаются с присоединения устройства к телу опоры и подачи с помощью ударного устройства колебаний на пьезопреобразователи.

Способ крепления макетного образца к опоре контактной сети представлен на рисунке 4.

Лабораторные и натурные эксперименты позволили сделать вывод о возможности применения данной методики для определения глубины заложения опор контактной сети в грунт в практической деятельности хозяйства электроснабжения.

*Список литературы*

1. Ли, В. Н. Неразрушающий контроль элементов контактной сети и токоприемников электроподвижного состава электрифицированных железных дорог: Монография [Текст] / В. Н. Ли, С. Н. Химухин / Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения. – Хабаровск, 2007. – 266 с.

2. Ли, В. Н. Разработка методики определения глубины заложения опор контактной сети / В. Н. Ли, А. С. Сапов // Труды всерос. конф. с междунар. участием представителей производства, ученых транспортных вузов и инженерных работников / Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения. – Хабаровск, 2010. – С. 69 – 76.

3. Кондратьев, А. И. Прецизионные методы и средства измерения акустических величин твердых сред: Монография [Текст]: В 2 ч. Ч. 2. Метрологические характеристики средств измерения и их практическое применение / А. И. Кондратьев / Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения. Хабаровск, 2006. – 156 с.

---

УДК 669.662.76

А. М. Парамонов, А. В. Кушнаренко, А. С. Гусаров

## К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

*В статье рассматриваются пути повышения тепловой эффективности и экономичности нагрева металла. Предложены методика и алгоритм технико-экономической оптимизации параметров теплового режима и конструкции печных агрегатов. Обоснована целесообразность применения разработанного алгоритма для определения оптимальных значений температуры уходящих газов на выходе из рабочего пространства нагревательной печи и температуры подогрева воздуха в рекуператоре, идущего на горение топлива, при проектировании и эксплуатации печных агрегатов. Использование данных разработок позволяет повысить тепловую эффективность и экономичность работы нагревательных печей.*

Пламенные нагревательные печи относятся к основному оборудованию кузнечных отделений предприятий железных дорог. Развитие производства поковок неразрывно связано с со-

вершенствованием технологии и средств тепловой обработки металла. В кузнечных отделениях потребление топлива, которое составляет до 14 % от общего его расхода на предприятии, характеризуется низким коэффициентом теплоиспользования, и долгосрочные прогнозы указывают на устойчивую тенденцию увеличения энергетической составляющей в себестоимости продукции. В связи с этим возникает задача повышения общей энерготехнологической эффективности кузнечного производства путем разработки высокоэффективных тепловых режимов, совершенствования конструкций печей, обеспечивающих условия для интенсификации нагрева металла, энергосбережения, оптимизации их работы. В настоящее время техническое состояние, уровень средств и технологии тепловой обработки металла в кузнечных цехах не отвечает современным требованиям достижения высоких показателей работы, качества продукции и низкого удельного расхода топлива.

Для нагрева металла под обработку давлением в кузнечных отделениях применяются нагревательные печи с камерным температурным режимом. По стоимости пламенный нагрев металла составляет значительную долю в себестоимости продукции кузнечного производства (до 35 %). Широкое распространение печей указанного типа обусловлено их универсальностью (они обеспечивают нагрев самых разнообразных заготовок), простотой конструкции, возможностью сравнительно быстро менять режим работы. Нередко по условиям производства невозможна специализация ковочного оборудования и требуется нагрев широкой гаммы заготовок. В этом случае печи с камерным режимом работы остаются единственным средством нагрева металла.

Проведенные Омским государственным университетом путей сообщения обследования печного хозяйства ряда предприятий железных дорог показали, что низкий технический уровень печей обусловлен несовершенством тепловых схем, конструкций тепловых ограждений (футеровки), применяемых систем топливоснабжения, отсутствием средств утилизации теплоты уходящих газов. Это приводит к значительному перерасходу топлива. Для камерных кузнечных печей термический КПД составляет 5 – 9 %, удельный расход условного топлива – от 425 до 500 кг на тонну нагреваемого металла. Для сравнения: аналогичные показатели для печей США, Германии, Японии: термический КПД – 40 – 45 %, удельный расход условного топлива – 40 – 85 кг/т [1]. По оценкам специалистов прогноз на использование указанных печей, учитывая тенденции развития новых технологий и оборудования для нагрева металла в нашей стране, а также экономические реалии современного производства, составляет не менее чем 25 – 30 лет. Поэтому сегодня актуальны проблемы совершенствования конструкции печей, повышения эффективности, снижения удельного расхода топлива на нагрев металла и затрат на сооружение и эксплуатацию печей, уменьшения вредных выбросов в атмосферу.

Актуальность перечисленных проблем отвечает федеральному закону «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» № 261-ФЗ от 23.11.2009 г.

Задачам повышения эффективности и качества кузнечного производства, его рационализации и интенсификации в полной мере отвечают методы оптимизации нагревательных печей, обеспечивающие принятие наиболее выгодных технических решений, достижение максимального технико-экономического эффекта (высоких технико-экономических показателей работы, экономии топлива, снижения капитальных вложений и эксплуатационных расходов).

Актуальность оптимизации работы пламенных печей объясняется еще и тем, что в нашей стране их не изготавливают на специализированных заводах, а сооружают на самих предприятиях. В связи с этим невозможно дать общие рекомендации по выбору оптимальных параметров, так как они должны определяться для конкретных производственных условий.

Проблему повышения эффективности печных агрегатов следует решать путем оптимизации их тепловой схемы и основных параметров теплового режима, конструкции отдельных элементов и агрегата в целом. Среди наиболее важных задач – определение и выбор оптимальных параметров теплового режима и конструкции нагревательной печи. Правильное решение названных задач имеет первостепенное значение, так как нагрев металла под обработку давлением является важнейшей операцией, определяющей качество и стоимость продукции.

В настоящее время отсутствуют приемлемые для использования методы определения оптимальных параметров работы печей с камерным температурным режимом. Известными методами решают задачи повышения эффективности работы печей построением усложненных математических моделей без должной комплексной увязки технических решений с экономическими факторами. Существенными их недостатками являются сложность, трудоемкость, неточность определения оптимальных соотношений между отдельными параметрами. По этой причине они не находят применения при проектировании печей.

При реализации принципов обеспечения эффективных решений при проектировании и эксплуатации нагревательных печей заложены внутренние противоречия, что обусловливает необходимость комплексного учета всех условий и накладываемых ограничений на значения оптимальных параметров.

Производительность нагревательной печи зависит от интенсивности ее работы, которая в свою очередь определяется условиями теплообмена в рабочем пространстве. Основным фактором, определяющим производительность печи, является время нагрева. Температура уходящих газов связана с продолжительностью нагрева, ее повышение приводит к увеличению производительности печи, но при этом увеличиваются потери тепла, что влияет на экономичность работы печи. В связи с широким внедрением рекуператоров представляется возможным и экономически целесообразным иметь более высокую температуру уходящих газов. Если производительность печи задана и является постоянной величиной, то интенсификация теплообмена приводит к сокращению размеров печи, т. е. к уменьшению капитальных затрат и эксплуатационных расходов. Эффективность сжигания топлива в печах может быть повышена за счет более полного использования физического тепла уходящих газов для подогрева воздуха и топлива. Однако это ведет к увеличению затрат на теплоутилизирующие устройства. Целесообразно получить максимально возможную, экономически оправданную степень рекуперации тепла дымовых газов.

Таким образом, чтобы получить наиболее приемлемую схему работы печи, надо объективно оценить ее наиболее выгодную температуру, необходимую для обеспечения технологии нагрева тел и производительности, и выбрать конструктивное оформление, которое потребует наименьших суммарных затрат.

На дисконтированные затраты по печному агрегату существенное влияние оказывают капитальные вложения в сооружение печи, рекуператора, расходы на топливо, на подачу воздуха для горения топлива, на удаление дымовых газов. Эти затраты в значительной степени определяют, при заданной и постоянной производительности, температуру уходящих газов на выходе из рабочего пространства печи и степень рекуперации их тепла.

Перечисленные факторы свидетельствуют о том, что правильный выбор температуры уходящих из рабочего пространства печи дымовых газов и степени рекуперации их тепла позволяет получить определенный технологический, экономический и экологический эффект.

На основании изложенного выше можно утверждать, что решена задача расширенной технико-экономической оптимизации печных агрегатов с камерным режимом нагрева металла. В качестве критерия оптимальности принята оценка сравнительной экономической эффективности капитальных вложений в печной агрегат по минимуму дисконтированных затрат, так как только комплексный учет капитальных затрат и эксплуатационных расходов может дать экономически правильное решение.

Разработаны методика, алгоритм оптимизации, аналитически увязывающие теплотехнические, конструктивные, режимные параметры и приведенные затраты в целом по печному агрегату. Функционал оптимизации обеспечивает достижение целесообразных теплотехнических показателей печных агрегатов при минимальных приведенных затратах с учетом изменения реальных условий эксплуатации в зависимости от конструкции, мощности и стоимости печи, конструкции и стоимости рекуператора, стоимости и вида топлива, времени использования установленной мощности и других факторов.

Использован один из классических математических методов – метод поиска оптимума путем решения системы нелинейных уравнений, полученных при приравнивании к нулю

частных производных функции по оптимизируемым параметрам, так как была поставлена задача выразить критерий оптимальности в аналитическом виде [1, 2].

В основу разработанного метода оптимизации и определения оптимальных технико-экономических параметров теплового режима и конструкции печных агрегатов положено решение системы уравнений исходя из необходимых условий оптимальности функции цели:

$$\frac{\partial З_{п}}{\partial t_{г}} = С_{т}\frac{\partial B}{\partial t_{г}} + С_{р}\frac{\partial H_{р}}{\partial t_{г}} + С_{п}\frac{\partial V_{п}}{\partial t_{г}} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial З_{р}}{\partial p} = С_{т}\frac{\partial B}{\partial p} + С_{p}\frac{\partial H_{р}}{\partial p} = 0, \quad (2)$$

где $t_{г}$ – температура уходящих газов на выходе из рабочего пространства печи; $p$ – степень рекуперации их тепла; $З_{п}$ – приведенные расчетные затраты по печному агрегату; $З_{р}$ – приведенные затраты по рекуператору и топливу; $С_{т}$ – приведенная годовая стоимость топлива; $B$ – часовой расход топлива; $С_{р}$ – приведенная годовая стоимость 1 м$^2$ поверхности нагрева рекуператора; $H_{р}$ – поверхность нагрева рекуператора; $С_{п}$ – приведенная годовая стоимость 1 м$^3$ рабочего пространства печи; $V_{п}$ – объем рабочего пространства печи.

Возможны следующие решения задачи технико-экономической оптимизации печных агрегатов:

1) при фиксированной по внешним обстоятельствам температуре уходящих газов на выходе из рабочего пространства решением уравнения (2) определяется экономически наиболее выгодная степень рекуперации их тепла $P_{опт}$;

2) при фиксированной степени рекуперации тепла уходящих газов (например, заданы рекуператор или проектная степень рекуперации и т. п.) решением уравнения (1) определяется оптимальная температура уходящих газов на выходе из рабочего пространства печи $t_{г\ опт}$;

3) совместным решением уравнений (1) и (2) определяется $t_{г\ опт}$ и $P_{опт}$ таким образом, чтобы оптимальной температуре уходящих газов на выходе из рабочего пространства печи соответствовала экономически наиболее выгодная степень рекуперации их тепла.

Известно, что повышение температуры подогрева воздуха для горения топлива ведет к повышению температурного уровня в рабочем пространстве печи, интенсификации теплообмена. При заданной и постоянной производительности печи любое изменение степени рекуперации тепла дымовых газов (температуры подогрева воздуха) приведет к изменению температуры уходящих газов на выходе из рабочего пространства печи. Чтобы поддерживать температуру уходящих газов на заданном уровне, необходимо при неизменных условиях изменять температуру газов в рабочем пространстве печи, увеличивая или уменьшая расход топлива на нагрев металла, тогда сохраняются условия внешнего теплообмена печи на заданном уровне. Поэтому первый подход к решению задачи оптимизации не затрагивает самой нагревательной печи, так как неизменными остаются условия теплообмена в рабочей камере и, следовательно, размеры печи. В этом случае минимизируются только приведенные затраты на рекуператор и топливо.

При втором подходе к решению задачи оптимизации рассчитываются только минимальные капитальные затраты на печь без анализа влияния изменения температуры уходящих газов на выходе из рабочего пространства печи на рекуператор и топливо, а следовательно, и в целом на приведенные затраты по печному агрегату. Ведь произвольно фиксированная или возможная степень рекуперации, очевидно, не всегда является экономически наиболее выгодной.

Таким образом, первые два подхода решают только частную задачу технико-экономической оптимизации. Более полное решение задачи комплексной оптимизации печных агрегатов достигается лишь в том случае, когда каждому оптимальному значению температуры уходящих газов на выходе из рабочего пространства печи соответствует экономически наиболее выгодная степень рекуперации их тепла. Это обеспечивается совместным решением уравнений (1) и (2). Вначале из уравнения (2) определяется экономически наибо-

лее выгодная степень рекуперации тепла уходящих газов для любого возможного значения их температуры на выходе из рабочего пространства печи. Затем, подставляя для конкретного значения $t_г$ найденное значение $p_{опт}$, из уравнения (2) определяют оптимальную температуру уходящих газов на выходе из рабочего пространства печи. При этом решении минимизируются приведенные затраты по печному агрегату в целом, т. е. одновременно устанавливаются рациональный расход топлива и целесообразные затраты на рекуператор, экономически наиболее выгодные размеры рабочего пространства печи, обеспечивается достижение наилучших технико-экономических показателей работы печного агрегата.

Данный подход к решению уравнений (1) и (2) и принят за основу при определении оптимальных параметров тепловых режимов печных агрегатов.

Расчетные уравнения для определения оптимальной температуры уходящих газов на выходе из рабочего пространства печи и экономически наиболее выгодной степени рекуперации их теплоты получены для нагрева термически «тонких» и «массивных» тел путем подстановки в уравнение (1) выражения для определения объема рабочего пространства печи, поверхности нагрева рекуператора, расхода топлива в виде функции от $t_г$:

$$V_п = f(t_г); \quad (3)$$
$$H_р = f(t_г); \quad (4)$$
$$B = f(t_г), \quad (5)$$

а в уравнении (1) в виде функции от $p$:

$$H_р = f(p); \quad (6)$$
$$B = f(p). \quad (7)$$

После дифференцирования слагаемых уравнения (1) по $t_г$, а уравнения (2) по $p$ для случая нагрева термически «тонких» тел имеем:

$$\begin{cases} C_т \dfrac{DM}{(E_1 - Mt_г)^2} + C_р \dfrac{D\eta_в}{k_{\Delta t} + {}'_г} \dfrac{d_1 t_г^2 + d_2 t_г + f}{E_1 - Mt_г{}^2\ U' + W' t_г{}^2} + \\ + C_п \dfrac{qB_1}{2\sqrt{B_1 t_г + N}[(B_1 t_г + N)^2 - T_м^4]} \left[ \left( 1 - \dfrac{4(B_1 t_г + N)[(B_1 t_г + N) - T_м\sqrt{B_1 t_г + N}]}{(B_1 t_г + N)^2 - T_м^4} \right) \times \right. \\ \left. \times \ln \dfrac{\sqrt{B_1 t_г + N} - T_{мн}}{\sqrt{B_1 t_г + N} - T_{мк}} - \dfrac{(\sqrt{B_1 t_г + N} - T_м)(T_{мк} - T_{мн})}{(\sqrt{B_1 t_г + N} - T_{мк})(\sqrt{B_1 t_г + N} - T_{мн})} \right] = 0; \\ ap^2 + bp + d = 0, \end{cases} \quad (8)$$

для нагрева термически «массивных» тел –

$$\begin{cases} C_т \dfrac{DM}{(E_1 - Mt_г)^2} + C_р \dfrac{D\eta_в}{k\varepsilon_{\Delta t}(1+\theta)C'_г} \dfrac{d_1 t_г^2 + d_2 t_г + f}{(E_1 - Mt_г)^2 (U' + W' t_г)^2} + C_п \dfrac{q' B_1}{2\sqrt{B_1 t_г + N}} \times \\ \times \left\{ \dfrac{10^8}{C_{гкм}} \cdot \dfrac{[(B_1 t_г + N)^2 - T_м^4] - 4(B_1 t_г + N)[(B_1 t_г + N) - T_м\sqrt{B_1 t_г + N}]}{[(B_1 t_г + N)^2 - T_м^4]^2} \ln \dfrac{\sqrt{B_1 t_г + N} - T_{мн}}{\sqrt{B_1 t_г + N} - T_{мк}} - \right. \\ \left. - \left[ \dfrac{10^8 (\sqrt{B_1 t_г + N} - T_м)}{C_{гкм}[(B_1 t_г + N)^2 - T_м^4]} + \dfrac{S}{(k_1 + 2)\lambda} \right] \cdot \dfrac{T_{мк} - T_{мн}}{(\sqrt{B_1 t_г + N} - T_{мк})(\sqrt{B_1 t_г + N} - T_{мн})} \right\} = 0; \\ ap^2 + bp + d = 0. \end{cases} \quad (9)$$

В системах уравнений (8), (9) коэффициенты $D, M, E_1, d_1, d_2, f, U`, W`, B_1, q, a, b, d, q`$ определяются из выражений, приведенных в работе [4].

С определением $t_{г\ опт}$ и $P_{опт}$ представляется возможным найти оптимальные значения температуры подогрева воздуха в рекуператоре $t^{``}_{в\ опт}$ и дымовых газов за рекуператором $t^{``}_{г}$.

Системы уравнений (8) и (9), полученные в результате выполнения необходимых условий оптимальности (1) и (2), не гарантируют минимума функции двух переменных $З(t_г, p)$. Для того чтобы убедиться в достоверности полученных решений, нужно проверить их на достаточность [1, 2]. С этой целью были проведены исследования на существование (или отсутствие) экстремума в испытываемой стационарной точке. Проверка выполнения условия положительной определенности целевой функции производилась путем взятия вторых производных от выражения (2) по степени рекуперации тепла уходящих газов и выражения (1) по температуре уходящих газов на выходе из рабочего пространства печи. Многократные вычисления величин $\frac{\partial^2 З_р}{\partial p^2}$ и $\frac{\partial^2 З_п}{\partial t_г^2}$ при различных значениях оптимальной температуры уходящих газов на выходе из рабочего пространства печи и экономически наиболее выгодной степени рекуперации их теплоты показали, что во всех рассмотренных случаях они всегда положительны. Следовательно, одновременно выполняются необходимые и достаточные условия существования экстремума функции двух переменных $З(t_г, p)$.

Проверка достаточности условий (1) и (2) производилась также предварительным исследованием целевой функции при отладочных расчетах посредством выдачи на печать результата каждого шага поиска. В процессе проведения расчетов по определению значений оптимальных параметров работы печных агрегатов вычислялась величина приведенных затрат в окрестностях экстремальной точки. Одновременно отыскивались все внутренние точки, «подозрительные» по экстремуму, для которых также вычислялась величина приведенных затрат и сравнивалась с величиной приведенных затрат для полученных значений $t_{г\ опт}$ и $p_{опт}$. При этом решение имеется лишь в том случае, если выполняется неравенство $З_1 < З < З_2$, где $З, З_1, З_2$ – соответственно величины дисконтированных затрат при оптимальных значениях параметров и в окрестностях экстремальной точки.

Параметры печного агрегата не могут принимать совершенно произвольные значения, а могут изменяться в пределах физически возможных и технически осуществимых состояний энергоносителей и конструкций. Поэтому полученные алгоритмы справедливы с учетом ряда ограничений. К их числу относятся ограничения по температуре печи, уходящих газов на выходе из рабочего пространства печи, температуре подогрева воздуха в рекуператоре и др. Возможность выхода оптимизируемых параметров в процессе расчета за ограничения контролируется. Теплотехнические, расходные и конструктивные параметры в процессе оптимизации могут лишь принимать такие значения, которые находятся внутри или на границе допустимой области. Четкое указание допустимой области изменения параметров входит в математическое их определение и является необходимым условием при решении задачи оптимизации печных агрегатов. Например, ограничения по температуре печи учитываются исходя из условия обеспечения необходимого качества нагрева металла. При расчете оптимальных параметров по алгоритму для «массивных» тел вводится ограничение на «массивность» тела, определяемое критерием Старка, в котором контролируемым параметром является эффективная температура печи. Как показали проведенные исследования, область рационального применения указанного алгоритма определяется значением $0{,}25 \le Sk \le 0{,}95$. При выходе за границы допустимой области расчет прекращается и параметр фиксируется.

Реализация полученных результатов осуществлена при проектировании реконструкции печных агрегатов производительностью 1200 и 600 кг/ч, предназначенных для нагрева стальных заготовок до 1200 $^{o}$C. Каждый из печных агрегатов до реконструкции включал в себя камерную нагревательную печь, рекуператор, механизм загрузки и выгрузки заготовок из печи, тягодутьевые устройства, щит теплового контроля.

В процессе разработки и проектирования реконструированных печных агрегатов в качестве исходных данных принимались оптимальные параметры, рассчитанные по предложенной методике и алгоритмам. Значения оптимальных технико-экономических параметров составили: $t_{г\ опт}$ = 1330 – 1338 °С, оптимальная температура подогрева воздуха $t''_{в\ опт}$ = 450 – 485 °С. Температура в печах была повышена за счет увеличения температуры уходящих газов на выходе их из рабочего пространства (на 60 – 85 °С) и температуры подогрева воздуха в рекуператорах. Это позволило интенсифицировать нагрев металла, значительно повысить тепловую эффективность и экономичность работы печных агрегатов. Площадь пода была уменьшена в 1,88 – 2,13 раза за счет увеличения напряженности пода (удельной производительности печи), удельный расход топлива снизился на 46 – 47 %, угар стали уменьшился на 34 – 38 %.

Таким образом, результаты работы показали целесообразность применения печных агрегатов с оптимальными технико-экономическими параметрами теплового режима. Разработанные метод и алгоритмы оптимизации рекомендуются для практического использования при проектировании новых и модернизации существующих печных агрегатов.

*Список литературы*

1. Овчаренко, Е. Г. Энергосбережение в нагревательных и термических печах машиностроения и других производств [Текст] / Е. Г. Овчаренко, В. И. Бербенев, В. Н. Асцатуров // Материалы 2-й междунар. конф. «Автоматизированные печные агрегаты и энергосберегающие технологии в металлургии» / МИСиС. – М., 2002. – С. 29 – 33.

2. Бояринов, А. И. Методы оптимизации в химической технологии. [Текст] / А. И. Бояринов, В. В. Хазаров. – М.: Химия, 1975. – 458 с.

3. Левенталь, Г. Б. Оптимизация теплоэнергетических установок [Текст] / Г. Б. Левенталь, Л. С. Попырин. – М.: Энергия, 1970. – 249 с.

4. Парамонов, А. М. К определению оптимальных параметров теплового режима нагревательных печей с камерным режимом нагрева металла [Текст] / А. М. Парамонов // Известия вузов. Черная металлургия. 1978. – № 4. – С. 119 – 123.

---

УДК 656.25: 519.171

М. М. Соколов

## КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

*В статье рассматриваются вопросы контроля качества электрической энергии, питающей устройства автоматики железных дорог. Предложена методика оценки качества электрической энергии с использованием математического аппарата векторной алгебры и теории графов.*

Наряду с надежностью электроснабжения качество электроэнергии (КЭ) является решающим фактором для безотказной работы автоматизированных систем. В связи с этим КЭ все чаще становится одним из основных критериев оценки экономического ущерба, связанного с отказами устройств по причине некачественного электроснабжения. Поэтому постоянный контроль и протоколирование КЭ необходим как для поставщика электроэнергии, так и для конечного пользователя. Не является исключением и железнодорожный транспорт, от качественного электроснабжения которого зависят безопасность и эффективность пассажирских и грузовых перевозок.

Безопасность и бесперебойность движения поездов определяются надежностью функционирования работы устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ). Для их надежной работы требуется обеспечение постоянного качественного напряжения на вводах аппаратуры и выполнение полного объема планово-профилактических и восстановительных работ в соответствии с Инструкцией по техническому обслуживанию и ремонту устройств электроснабжения ЖАТ. Невыполнение этого условия приводит к сокращению сроков службы устройств, что наносит экономический ущерб, связанный с необходимостью поиска и замены отказавших устройств, а также с устранением последствий отказов. На рисунке 1 представлены диаграммы отказов устройств ЖАТ по Западно-Сибирской железой дороге и по всей сети железных дорог РФ [1]. Из диаграмм на рисунке 1 видно, что на Западно-Сибирской железной дороге доля отказов, связанных с электропитанием, составляет 8 %, а по сети дорог она возрастает до 11 % .

Задача рационального использования электроэнергии, а также обеспечения нормальной работы потребителей требует непрерывного наблюдения за режимом работы энергосистемы, о котором можно судить по показателям качества электрической энергии (ПКЭ), определяемым на основании измеренных величин.

Спецификой электроснабжения является непостоянство во времени показателей его качества, что при существующем графике контроля делает проблематичным фиксацию всех случаев выхода этих показателей за установленные нормы. Решением названной задачи может быть непрерывный контроль качества электроэнергии, питающей устройства ЖАТ.

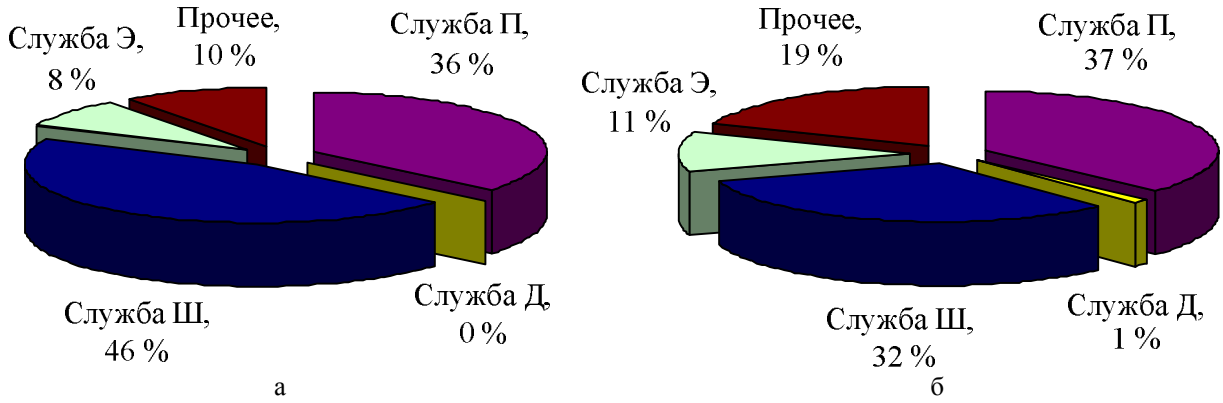



Рисунок 1 – Диаграммы отказов устройств ЖАТ: а – Западно-Сибирская железная дорога; б – ОАО «РЖД»

С целью повышения эффективности контроля качества электрической энергии автором предлагается ввести один комплексный показатель оценки качества электропитания по ряду показателей на основе математического аппарата векторной алгебры, что позволит вести непрерывный контроль общего качества электропитания перегонных устройств, а также прогнозировать предотказные состояния.

Комплексный показатель каждого источника электропитания, определяющийся по совокупности показателей качества [2], предлагается представлять вектором качества электрической энергии (ВКЭ), построенным в базисе этих показателей. На рисунке 2 приведен пример построения ВКЭ $\overline{K}$ в базисе двух показателей качества ($K_1$, $K_2$), где $k_1$, $k_2$, – приведенные мгновенные значения $ПКЭ_1$, $ПКЭ_2$ соответственно.

Длина и угол наклона ВКЭ для двух показателей будет рассчитываться по формулам [3]:

$$|K| = \sqrt{k_1^{\,2} + k_2^{\,2}}; \quad (1)$$

$$\varphi = \operatorname{arctg}\left(\frac{k_2}{k_1}\right). \quad (2)$$

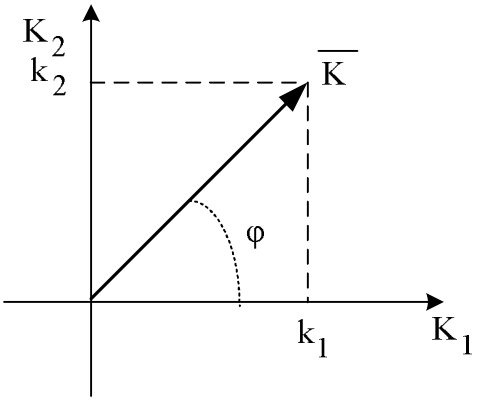



Рисунок 2 – Построение вектора качества электрической энергии

По длине ВКЭ можно предварительно оценить КЭ источника: чем меньше длина, тем более качественная электрическая энергия поступает потребителю. По углу наклона вектора $\overline{K}$, в свою очередь, можно определить вклад каждого из контролируемых показателей на КЭ в целом.

Рассмотрим использование ВКЭ на примере двух контролируемых показателей: отклонения напряжения ($\Delta U$) и отклонения частоты ($\Delta f$). На рисунке 3 представлена область всех возможных значений, которые могут принимать контролируемые параметры, с учетом значений нормально допустимых и предельно допустимых отклонений согласно рекомендациям работы [1].

Эта область условно разбита на сегменты, каждый из которых по-разному характеризует КЭ, питающей устройства железнодорожной автоматики. По сегменту, в котором находится вершина $\overline{K}$, можно судить о КЭ и сделать вывод о режиме электроснабжения устройств железнодорожной автоматики.

Каждый сегмент имеет свое численное обозначение, формирующееся из номера столбца и номера ряда, в которых в данный момент времени находится вершина ВКЭ, это обозначение может использоваться в качестве передаваемой информации от контролируемых объектов.

Определение сегмента, в котором в текущий момент времени находится вершина ВКЭ, предлагается определять путем сравнения с векторами, соответствующими центру каждого сегмента:

$$N \leftarrow \min(\Delta K_{ij}); \tag{3}$$

$$\Delta K_{ij} = \left|\overline{K} - \overline{K_{ij}}\right|, \tag{4}$$

где $K_{ij}$ – вектор центра сектора $ij$.

Вершина ВКЭ будет находиться в том сегменте, для которого $\Delta K_{ij}$ будет минимальным. Для примера на рисунке 3 $\Delta K_{ij}$ имеет меньшее значение в секторе «11».

Соответствие или несоответствие качества электрической энергии требования ГОСТ 13109-97 [2]. определяется по 11 показателям качества электрической энергии. В случае если питание происходит от однофазной сети переменного тока, количество ПКЭ уменьшается до девяти. Экспериментальные исследования, проведенные на станциях и перегонах Омского отделения Западно-Сибирской железной дороги, показали, что наибольшее влияние на работу устройств железнодорожной автоматики оказывают следующие ПКЭ: отклонение напряжения, отклонение частоты и несинусоидальность напряжения. Выход значений этих ПКЭ за предельно допустимые значения может привести к нарушению работы устройств железнодорожной автоматики. Выход напряжения за предельные нормы угрожает ложной свободностью и ложной занятостью рельсовых цепей, снижением видимости светофоров и выходом приборов из строя. Несинусоидальность напряжения и отклонение частоты в первую очередь влияет на работу преобразователей частоты в рельсовых цепях 25 Гц. Причиной сбоев автоматической локомотивной сигнализации часто является неустойчивое питание рельсовых цепей, возникающее как от колебаний напряжения в энергосистеме, так и от потерь контакта на разъединителях. Практически при снижении питающего напряжения ниже 210 В возможны сбои автоматической локомотивной сигнализации от уменьшения сигнального тока в конце длинной рельсовой цепи. Кратковременный перерыв питания при переключениях фидеров машинистами локомотивов часто тоже отмечается как сбой автоматической локомотивной сигнализации.

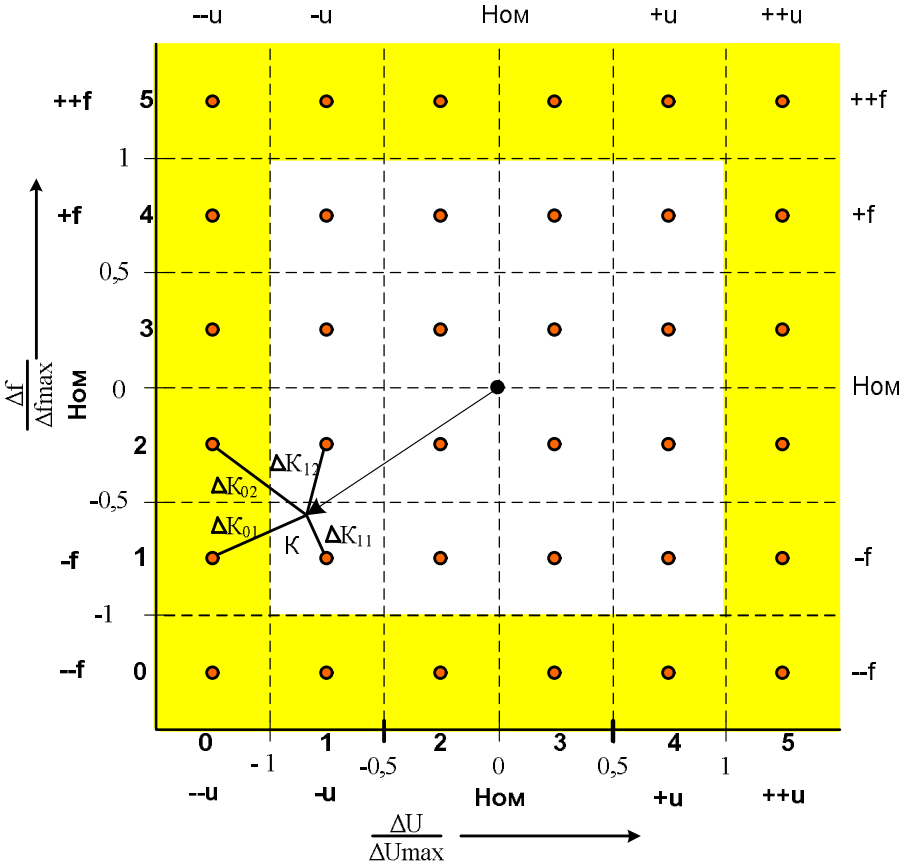



Рисунок 3 – Распределение сегментов КЭ

При оценке КЭ по трем показателям – отклонению напряжения, отклонению частоты и коэффициенту несинусоидальности ($k$) – вся область значений разбивается на трехмерные (кубические) сегменты (рисунок 4).

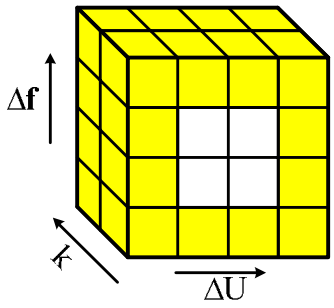



Рисунок 4 – Разбиение области значений на сегменты КЭ

Возможную смену состояний КЭ – режимов электроснабжения – удобнее представлять в виде графа [4]. На рисунке 5 представлен фрагмент графа режимов электроснабжения, где каждая вершина обозначает определенный сегмент области допустимых значений ВКЭ, построенного по трем ПКЭ. Для наглядности и упрощения графа принято, что одновременно может измениться только один ПКЭ.

Для предлагаемых графов режимов электроснабжения приняты следующие условные обозначения:

«0» – оптимальное состояние КЭ. Все ПКЭ находятся в пределах нормально допустимых значений;

«+u», «+f», «+k» – предаварийное состояние. Значение ПКЭ превышает нормально допустимое значение в сторону увеличения, но не выходит из области предельно допустимых значений;

«-u», «-f» – предаварийное состояние. Значение ПКЭ превышает нормально допустимое значение в сторону уменьшения, но не выходит из области предельно допустимых значений;

«++u», «++f», «++k» – аварийное состояние. Значение ПКЭ превышает предельно допустимое значение в сторону увеличения;

«--u», «--f» – аварийное состояние. Значение ПКЭ превышает предельно допустимое значение в сторону уменьшения.

Серым цветом выделены вершины графа, для которых КЭ не удовлетворяет требованиям, указанным в источнике [3].

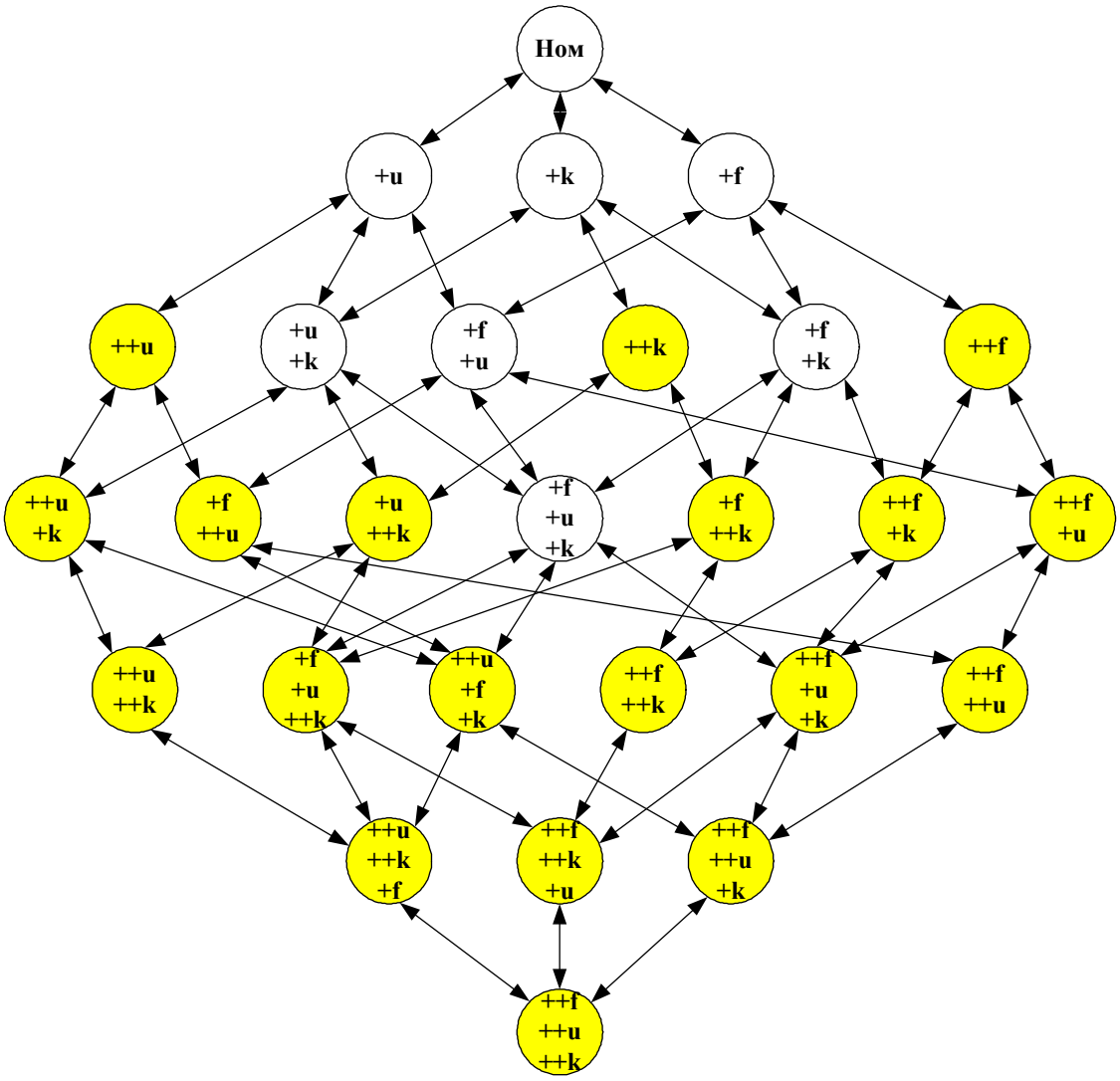



Рисунок 5 – Граф режимов электроснабжения

Каждому режиму электроснабжения (вершина графа) можно присвоить численное значение в соответствии с рисунком 3, которое необходимо использовать в качестве передаваемой информации по линии связи и тем самым вести предварительную оценку КЭ в реальном времени.

На работу различных устройств, в том числе устройств автоматики, каждый ПКЭ в отдельности будет оказывать неодинаковое влияние. Так, например, лампы светофоров более чувствительны к отклонению напряжения, в то время как отклонение частоты и несинусоидальность практически не оказывают влияния на их работу. Для преобразователей частоты, в свою очередь, отклонение напряжения не так критично, как наличие несинусоидальности или отклонение частоты. Однако для любых типов устройств автоматики режим работы при снижении напряжения является более благоприятным, чем режим работы при повышенном напряжении. Это связано в первую очередь с тем, что при перенапряжении возможно повреждение устройств обеспечения безопасности движения поездов, что может привести к аварии.

Таким образом, для различных групп устройств автоматики можно получить собственные графы режимов электроснабжения, объединяя идентичные вершины графа, представленного на рисунке 5.

В качестве примера ниже приведены графы режимов электроснабжения для светофорной лампы (рисунок 6) и преобразователя частоты (рисунок 7). Цвет вершины графа оценивает надежность работы устройства автоматики при данном режиме электроснабжения.

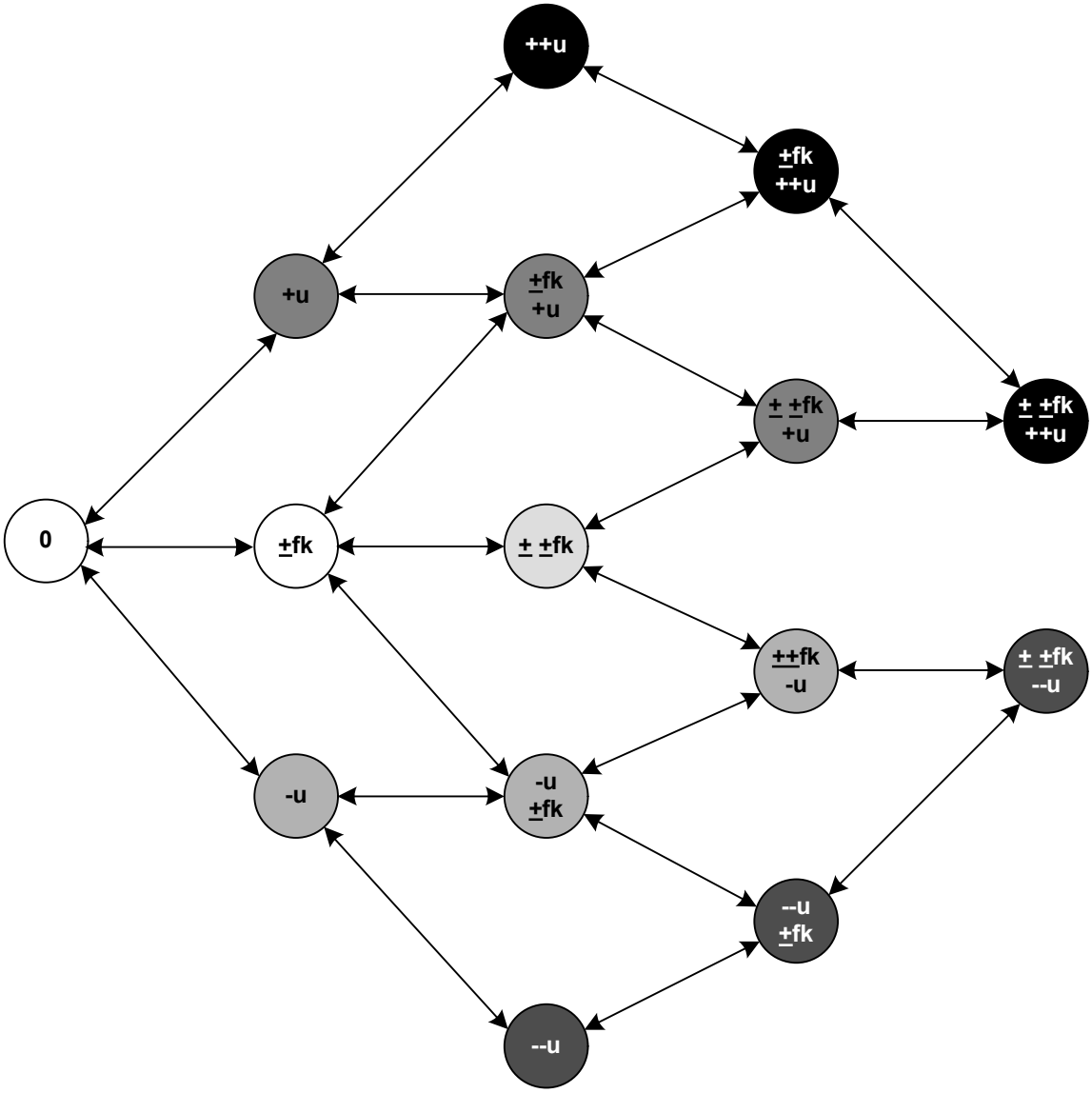



Рисунок 6 – Граф режимов электроснабжения ламп светофоров

Степень влияния того или иного режима электроснабжения на работу каждого устройства можно определить методом экспертных оценок [5].

Предлагаемые графы режимов электроснабжения для различных устройств автоматики рекомендуется использовать для следующих целей:

для оценки режима электроснабжения при определенном типе (группе) устройств в реальном времени;

анализа причин отказа конкретного устройства;

как исходную информацию для устройств автоматического переключения источников электропитания устройств автоматики.

Применение графов режимов электроснабжения для различных устройств автоматики электрифицированных железных дорог позволит получить наглядное представление о режиме электроснабжения конкретной группы устройств автоматики в данный момент времени, а также облегчит поиск причины отказа устройства вследствие некачественной электрической энергии.

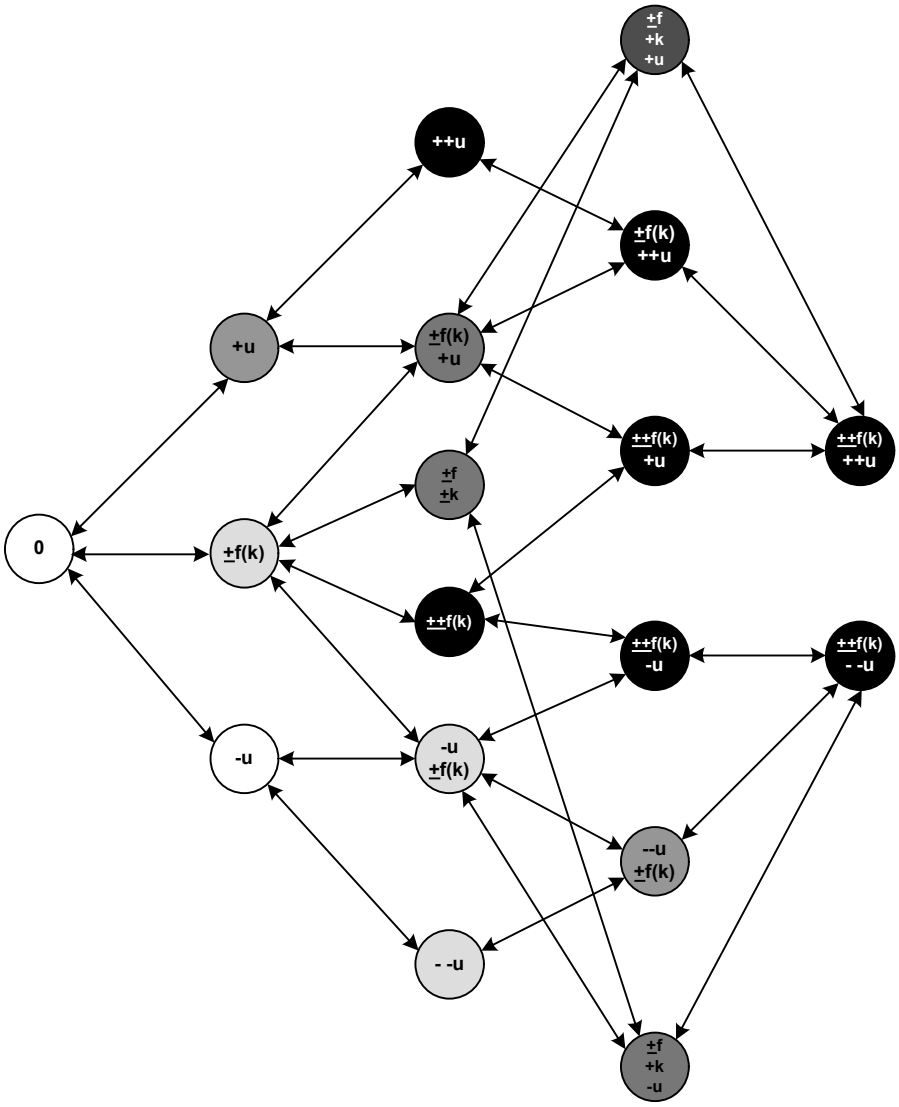



Рисунок 7 – Граф режимов электроснабжения преобразователя частоты

*Список литературы*

1. Борисенко, Д. В. Многоуровневый мониторинг параметров качества электроэнергии как средство энерго- и ресурсосбережения в сетях электроснабжения [Текст] / Д. В. Борисенко, С. В. Гришечко, М. М. Соколов // Энерго- и ресурсосбережение в структурных подразделениях Западно-Сибирской железной дороги: Материалы науч.-практ. конф. – Омск, 2008. – С. 103 – 109.

2. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1998. – 30 с.

3. Привалов, И. И. Аналитическая геометрия: Учебник [Текст] / И. И. Привалов. СПб: Лань, 2005. – 299 с.

4. Осис, Я. Я. Диагностирование на граф-моделях: на примерах авиационной и автомобильной техники [Текст] / Я. Я. Осис. – М.: Транспорт, 1991. – 244 с.

5. Мыльник, В. В. Исследование систем управления [Текст]: Учебное пособие / В. В. Мыльник, Б. П. Титаренко, В. А. Волочиенко. – М.: Академический проект; Трикста, 2004. – 351 с.

УДК 004.772

Е. Б. Квиткова, Е. И. Маркова

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМ БЕСПРОВОДНОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО ДОСТУПА ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ВИДЕОДАННЫХ

*Современные алгоритмы видеокодирования отличаются производительностью источника. Следовательно, основная задача состоит в поиске компромисса между производительностью источника и пропускной способностью канала. В статье предлагается использовать системы беспроводного широкополосного доступа для передачи видеоданных.*

Основная задача теории связи состоит в поиске методов передачи и приема, обеспечивающих получение требуемой верности принятого сообщения, повышение скорости передачи данных и понижение стоимости системы. В зависимости от конкретных условий постановка этой задачи, так же, как и ее решение, бывает разной. Например, перед инженерами, проектирующими системы передачи информации и разрабатывающими соответствующую аппаратуру, может стоять задача обеспечения максимальной верности принятого сообщения при заданной скорости передачи и мощности сигнала [1]. Целью данной статьи является анализ технических возможностей для передачи видеосигнала по радиоканалу на современном этапе.

Рассматриваемая система связи будет включать в себя канал связи вместе с источником сообщения и его получателем при заданных методах преобразования сообщения в сигнал и восстановления сообщения по принятому сигналу. Единственной характеристикой источника информации, которая нас будет интересовать, является понятие производительности источника, определенное в работе [1]. Производительность наиболее часто используемых источников представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Производительность видеоисточника без сжатия, Мбит/с

| Разрешение кадра, пикселей | Частота кадров, кадр/с | | |
|---|---|---|---|
| | 30 (24 цветовых бита) | 24 (32 цветовых бита) | 25 (32 цветовых бита) |
| 1280×1024 | 900 | 960 | 1000 |
| 1280×720 | 633 | 675 | 703 |
| 720×576 | 285 | 304 | 316 |
| 640×480 | 211 | 225 | 234 |
| 352×576 | 139 | 148,5 | 155 |
| 352×288 | 69,6 | 74 | 77 |
| 352×240 | 58 | 62 | 64 |
| 320×240 | 53 | 56 | 58,6 |
| 176×144 | 17,4 | 18,6 | 19,3 |
| 160×120 | 13 | 14 | 14,6 |

Таблица 2 – Производительность видеоисточника после кодирования, Мбит/с

| Название кодека | Разрешение кадра, пикселей, × частота кадров, кадр/с | Производительность источника, Мбит/с | Коэффициент сжатия |
|---|---|---|---|
| MPEG-1 | 352×240×30 | 1,5 | 38,67 |
| | 352×288×25 | | 51,33 |
| H.261 | 352×288×30 | 0,04 – 2 | 34,8 – 1740 |
| | 176×144×30 | | 8,7 – 435 |
| MPEG-2 | Универсальный | 3 – 15 | Нет данных |
| MPEG-3 Не принят | Телевидение высокой четкости | 20 – 40 | Нет данных |
| MPEG-4 | Универсальный | 0,0048 – 20 | Нет данных |

На современном уровне развития техники обеспечить передачу такого потока информации проблематично, поэтому применяют различные алгоритмы сжатия (кодирования). В таблице 2 представлены значения производительности кодеков и коэффициента сжатия видеоданных [2].

Сравнение кодеков по соответствующей им производительности источника было проведено лабораторией компьютерной графики и мультимедиа МГУ в мае 2010 г. Объект исследования в терминах теории информации называется производительностью источника [1]. Результаты сравнения представлены в процентном соотношении в таблице 3, где за основу взята производительность источника, соответствующая кодеку *XviD*. В таблице 3 степень сжатия для каждого из кодеков представляет собой отношение его производительности к фиксированному усредненному значению для *XviD*. Таким образом, меньшая степень сжатия соответствует меньшей производительности кодека.

Таблица 3 – Производительность разных кодеков относительно *XviD*

| Название кодека | Степень сжатия, % |
|---|---|
| x264 | 60 |
| MainConcept AVC/H.264 Video Encoder Console Application | 72 |
| DivX AVC/H.264 Video Encoder | 75 |
| Intel® MediaSDK AVC/H.264 transcoder sample appication | 84 |
| Elecard AVC Video Encoder 8-bit edition | 86 |
| XviD raw mpeg4 bitstream encoder | 100 |
| Theora encoder | 122 |

Следует отметить, что реализованный по стандарту *MPEG-4* кодек *XviD* имеет различные профили работы, определяемые параметрами видео. Степень сжатия для каждого профиля и соответствующие значения производительности видеоисточника приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Профили и производительность кодека *XviD*

| Название профиля | | Разрешение кадра, пикселей, × частота кадров, кадр/с | Производительность без сжатия, Мбит/с | Производительность после сжатия, Мбит/с | Коэффициент сжатия |
|---|---|---|---|---|---|
| Простой | 0,1 | 176×144×15 | 11,602 | 0,060 | 193,37 |
| | 2 | 352×288×15 | 46,406 | 0,125 | 371,25 |
| | 3 | 352×288×15 | 46,406 | 0,375 | 123,75 |
| Расширенный простой | 0,1 | 176×144×30 | 23,203 | 0,125 | 185,6 |
| | 2 | 352×288×15 | 46,406 | 0,375 | 123,75 |
| | 3 | 352×288×30 | 92,813 | 0,750 | 123,75 |
| | 4 | 352×576×30 | 185,625 | 2,930 | 63,35 |
| | 5 | 720×576×30 | 379,688 | 7,813 | 48,6 |
| DivX | Карманный | 176×144×15 | 11,602 | 0,525 | 22,1 |
| | Портативный NTSC | 352×240×30 | 77,344 | 4,740 | 16,34 |
| | Портативный PAL | 352×288×25 | 77,344 | 4,740 | 16,32 |
| | Домашний кинотеатр NTSC | 720×480×30 | 316,406 | 4,740 | 66,75 |
| | Домашний кинотеатр PAL | 720×576×25 | 316,406 | 4,740 | 66,75 |
| | HDTV | 1280×720×30 | 843,750 | 9,481 | 89,00 |

Помимо источника сообщения нас интересует еще и канал связи, основным показателем которого является пропускная способность. Так как источник видеоданных является

дискретным источником сообщения, то в соответствии с теоремой кодирования Шеннона сообщения всякого дискретного источника могут быть закодированы сигналами на входе канала и восстановлены по сигналам на выходе канала с вероятностью ошибки, сколь угодно близкой к нулю, если производительность источника не превышает пропускной способности канала [1]. Таким образом, возникает проблема соотнесения пропускной способности канала и производительности источника, т. е. задача сводится к выбору канала связи, по которому будет передаваться видеосигнал.

Передать видеосигнал можно с использованием технологии беспроводного широкополосного доступа на основе *WiMax* (стандарт *IEEE* 802.16). На физическом уровне стандарт предусматривает три различных метода передачи данных – метод модуляции одной несущей, методы модуляции *OFDM* с 256 несущими и *OFDMA* с 2048 несущими.

В таблице 5 представлены характерные значения пропускной способности канала в режиме модуляции одной несущей в зависимости от ширины канала и вида модуляции.

Таблица 5 – Пропускная способность в режиме модуляции одной несущей, Мбит/с

| Ширина канала, МГц | Пропускная способность, Мбит/с | | |
|---|---|---|---|
| | QPSK | 16QAM | 64QAM |
| 20 | 32 | 64 | 96 |
| 25 | 40 | 80 | 120 |
| 28 | 44,8 | 89,6 | 134,4 |

Соответствующие различным видам модуляции значения пропускной способности канала в режиме модуляции *OFDM* приведены в таблице 6, где $T_g$ – длительность защитного интервала передаваемого символа в долях от длительности его полезной части.

Таблица 6 – Пропускная способность в режиме *OFDM*, Мбит/с

| Скорость кодирования | | 1/2 | 1/2 | 3/4 | 1/2 | 3/4 | 2/3 | 3/4 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ширина канала, МГц | $T_g$ | BPSK | QPSK | | 16-QAM | | 64-QAM | |
| 6 МГц (MMDS) | 1/32 | 2,50 | 5,00 | 7,51 | 10,01 | 15,01 | 20,01 | 22,52 |
| | 1/16 | 2,43 | 4,86 | 7,28 | 9,71 | 14,57 | 19,43 | 21,85 |
| | 1/8 | 2,29 | 4,59 | 6,88 | 9,17 | 13,76 | 18,35 | 20,64 |
| | 1/4 | 2,06 | 4,13 | 6,19 | 8,26 | 12,38 | 16,51 | 18,58 |
| 7 МГц (ETSI) | 1/32 | 2,92 | 5,82 | 8,73 | 11,64 | 17,45 | 23,27 | 26,18 |
| | 1/16 | 2,82 | 5,65 | 8,47 | 11,29 | 16,94 | 22,59 | 25,41 |
| | 1/8 | 2,67 | 5,33 | 8,00 | 10,67 | 16,00 | 21,33 | 24,00 |
| | 1/4 | 2,40 | 4,80 | 7,20 | 9,60 | 14,40 | 19,20 | 21,60 |
| 20 МГц (U-NII) | 1/16 | 8,13 | 16,26 | 24,40 | 32,53 | 48,79 | 65,05 | 73,19 |
| | 1/8 | 7,68 | 15,36 | 23,04 | 30,72 | 46,08 | 61,44 | 69,12 |
| | 1/4 | 6,91 | 13,82 | 20,74 | 27,65 | 41,47 | 55,30 | 62,21 |

Характерные значения пропускной способности канала в зависимости от ширины канала и вида модуляции в режиме *OFDMA* представлены в таблице 7, где $T_g$ – длительность защитного интервала передаваемого символа в долях от длительности его полезной части.

Рассматриваемый стандарт 802.16 поддерживает следующие виды модуляции: *BPSK*, *QPSK*, *16-QAM*, *64-QAM*. Двоичная фазовая манипуляция *BPSK* (*Binary Phase Shift Keying*) – самый простой вид фазовой манипуляции, при которой каждый символ несет только 1 бит информации, что обусловливает наименьшую скорость передачи данных. При квадратурной фазовой манипуляции *QPSK* (*Quadrature Phase Shift Keying*) на символ приходится уже два бита информации, в связи с чем возрастает скорость передачи данных. Квадратурная амплитудная модуляция *QAM* (*Quadrature Amplitude Modulation*) позволяет передавать 4 бита ин-

формации при 16-уровневой и 6 бит при 64-уровневой модуляции, что обеспечивает высокую скорость потока данных.

Таблица 7 – Пропускная способность в режиме *OFDMA*, Мбит/с

| Скорость кодирования | | 1/2 | 3/4 | 1/2 | 3/4 | 2/3 | 3/4 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ширина канала, МГц | $T_g$ | QPSK | | 16-QAM | | 64-QAM | |
| 6 МГц (MMDS) | 1/32 | 4,99 | 7,48 | 9,97 | 14,96 | 19,95 | 22,44 |
| | 1/16 | 4,84 | 7,26 | 9,68 | 14,52 | 19,36 | 21,78 |
| | 1/8 | 4,57 | 6,86 | 9,14 | 13,71 | 18,29 | 20,57 |
| | 1/4 | 4,11 | 6,17 | 8,23 | 12,34 | 16,46 | 18,51 |
| 7 МГц (ETSI) | 1/32 | 5,82 | 8,73 | 11,64 | 17,45 | 23,27 | 26,18 |
| | 1/16 | 5,65 | 8,47 | 11,29 | 16,94 | 22,59 | 25,41 |
| | 1/8 | 5,33 | 8,00 | 10,67 | 16,00 | 21,33 | 24,00 |
| | 1/4 | 4,80 | 7,20 | 9,60 | 14,40 | 19,20 | 21,60 |

Следует отметить, что в силу определенных причин не все рассмотренные схемы модуляции следует применять для передачи видеоданных. Схема *BPSK* не обеспечивает требуемого значения скорости передачи данных ввиду малого значения пропускной способности и используется в основном для модуляции пилотных несущих. В свою очередь *QPSK* при определенной полосе канала обеспечивает заявленную скорость передачи данных и может быть использована для передачи видеоданных с производительностью источника, не превышающей в соответствии с теоремой кодирования пропускной способности при данной схеме модуляции на основе рассматриваемого стандарта. Кроме того, используемое при квадратурной фазовой манипуляции сигнальное созвездие содержит лишь четыре точки, расположенные в разных квадрантах, и, следовательно, принадлежащих одному из четырех квадрантов синфазным и квадратурным амплитудам принятого сигнала будет соответствовать только одна точка рабочего поля констелляционной диаграммы. В свою очередь *QAM*-модуляция характеризуется повышенной скоростью передачи данных и позволяет обеспечить требуемое значение скорости передачи данных, однако большое число уровней амплитуды сигнала на констелляционной диаграмме увеличивает вероятность неразличимости двух уровней, расположенных близко друг к другу и, как следствие, повышает чувствительность системы к шуму. Для высокоуровневой *QAM*-модуляции характерны ошибки демодуляции, что выражается в повышенном требовании к параметру *SNR* (*Signal to Noise Ratio* – отношение «сигнал/шум»).

Таким образом, так как нижняя граница заявленной пропускной способности составляет 9,5 Мбит/с, то для передачи данных может быть рекомендован *OFDM*-режим с характерной шириной канала 20 МГц и модуляцией *QPSK*, обеспечивающей необходимую скорость передачи данных.

*Список литературы*

1. Финк, Л. М. Теория передачи дискретных сообщений [Текст] / Л. М. Финк. – М.: Советское радио, 1970. – 728 с.

2. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео: [Текст] / Д. Ватолин, А. Ратушняк и др. – М.: Диалог-мифи, 2003. – 384 с.

УДК 621.3+519.24

А. А. Любченко

# АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*В статье представлен подход к анализу процессов функционирования и технического обслуживания (ТО) восстанавливаемых элементов сложных технических систем средствами имитационного моделирования для определения зависимости комплексных показателей надежности от периодичности проведения ТО. Анализ основывается на имитации вложенной цепи Маркова, описывающей рассматриваемый процесс, с помощью метода Монте-Карло и последующей обработки данных методами математической статистики.*

В процессе своей эксплуатации элементы (объекты) сложных технических систем (СТС), например, блоки и узлы радиоэлектронной аппаратуры, подвержены влиянию различного рода внешних воздействий, что приводит к возникновению отказов данных элементов СТС. Помимо этого на протяжении всего периода эксплуатации в названных элементах происходят физико-химические изменения, которые оказывают влияние на рабочие характеристики объекта и могут привести к его отказу. Очевидно, что возникновение подобного рода событий приводит к снижению надежности функционирования конкретного элемента и в конечном счете технической системы в целом.

Проведение технического обслуживания или профилактики восстанавливаемых систем является одним из способов повышения их надежности в процессе эксплуатации. Под ТО понимается комплекс организационных и технических мероприятий, направленных на предупреждение отказов [1]. При этом увеличение периодичности между ТО приводит к снижению уровня надежности технических объектов, с другой стороны, слишком частые мероприятия по ТО выражаются в существенных затратах на содержание системы при сравнительно одинаковом уровне надежности. Таким образом, обоснованная стратегия осуществления мероприятий по техническому обслуживанию является актуальной задачей.

Для количественной оценки периодичности ТО могут быть использованы аналитические модели, позволяющие определить оптимальные сроки проведения профилактики на основании критериев надежности восстанавливаемых элементов, функционала готовности $K_{\Gamma}(\alpha,\beta,T)$ и функционала технического использования $K_{\text{ТИ}}(\alpha,\beta,T)$ [2]. Для данных моделей процесс функционирования элементов СТС представляется графом состояний (рисунок 1), при этом функция распределения времени перехода из одного состояния в другое подчиняются экспоненциальному закону распределения, т. е. рассматривается лишь период нормальной эксплуатации жизненного цикла элементов СТС. Однако из теории надежности [1, 3, 4] известно, что при экспоненциальном распределении наработки на отказ, т. е. учете только внезапных отказов, проведение профилактического ТО нецелесообразно, так как данные мероприятия приводят к снижению значения функционала готовности $K_{\Gamma}(\alpha,\beta,T)$.

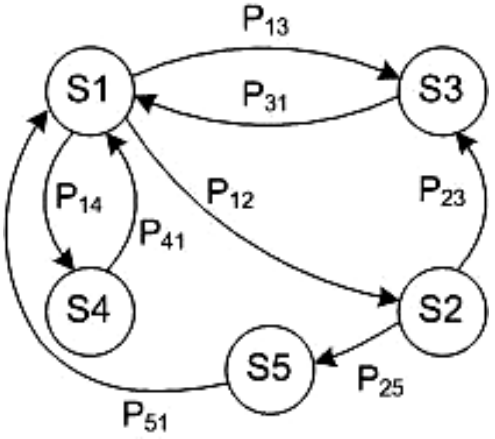



Рисунок 1 – Граф состояний процесса эксплуатации восстанавливаемых элементов

В действительности жизненный цикл объекта СТС содержит три периода: приработка (обкатка), нормальная эксплуатация и период старения. Периоды приработки и старения в отличие от нормальной эксплуатации характеризуются повышенной интенсивностью отказов. Распределение времени безотказной работы с учетом всех трех периодов эксплуата-

ции может быть описано универсальным распределением Вейбулла – Гнеденко [3, 4]. Постепенные отказы активно проявляются на этапе старения, следовательно, учет в модели распределения Вейбулла – Гнеденко позволит учесть влияние внезапных и постепенных отказов на численные значения критериев надежности восстанавливаемых элементов и, соответственно, на периодичность проведения профилактического ТО. Таким образом, очевидна задача исследования процесса ТО объектов СТС с целью количественной оценки их комплексных показателей надежности $K_{\Gamma}(\alpha,\beta,T)$ и $K_{\text{ТИ}}(\alpha,\beta,T)$.

Рассматриваемые элементы СТС являются восстанавливаемыми, нерезервированными со следующими допущениями относительно состава и режима работы составляющих компонентов объекта СТС:

все компоненты, входящие в объект, работают одновременно. Данное допущение позволяет определять интенсивность отказа объекта через суммирование интенсивностей отказов составляющих его компонентов;

элементы СТС не являются реконфигурируемыми, что характеризует постоянный состав одновременно работающих компонентов, следовательно, не влияет на интенсивность отказа всего объекта (элемента).

Процесс функционирования подобных объектов может быть представлен графом, содержащим следующие состояния (см. рисунок 1):

– работоспособное состояние (*S1*);

– неработоспособное состояние по причине явного отказа (*S2*);

– состояние разрегулировки объекта по *k*-му параметру ( $k=\overline{1,L}$ ) (*S3*);

– состояние планового технического обслуживания (ПТО) (*S4*);

– состояние внепланового технического обслуживания разрегулированной системы (ВТО) (*S5*).

Согласно ГОСТ 27.002 возможность объекта выполнять заданные функции определяется нахождением его в исправном и работоспособном состоянии. С точки зрения выполнения возложенной функции объект может быть исправен и работоспособен или неисправен и работоспособен, поэтому эти состояния могут быть объединены в одном работоспособном состоянии (*S1*).

Неработоспособное состояние объекта (*S2*), возникшее по причине явного отказа, характеризует неспособность элемента выполнять заданную функцию вследствие очевидного (явного) отказа компонента объекта.

В состояние разрегулировки по *k*-му параметру объект переходит при выходе значения k-го параметра за границы допусковой области. Разрегулировка предшествует возникновению постепенного отказа, возникающего в результате необратимых физико-химических изменений в компонентах (старение). Постепенные отказы элементов могут достигать от 30 до 80 % от общего числа отказов. Учет состояния разрегулировки восстанавливаемых объектов СТС является необходимым при анализе их надежности [2]. Элемент СТС переходит в состояние планового технического обслуживания в установленные сроки, определяемые инструкциями по проведению ТО. В период ПТО выполняются профилактические работы по поддержанию работоспособности объекта СТС, т. е. его проверка и регулировка. Проведение плановых операций ТО предотвращает наступление частично внезапных, но в основном постепенных отказов изделий, т. е. повышает их готовность. При этом проверка есть мероприятие для выявления факта разрегулировки, а регулировка – это комплекс мер по восстановлению нормативного значения *k*-го параметра элемента, вышедшего за границы допусковой области. К данному комплексу мер относится проведение ремонта по замене компонентов СТС, приводящих к разрегулировки объекта, а также настройка параметров объекта (регулировочные компоненты, автоматизированные средства настройки и т. д.).

При наличии в объекте встроенной аппаратуры диагностирования, позволяющей фиксировать разрегулировку системы, элемент СТС может переходить в состояние внепланового

технического обслуживания разрегулированной системы (ВТО) (*S5*). В данном случае в *S5* производятся все операции по проверке и регулировке блоков аппаратуры, а в состоянии ПТО (*S4*) – только проверка элементов СТС.

Контроль за состоянием элементов СТС осуществляется с помощью внешней и встроенной аппаратуры диагностирования (АД). При этом встроенная аппаратура АД осуществляет периодическую диагностику элементов, фиксируя отказ, а внешняя АД используется на этапах проведения ТО. АД характеризуется ошибками диагностирования первого и второго рода.

Ошибка диагностирования первого рода ($\alpha$) – это вероятность признать исправное изделие неисправным, ошибка диагностирования второго рода ($\beta$) – вероятность признать неисправное изделие исправным. Аппаратура контроля, используемая при ТО, имеет более высокий класс точности, чем встроенная, поэтому $\alpha_1 > \alpha_2$, $\beta_1 > \beta_2$. Данные по ошибкам диагностирования могут быть получены путем экспертных опросов, а также из справочников по надежности [2]. При условии, что рассматриваемые восстанавливаемые объекты СТС могут находиться только в пяти приведенных состояниях, значения ошибок диагностирования первого и второго рода равны нулю, так как наличие данных ошибок приводит к возникновению ложных и скрытых отказов элементов [2], что в данном случае не рассматривается.

По характеру возникновения отказы элементов СТС могут быть внезапными и постепенными. Внезапный отказ – отказ, проявляющийся в резком (мгновенном) изменении характеристик объекта, он возникает в результате внешних воздействий, нагрузок на компоненты СТС. Такие отказы проявляются в виде механических повреждений элементов (поломки, пробои изоляции, обрывы и т. п.). Внезапный отказ характеризуется независимостью момента наступления от времени предыдущей работы.

Постепенный отказ – отказ, происходящий в результате медленного, постепенного ухудшения характеристик объекта из-за износа и старения материалов [3].

Применительно к отказам элементов СТС выделяются следующие особенности:

отказ одного компонента элемента СТС приводит к отказу элемента целиком, т. е. рассматриваются цепные элементы СТС [4];

интенсивность отказов элемента непостоянна и характеризуется *U*-образной кривой, учитывающей период приработки, нормальной эксплуатации и старения компонентов объекта [3];

внешние воздействия (нагрузка) и старение оказывают одновременное воздействие на элементы, но изолированно друг от друга, т. е. постепенное старение (износ) не влияет на допустимый уровень внешнего воздействия (нагрузки) [4].

После возникновения отказов элементов СТС и разрегулировок проводится восстановление их работоспособного состояния, при этом предполагается,

что после проведения ПТО и аварийных ремонтов (после отказов) объект полностью восстанавливается, т. е. $\lambda$-характеристики объекта как невосстанавливаемого элемента могут использоваться для восстанавливаемых;

длительность восстановления может быть как случайной величиной с заданным законом распределения, так и детерминированной. Данные параметры могут быть определены на основе статистики в процессе эксплуатации элементов СТС, экспертно или на основании отраслевых инструкций и нормативных документов.

Надежность элементов СТС с описанными особенностями может быть оценена с помощью упомянутого функционала $K_{\text{Г}}(\alpha,\beta,T)$ и функционала $K_{\text{ТИ}}(\alpha,\beta,T)$.

Функционал технического использования $K_{\text{ТИ}}(\alpha,\beta,T)$ характеризует долю времени нахождения объекта в исправном состоянии относительно рассматриваемой продолжительности эксплуатации с учетом времени простоев, обусловленных ТО и восстановительными ремонтами:

$$K_{\text{ТИ}}(\alpha,\beta,T)=\frac{T_{\text{ИСП}}(\alpha,\beta,T)}{T_{\text{ИСП}}(\alpha,\beta,T)+T_{\text{РЕМ}}(\alpha,\beta,T)+T_{\text{ТО}}(\alpha,\beta,T)}, \quad (1)$$

где $T_{\text{ИСП}}(\alpha,\beta,T)$ – среднее время исправной работы объекта;

$T_{\text{ТО}}(\alpha,\beta,T)$ – среднее время простоя при ТО;

$T_{\text{РЕМ}}(\alpha,\beta,T)$ – среднее время, затраченное на восстановительные ремонты;

$\alpha$ и $\beta$ – ошибки диагностирования первого и второго рода аппаратуры диагностирования;

$T$ – периодичность профилактического ТО.

Функционал готовности $K_{\Gamma}(\alpha,\beta,T)$ определяет вероятность того, что система окажется в исправном состоянии при длительной эксплуатации:

$$K_{\Gamma}(\alpha,\beta,T)=\frac{T_{\text{ИСП}}(\alpha,\beta,T)}{T_{\text{ИСП}}(\alpha,\beta,T)+T_{\text{РЕМ}}(\alpha,\beta,T)}. \qquad (2)$$

Вычисление значений функционалов $K_{\Gamma}(\alpha,\beta,T)$ и $K_{\text{ТИ}}(\alpha,\beta,T)$ может быть выполнено в рамках имитационного моделирования, называемого в теории надежности аналитико-статистическим моделированием [5, 6]. Данный способ изучения процессов представляет собой проведение машинных экспериментов методом Монте-Карло с моделью, описывающей процесс функционирования и ТО рассматриваемых элементов СТС.

Процесс перехода из одного состояния в другое, представленный графом на рисунке 1, при экспоненциальном характере распределения времени пребывания в состоянии $S_i$, $i=\overline{1,5}$, может быть описан марковским процессом, широко применяемым в теориях надежности и теории систем массового обслуживания [7]. Однако, учитывая распределение времени пребывания в состоянии $S_1$ в виде распределения Вейбулла – Гнеденко, в состоянии $S_2$ – экспоненциальное распределение и детерминированные значения времени пребывания в остальных состояниях для текущего шага процесса – необходимо обратиться к модели вложенной цепи Маркова (ВЦМ), задаваемой следующими параметрами [5]:

вектором начального состояния ВЦМ –

$$P(0)=\left\{P_1^0, P_2^0, P_3^0, P_4^0, P_5^0\right\}; \qquad (3)$$

матрицей переходных вероятностей –

$$P=\begin{vmatrix} 0 & [1-F_{13}(T)]\,F_{12}(T) & F_{13}(T) & [1-F_{13}(T)]\,[1-F_{12}(T)] & 0 \\ 0 & 0 & F_{23}(T) & 0 & 1-F_{23}(T) \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}, \qquad (4)$$

где $F_{12}(T)=1-\mathrm{e}^{-\lambda_{12}T^{\alpha}}$ – функция распределения времени перехода из исправного состояния $S_1$ в состояние разрегулировки $S_2$ в виде распределения Вейбулла – Гнеденко;

$F_{13}(T)=1-\mathrm{e}^{-\lambda_{13}T^{\alpha}}$ – функция распределения времени наработки на отказ в виде распределения Вейбулла – Гнеденко;

$F_{23}(T)=1-\mathrm{e}^{-\lambda_{23}T}$ – функция распределения времени перехода из состояния разрегулировки $S_2$ в состояние явного отказа $S_3$ в виде экспоненциального распределения;

матрицей-строкой плотностей распределения времени пребывания в состоянии $S_i$ –

$$|A|=\left\{(\lambda_{13}+\lambda_{12})\alpha T^{\alpha-1}\mathrm{e}^{-(\lambda_{13}+\lambda_{12})T^{\alpha}}, \lambda_{23}\mathrm{e}^{-\lambda_{23}T}, T_V, T_P, T_P+T_R\right\}, \qquad (5)$$

где $\lambda_{12}$, $\lambda_{13}$ – интенсивность разрегулировок и внезапных отказов соответственно, 1/ч;

$\lambda_{23}$ – интенсивность внезапных отказов разрегулированной системы, 1/ч;

$\alpha$ – параметр распределения Вейбулла – Гнеденко, определяющий его форму;
$T_p$ – время проверки, ч;
$T_R$ – время регулировки, ч;
$T_V$ – время восстановления, определяемое по формуле:

$$T_V = T_A + T_S + T_R, \tag{6}$$

где $T_S$ и $T_A$ – время поиска неисправности и аварийного ремонта, ч.

Моделирование вложенной цепи Маркова может быть реализовано с помощью обобщенного алгоритма имитации ВЦМ [5], дополненного условиями, учитывающими изменение закона распределения разрегулировки и наработки на отказ в процессе эксплуатации элементов СТС. Такой алгоритм будем называть модифицированным алгоритмом имитации (МАИ). В общем виде имитация вложенной цепи Маркова осуществляется следующими повторяющимися итерациями:

1) определение начального состояния процесса, описываемого ВЦМ, в соответствии с вектором начального состояния (3), например, состояние $S_2$ является начальным, т. е. в момент $t_0$ объект СТС находился в состоянии разрегулировки;

2) вычисление времени пребывания объекта в текущем состоянии перед переходом в другое состояние на основании матрицы-строки $|A|$. Для нашего примера индекс текущего состояния равен двум, следовательно, время пребывания в данном состоянии в соответствии с матрицей-строкой плотностей распределения времени пребывания в состояниях $S_i$ подчиняется экспоненциальному закону распределения. Для генерирования случайного числа с заданной плотностью распределения может быть использован метод обратных функций [5], в случае экспоненциального распределения формула для генерации случайного числа имеет вид:

$$\xi_{23} = -\frac{1}{\lambda_{23}} \ln(P_0), \tag{7}$$

где $P_0$ – равномерное распределенное число на отрезке от 0 до 1.

Случайная величина в соответствии с распределением Вейбулла – Гнеденко, с применением для расчета этого же метода, может быть получена по формуле [3]:

$$\xi = -\theta \cdot \ln(P_0)^{\frac{1}{\alpha}}, \tag{8}$$

где $\theta$ – масштаб распределения Вейбулла – Гнеденко, называемого характерным временем жизни.

Если из характера параметра $\theta$ предположить, что $\theta$ есть величина обратная интенсивности $\lambda$, то формула (8) может быть переписана в виде:

$$\xi = -\frac{1}{\lambda} \ln(P_0)^{\frac{1}{\alpha}}, \tag{9}$$

где $\lambda$ – интенсивность перехода из состояния, время пребывания в котором подчинено распределению Вейбулла – Гнеденко;

3) определение состояния, в которое перейдет объект в соответствии с матрицей переходных вероятностей (4). Например, элемент СТС переходит в состояние отказа (*S3*), следовательно, для такого перехода должно выполняться условие:

$$0 < P_0 < P_{23}, \tag{10}$$

где $P_0$ – равномерное распределенное число в диапазоне от 0 до 1.

Моделируя подобным образом рассматриваемый процесс в течение времени $T_k$ для каждого значения периодичности ТО $T \in [0, T_k]$, изменяющегося с шагом $dT$, можно подсчитывается время пребывания в каждом из состоянии $S_i$, $i = \overline{1,5}$. На основании собранных данных вычисляются значения функционалов $K_{\Gamma}(\alpha,\beta,T)$ и $K_{\text{ТИ}}(\alpha,\beta,T)$ для каждого значения периодичности профилактического ТО. Для получения оценок среднего значения функционалов готовности и технического использования проводится серия из $N$ испытаний, и полученные данные обрабатываются методами математической статистики.

Оценки среднего значения функционала готовности $K_{\Gamma}(\alpha,\beta,T)$ и функционала технического использования $K_{\text{ТИ}}(\alpha,\beta,T)$ вычисляются по формулам:

$$\overline{K_{\text{ТИ}}}(\alpha,\beta,T) = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\frac{T_1^j(\alpha,\beta,T)+T_2^j(\alpha,\beta,T)}{\sum_{i=1}^{5}T_1^j(\alpha,\beta,T)}; \tag{11}$$

$$\overline{K_{\Gamma}}(\alpha,\beta,T) = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\frac{T_1^j(\alpha,\beta,T)+T_2^j(\alpha,\beta,T)}{T_1^j(\alpha,\beta,T)+T_2^j(\alpha,\beta,T)+T_3^j(\alpha,\beta,T)}, \tag{12}$$

где $T$ – периодичность технического обслуживания (профилактики);

$T_i^j$ – суммарное время пребывания в состоянии $S_i$ для j-го прогона модели.

Максимальное количество необходимых испытаний может быть определено из неравенства, полученного на основании теоремы Бернулли и неравенства Чебышева [8]:

$$N = \frac{P(1-P)}{(1-Q)\varepsilon^2}, \tag{13}$$

где $P$ – вероятность события, равная 0,5, так как с точки зрения имитационного моделирования вероятность данной величины приносит больше неопределенности в процесс, чем, например, $P$, равное 0,1;

$Q$ – доверительная вероятность;

ε – доверительный интервал.

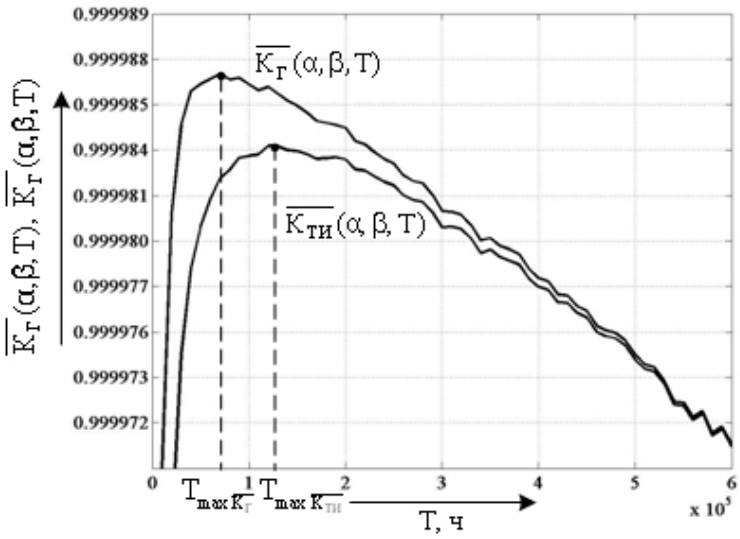



Рисунок 2 – Зависимости $\overline{K_{\Gamma}}(\alpha,\beta,T)$ и $\overline{K_{\text{ТИ}}}(\alpha,\beta,T)$ для $Q$ = 0,95 и ε = 0,05 при $\alpha = \beta = 0$

График зависимости средних значений функционала готовности $K_{\Gamma}(\alpha,\beta,T)$ и функционала технического использования $K_{\text{ТИ}}(\alpha,\beta,T)$ от периодичности профилактики для элемента с нулевыми значениями ошибок диагностирования представлен на рисунке 2. В модели учитывается период старения и нормальной эксплуатации объекта в соотношении 1 к 9 соответственно. Это допущение сделано на том основании, что период приработки занимает незначительную часть от общей продолжительности эксплуатации.

Таким образом, применение модифицированного алгоритма имитации вложенной цепи Маркова в сочетании с методом Монте-Карло позволяет исследовать процессы технического обслуживания элементов слож-

ных систем для определения зависимостей комплексных показателей надежности элемента от сроков проведения регламентного ТО. Отличительной особенностью модели является учет не только периода нормальной эксплуатации, но и периода старения элементов СТС с помощью распределения Вейбулла – Гнеденко, таким образом, возможен учет одновременного влияния постепенных и внезапных отказов рассматриваемых объектов. Результаты моделирования подтверждают, что проведение периодичного ТО повышает надежность систем и применительно к рассмотренным показателям надежности существует оптимальная стратегия организации технического обслуживания, обусловленная экстремальным характером $K_{\Gamma}(\alpha,\beta,T)$ и $K_{\text{ТИ}}(\alpha,\beta,T)$,т. е. оптимальное значение периодичности ТО может быть выбрано из диапазона от $T_{\max \overline{K_{\Gamma}}}$ до $T_{\max \overline{K_{\text{ТИ}}}}$.

*Список литературы*

1. Острейковский, В. А. Теория надежности [Текст]: Учебник / В. А. Острейковский. – М.: Высшая школа, 2003. – 463 с.

2. Держо, Г. Г. Количественная оценка вклада систем связи в безопасность технологических процессов на железнодорожном транспорте: Монография [Текст] / Г. Г. Держо / УМЦ по образованию на железнодорожном транспорте. – М., 2007. – 130 с.

3. Половко, А. М. Основы теории надежности [Текст] / А. М. Половко. – СПб: БВХ-Петербург, 2008. – 704 с.

4. Герцбах, И. Б. Модели отказов [Текст] / И. Б. Герцбах , Х. Б. Кордонский. – М.: Советское радио, 1966. – 166 с.

5. Финаев, В. И. Аналитические и имитационные модели [Текст]: Учебное пособие / В. И. Финаев, Е. Н. Павленко, Е. В Заргарян / Таганрогский технологический ин-т. Таганрог, 2007. – 310 с.

6. Надежность технических систем [Текст]: Справочник / Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев и др. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.

7. Тихонов, В. И. Марковские процессы [Текст] / В. И. Тихонов, М. А. Миронов. – М., Советское радио, 1977. – 488 с.

8. Туркельтауб, Р. М. Методы исследования точности и надежности схем аппаратуры [Текст] / Р. М. Туркельтауб. – М.: Энергия, 1966. – 160 с.

---

УДК 004.75

А. Г. Малютин, К. В. Коробова

## ПРИМЕНЕНИЕ IP-СЕРВИСОВ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ КОНТРОЛЯ И УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И МОЩНОСТИ (АСКУЭ)

*В статье проводится обзор стека протоколов TCP/IP и стандартов Международной электротехнической комиссии (МЭК), используемых в энергосберегающих системах на верхних уровнях АСКУЭ, и задачи повышения эффективности функционирования программно-аппаратного комплекса АСКУЭ, реализующего IP-сервисы. Актуальная в настоящее время проблема оптимизации IP-сервисов для нужд АСКУЭ объясняется тем, что уровни первичных измерительных приборов и устройств сбора и передачи данных чаще ограничиваются рассмотрением технологий физического и канального уровней, а вопросы реализации стека и предоставляемых им сервисов не проработаны. Выявление необходимых для оптимальной работы системы сетевых, транспортных протоколов, а также стандартов прикладного уровня приведет в дальнейшем к повышению уровня системности и информационной обеспеченности АСКУЭ.*

Достоверность и оперативность учета энергии становятся в современном мире все более актуальной задачей. Так, например, на долю ОАО «РЖД» приходится около 6 % общерос-

сийского потребления электроэнергии. Задачи ее учета и экономного расходования встали перед российской железной дорогой практически сразу после электрификации отрасли.

Понятие АСКУЭ объединяет ряд систем, каждая из которых предназначена для учета и контроля одного энергоносителя, что позволяет решить, с чего начать процесс энергосбережения − вводить ли его комплексно или ограничиться экономией одного из энергоресурсов.

Для организации системы АСКУЭ необходимо следующее:

− в точках учета энергоносителей установить высокоточные средства учета (электронные счетчики);

− цифровые сигналы передать в так называемые «сумматоры», снабженные памятью;

− создать систему передачи данных, обеспечивающую дальнейшую передачу информации на различные уровни;

− организовать центры сбора и обработки информации, оснастив их современными компьютерами и программным обеспечением.

Основными требованиями, предъявляемыми к разрабатываемым системам учета энергоресурсов, являются такие:

− невысокая стоимость элемента системы;

− все элементы системы должны отличаться высокой надежностью, обеспечивающей приемлемую величину наработки на отказ для всей системы;

− малая протяженность кабельной системы, обеспечивающая невысокую стоимость монтажных работ;

− взаимозаменяемость элементов системы при выходе их из строя;

− приемлемая стоимость изготовления и настройки системы в целом;

− простота технического обслуживания.

Переломным этапом в развитии АСКУЭ стала персонализация средств вычислений и создание электронных приборов учета энергоносителей. Еще больший импульс развитию систем автоматизированного учета придало повсеместное внедрение беспроводной связи, что позволило создать беспроводные системы, характеризующиеся легкостью развертывания, обслуживания и т. д. Это обусловлено тем, что вопрос организации каналов связи являлся одним из основных в данном направлении.

Однако в уже имеющихся и вновь создаваемых системах широко применяются узкоспециализированные сетевые решения (оборудование, протоколы передачи данных, программное обеспечение), недостаточная совместимость которых между собой затрудняет создание единой информационной системы. Поэтому возникает потребность в универсальном подходе к созданию подобных систем – например, использование стека TCP/IP, который является наиболее совершенным и распространенным протоколом из всех доступных в настоящее время, дающим возможность объединения неоднородных систем, и достаточно гибким для настройки и оптимизации IP-сервисов под нужды энергосберегающих систем.

По своей сути основная задача АСКУЭ состоит в точном измерении количества потребления или передачи энергоносителя и мощности (возможно, с учетом суточных, зонных или других тарифов), обеспечении возможности хранения этих измерений (например, в течение месяца, года и т.д.) и доступа к этим данным для произведения расчетов с поставщиком (потребителем). Кроме того, важной функцией АСКУЭ является возможность анализа потребления (передачи) энергии и мощности.

Система АСКУЭ имеет ряд особенностей, которые необходимо учитывать при оптимизации применяемых в системе IP-сервисов.

В первую очередь необходимо, чтобы передача информации в системе осуществлялась надежно, достоверно и без потерь, при этом скорость передачи информации (время задержки поступления данных) должна позволять вести мониторинг и управление системой в реальном времени. Для соблюдения этих требований система должна быть отказоустойчивой, что

возможно только при достаточной избыточности системы. Показания счетчиков должны поступить в центр сбора информации даже в случае отказа какого-либо из возможных каналов передачи.

Важны высокая расширяемость (возможность сравнительно легкого добавления и замены отдельных элементов системы) и масштабируемость (возможность наращивания количества узлов и протяженности связей в широких пределах, при этом производительность системы не ухудшается) системы, а соответственно и устройства, входящие в нее, должны быть совместимыми и универсальными, так как количество потребителей будет увеличиваться и вместе с тем будет меняться используемое ими оборудование.

Система должна быть защищена от несанкционированного доступа во избежание преднамеренной порчи или изменения данных, так как достоверность данных, передаваемых в подобной сети, необходима при экономических расчетах.

Таким образом, для корректной и рациональной работы всей системы необходимо осуществление работоспособности следующих сервисов протоколов TCP/IP, позволяющих выполнить изложенные выше требования:

– DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol);
– DNS (Domain Name System);
– терминальный сервер;
– VPN (Virtual Private Network);
– межсетевой экран;
– NTP (Network Time Protocol).

Рассмотрим значимость перечисленных сервисов в АСКУЭ подробнее.

DHCP (англ. dynamic host configuration protocol – протокол динамической конфигурации узла) – это сетевой протокол, позволяющий компьютерам либо сетевым устройствам сбора и передачи данных (УСПД) автоматически получать IP-адрес и другие параметры, необходимые для работы в сети TCP/IP. Для этого устройство обращается к специальному серверу, называемому сервером DHCP. Сетевой администратор может задать диапазон распределяемых адресов, что позволяет управлять системой энергосбережения, имеющей распределенную структуру [1].

DNS (англ. domain name system – система доменных имен) – распределенная система (распределенная база данных), способная по запросу, содержащему доменное имя хоста (компьютера или другого сетевого устройства, например, устройства сбора информации с приборов учета энергоносителей), сообщить IP-адрес или (в зависимости от запроса) другую информацию. DNS позволяет обеспечивать иерархическую структуру АСКУЭ, распределенность администрирования и хранения информации (собранных данных) в системе.

Терминальный сервер (англ. terminal server) – сервер, предоставляющий клиентам вычислительные ресурсы (процессорное время, память, дисковое пространство) для решения задач. Технически терминальный сервер представляет собой мощный компьютер (кластер), соединенный по сети с терминальными клиентами обычно маломощными или устаревшими рабочими станциями или специализированными устройствами для доступа к терминальному серверу. Такое решение позволяет упростить администрирование столь распределенной системы передачи данных как АСКУЭ, поскольку все используемое программное обеспечение будет установлено в центре сбора информации, а инженерный пункт, находясь достаточно удаленно, может дистанционно осуществлять мониторинг всей системы, управление УСПД и пользоваться ресурсами центра.

Включение АСКУЭ помимо локальных сетей (LAN) в глобальные корпоративные (WAN) или публичные сети требует дополнительных мер для обеспечения конфиденциальности обрабатываемых данных и устойчивой работы всего программного обеспечения.

VPN (англ. virtual private network – виртуальная частная сеть) – логическая сеть, создаваемая поверх другой сети, например, Интернет. За счет шифрования создаются закрытые от посторонних каналы обмена информацией. Чаще всего для создания виртуальной сети используется инкапсуляция протокола PPP (point-to-point protocol) в какой-либо другой протокол, например, IP.

Для обеспечения целей защиты коммерческих данных необходимо построение виртуальной частной сети (VPN) АСКУЭ, отделенной от публичной сети на логическом уровне. Функционирование единой виртуальной частной сети объединит центральный диспетчерский пункт с локальными системами, расположенными на удалении друг от друга, и позволит расширить и улучшить информационный обмен между ними. Это позволит реализовать комплексное управление системой, службу каталогов, почтовую службу и другие инфокоммуникационные сервисы.

Распределенность и масштабность подобных систем предполагает возможность несанкционированного доступа, который может привести к искажению обрабатываемых данных, к отказу системы или отдельных ее элементов и т. д. Обезопасить систему можно с помощью межсетевого или сетевого (брандмауэра или файервола) экрана – комплекса аппаратных или программных средств, осуществляющего контроль и фильтрацию проходящих через него сетевых пакетов на различных уровнях модели OSI в соответствии с заданными правилами.

В оптимально работающей системе должен быть настроен и сервис единого времени NTP или SNTP, обеспечивающий временную синхронизацию всех устройств системы. Это влияет на качество метрологии и на те задачи, которые решает система, начиная с простейшей, например, расчет балансов, причем балансов не месячных, не суточных, а получасовых и даже с меньшим циклом.

Рассмотренная совокупность IP-сервисов, обеспечивающая работоспособность АСКУЭ, является базовой для реализации стандартов МЭК, в которых описывается работа коммуникационных систем и предлагаются соответствующие протоколы передачи данных, в частности, протоколы стека TCP/IP.

Международные стандарты МЭК можно разделить на два вида: общетехнические, носящие межотраслевой характер, и стандарты, содержащие технические требования к конкретной продукции. К первому виду можно отнести нормативные документы на терминологию, стандартные напряжения и частоты, различные виды испытаний и пр., второй вид стандартов регламентирует устройство и работу разнообразного оборудования: от бытовых электроприборов до спутников связи. Ежегодно в программу МЭК включается более 500 новых тем по международной стандартизации, а основными объектами стандартизации МЭК являются электроэнергетическое оборудование, изделия электронной промышленности, оборудование для спутников связи, терминология и т. д. [3].

При разработке стандартов МЭК ставилась задача обеспечить высокую надежность электротехнических систем, поскольку с самого начала предполагалось, что они используются для выполнения не только информационных функций, но и функций управления. Поэтому в стандартах и протоколах МЭК хорошо проработаны вопросы представления различных типов данных, а также показатели качества работы системы передачи (с помощью специальных флагов передаются сигналы переполнения, недостоверности, признаки источника информации и т. п.). Протоколы МЭК предусматривают возможность гибкой организации передачи, например, есть возможность одновременного выполнения нескольких функций [2]: мониторинг нормального режима, регистрация событий, чтение файлов осциллограмм и параметризация устройств.

При выполнении всех названных функций не возникает ограничений со стороны протокола на доступ к устройству. Выполнение одной функции (например, чтение осциллограммы) не требует прерывания выполнения другой функции (например, мониторинг событий и

нормального режима). Эта особенность протоколов МЭК важна при работе устройств в составе системы АСКУЭ.

Разработка стандартов на телекоммуникации в электроэнергетических системах производится в рабочих группах технического комитета 57 МЭК. В настоящее время в рассматриваемой области разработаны и широко применяются несколько стандартов, но особое внимание уделяется стандарту МЭК 61850, который отвечает на большинство вопросов, таких как стандартизация имен данных, реализация стандартных протоколов, определение шины процесса и т. д. Стандарт обеспечивает функциональную совместимость оборудования от разных производителей, прошедших сертификацию на соответствие.

Область применения стандарта МЭК 61850 – системы связи внутри подстанции (ПС). Это набор стандартов, в который входят стандарт по одноранговой связи и связи «клиент – сервер», стандарт по структуре и конфигурации подстанции, стандарт по методике испытаний, стандарт экологических требований, стандарт проекта и т. д.

Основным требованием к системе сбора данных в рассматриваемом стандарте является обеспечение способности микропроцессорных электронных устройств к обмену технологическими и другими данными.

Основные свойства данного стандарта:

− отделяет собственно данные (информацию) от методов их передачи;

− определяет точные модели данных и методы работы с ними, обеспечивая их возможное расширение;

− определяет единый язык конфигурирования;

− определяет использование широко распространенных протоколов Ethernet и TCP/IP для связи внутри ПС, одновременно обеспечивая высокую скорость связи (не менее 100 Мбит/с) и открытость будущих концепций связи;

− поддерживает свободное распределение функций и их комбинацию для различных устройств и таким образом позволяет реализовать различные идеологии систем;

− обеспечивает высокую скорость передачи данных от одного устройства другому на одном («горизонтальные» связи) и нескольких («вертикальные») иерархических уровнях.

Все перечисленные свойства стандарта МЭК 61850 в конечном итоге позволяют значительно сократить затраты на проектирование, наладку и последующую эксплуатацию системы, а также обеспечить повышение надежности системы за счет применения нового подхода к резервированию и оптимизации архитектуры сети связи, что соответствует основным требованиям, предъявляемым к АСКУЭ. При этом стандарт МЭК 61850 также описывает характер перехода на распределенную систему передачи данных: использование стека протоколов TCP/IP (рисунок), широковещательные сообщения GOOSE и MMS.

Совместное использование стека протоколов TCP/IP и стандарта МЭК61850 позволяет повысить надежность и достоверность передачи информации, стандартизировать соответствующие технические средства и в целом повысить эффективность работы всей системы.

Использование стека протоколов TCP/IP на всех уровнях АСКУЭ возможно также благодаря следующим его преимуществам:

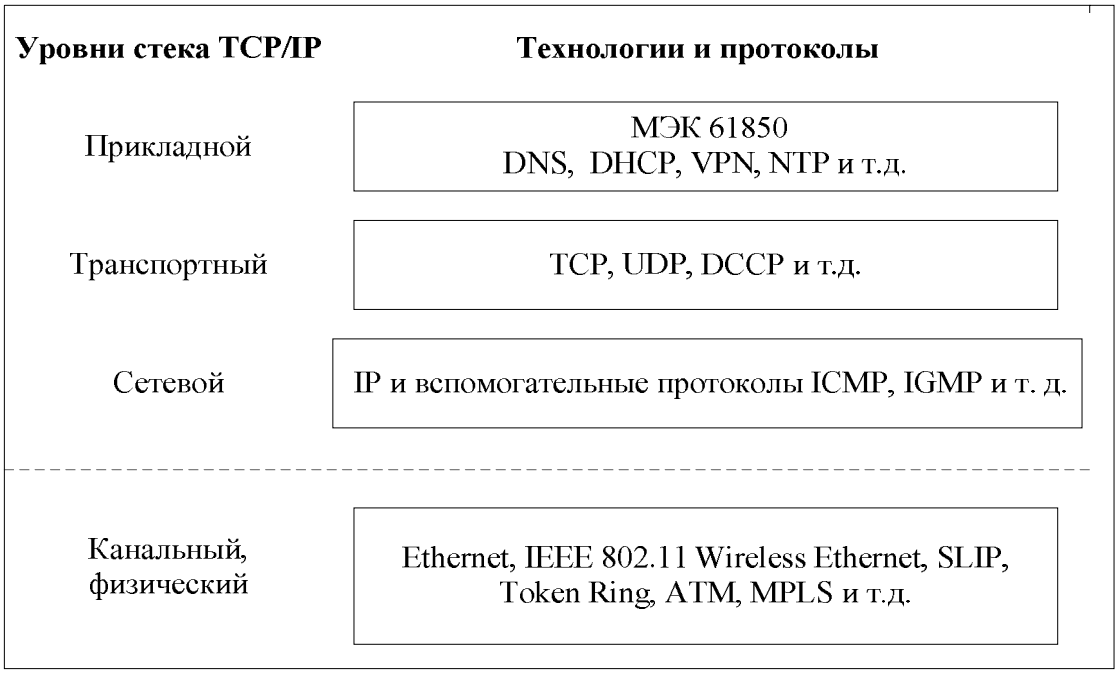
– массовость (реализован в большинстве сетевых устройств);

– заложенная в самом протоколе иерархичность;

– возможность одновременного функционирования на одном устройстве нескольких сетевых процессов;

– унификация доступа к устройствам и простота администрирования (система администрируется на уровне самих сервисов);

– простота реконфигурировния, масштабирования с сохранением целостности системы (соответствие структуре «доступ – распределение – ядро»).




Взаимосвязь стандарта МЭК 61850 и стека протоколов TCP/IP

Реализация и оптимизация IP-сервисов в АСКУЭ должны выполняться в следующих основных направлениях:

выявление критериев для оптимизации и создание имитационной модели IP-сети, адаптированной под АСКУЭ;

анализ и корректировка таких характеристик, как, например, задержка данных, особенно в поточном режиме работы (real-time);

разработка правил (методик) тонкой настройки сервисов, учитывающих специфику системы (предэксплуатационная наладка системы);

анализ и возможность реконфигурации нагрузки сети, в том числе автоматическое управление трафиком;

рассмотрение возможности использования каналов системы не только для передачи измерений (рациональное встраивание АСКУЭ в уже существующую инфраструктуру корпоративной сети).

Оптимизация АСКУЭ в рамках представленных направлений обеспечивает работу IP-сервисов в энергосберегающей системе и закладывает резерв для ее расширения и улучшения пользовательских свойств и диспетчерских функций с целью повышения эффективности энергоснабжения.

*Список литературы*

1. Олифер, В. Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы [Текст] / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – СПб: Питер, 2010. – 864 с.

2. Асанбаев, Ю. А. Информационный обмен с РЗА и ПА – основа интегрированной АСУ ТП подстанции [Текст] / Ю. А. Асанбаев, Т. Г. Горелик и др. // Релейщик. 2008. – №1. – С. 32.

3. ГОСТ Р МЭК 61850-3-2005. Сети и системы связи на подстанциях. Часть 3. Основные требования [Текст]. – М.: Стандартинформ, 2006. – 14 с.

УДК 621.331:621.311.4:621.3

О. А. Сидоров, М. А. Карабанов

# АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОТКЛОНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИГНАЛЬНОЙ ТОЧКИ

*В статье рассмотрена схема питания сигнальной точки, для которой были исследованы в разных режимах работы наиболее важные функциональные узлы (рельсовые цепи, аппаратура преобразования информации и светофор), которые являются типовыми как для перегонных устройств, так и для станционных. Установлено, что отклонение напряжения питания этих устройств может привести к значительным негативным последствиям, существенно нарушающим условия безопасности движения поездов.*

Устройства сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) представляют собой функционально сложные системы, состоящие из определенного количества структурных узлов, работоспособность которых в различной степени напрямую зависит от напряжения питания $U_{\text{п}}$.

Для анализа влияния отклонения напряжения питания $U_{\text{п}}$ рассмотрим обобщенную структурную схему сигнальной точки СЦБ, приведенную на рисунке, где ПК и РК – аппаратура питающего и релейного концов рельсовой цепи (РЦ) соответственно; ПР – путевое реле, контролирующее свободность РЦ; $z$ – сопротивление, осуществляющее регулирование путевого тока $I_{\text{ПК}}$ на входе рельсовой нити для достижения требуемой величины тока $I_{\text{РК}}$ на выходе рельсовой нити; ПИ – аппаратура сигнальной точки, предназначенная для преобразования информации, полученной от РК или других объектов, что необходимо для функционирования сигнальной точки СЦБ; Св – светофор сигнальной точки; $TV_{\text{л}}$ – линейный трансформатор, преобразующий переменное напряжение ВЛ СЦБ 6 или 10 кВ в напряжение питания $U_{\text{п}}$ сигнальной точки, где $U_{\text{п}}$ = 220 В; $TV_{\text{п}}$ – путевой трансформатор сигнальной точки. Направление движения поездов по рассматриваемому участку пути показано на рисунке стрелкой.

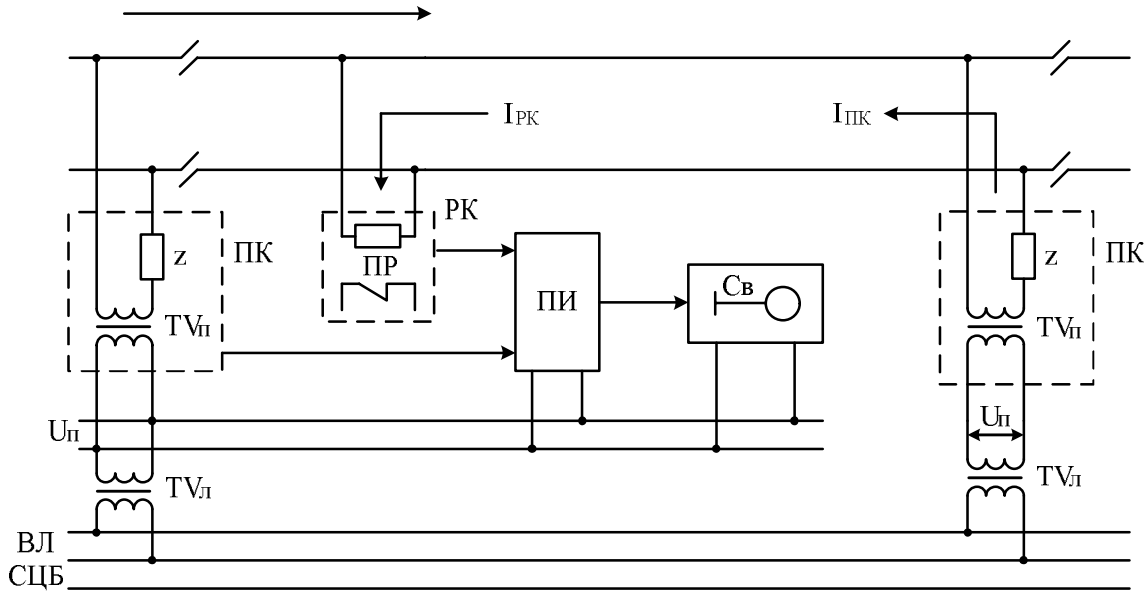
Основными и наиболее значимыми функциональными узлами сигнальной точки, работоспособность которых зависит от напряжения питания, являются питающий конец рельсовой цепи (ПК), аппаратура преобразования информации (ПИ) и светофор (Св). Для определения влияния провалов напряжения $U_{\text{п}}$ на функционирование сигнальных точек необходимо отдельно рассмотреть наиболее критичные функциональные узлы сигнальных точек, для которых провалы напряжения могут привести к значительным негативным последствиям.

Показанные на рисунке функциональные узлы являются типовыми для использования как в перегонных устройствах, так и в станционных, поэтому сделанные выводы могут распространяться практически на любые виды устройств СЦБ, находящихся в эксплуатации на железнодорожном транспорте.

Рассмотрим влияние провалов напряжения $U_{\text{п}}$ на работоспособность функциональных узлов сигнальной точки СЦБ, показанных на рисунке.

Одним из наиболее ответственных элементов, обеспечивающих безопасность движения поездов, являются рельсовые цепи, которые выполняют функции контроля свободности и занятости участков пути на станциях и перегонах. Рельсовые цепи могут функционировать в трех режимах работы: нормальном, шунтовом и контрольном. Основными из них являются нормальный режим и шунтовой, так как они в основном обеспечивают установленную пропускную способность участков пути и наиболее полно практически реализуют условия безопасности движения поездов. Для этих режимов работоспособность РЦ должна выполняться в полном объеме.

Критериями работоспособности РЦ является включенное состояние путевого реле при свободности участка пути (нормальный режим работы РЦ) и выключенное его состояние при занятости участка пути подвижным составом (шунтовой режим работы РЦ).




Упрощенная структурная схема питания сигнальной точки СЦБ

Работоспособность РЦ определяется, в частности, значением полного сопротивления рельсовой нити, в которую входят последовательно соединенные рельсы и рельсовые соединители. Полное сопротивление обусловлено активной и индуктивной составляющими рельсовой нити.

Зависимость напряжения $U_р$ на путевом реле от напряжения питания $U_п$ и параметров рельсовой цепи носит комплексную форму, имеет сложный многофакторный характер и определяется параметрами, точное прогнозирование которых чрезвычайно затруднительно, а иногда практически невозможно. Это определяет необходимость введения определенных, но достаточно корректных допущений.

Для дальнейшего анализа примем, что зависимость между $U_п$ и $U_р$ имеет вид [1]:

$$U_р = W_{РЦ} \cdot U_п , \tag{1}$$

где $W_{РЦ}$ – обобщенная функция РЦ, в которую входит все многообразие параметров рельсовой нити и аппаратуры питающего и релейного концов РЦ, определяющих характеристики передачи энергии сигнального тока от источника $U_п$ на путевое реле. Примем, что функция $W_{РЦ}$ является линейной для измерений токов и напряжений, существующих в элементах РЦ.

Условием работоспособности РЦ для нормального режима работы служит выполнение неравенств:

$$\begin{cases} U_р \geq U_{р\,ПР}; \\ I_р \geq I_{р\,ПР}, \end{cases} \tag{2}$$

где $U_{р\,ПР}$ и $I_{р\,ПР}$ – напряжение и ток надежного притяжения якоря ПР.

Как видно из сравнения уравнений (1) и (2), любое увеличение напряжения $U_п$, в том числе и выше заданных норм, всегда будет удовлетворять неравенствам (2). Поэтому в нормальном режиме работы рельсовая цепь будет не чувствительна к выходу за верхний предел напряжения $U_п$.

Снижение значения напряжения $U_{\text{п}}$ и выход его за пределы допустимых норм приведет к уменьшению тока $I_{\text{р}}$ и напряжения $U_{\text{р}}$, что вызовет невыполнение неравенств (2). Кроме того, наихудший случай влияния снижения напряжения $U_{\text{п}}$ на работу РЦ имеет место при минимальном сопротивлении балласта, что приведет к протеканию максимального тока через балласт. Аналогичный вывод можно сделать для случая, когда сопротивление рельсовых нитей максимально.

Таким образом, уменьшение напряжения $U_{\text{п}}$ и выход его величины за пределы допустимой нижней нормы могут вызывать ложную занятость РЦ с соответствующими возможными задержками поездов.

Надежная работа РЦ в шунтовом режиме характеризуется необходимостью гарантированного выключенного состояния ПР для обеспечения контроля за местом нахождения подвижного состава. Это обусловливает необходимость выполнения неравенств:

$$\begin{cases} U_{\text{р}} \le U_{\text{р отп}}; \\ I_{\text{р}} \le I_{\text{р отп}}, \end{cases} \qquad (3)$$

где $U_{\text{р отп}}$ и $I_{\text{р отп}}$ – напряжение и ток надежного отпускания якоря ПР.

Как видно из неравенств (3), любое снижение напряжения $U_{\text{п}}$, в том числе и ниже заданных норм, всегда будет удовлетворять неравенствам (3). Поэтому в шунтовом режиме работы рельсовая цепь не будет чувствительна к выходу за нижний предел напряжения $U_{\text{п}}$.

Критичным для данного режима работы является увеличение напряжения $U_{\text{п}}$. Это приведет к увеличению напряжения $U_{\text{р}}$ на путевом реле, что может обусловить невыполнение неравенств (3) и вызвать появление ложной свободности рельсовой цепи, которое нарушит условия безопасности движения поездов.

Не менее важным функциональным узлом сигнальной точки СЦБ является аппаратура преобразования информации устройств СЦБ, которую можно разделить на две основные группы. К первой из них относятся электромагнитные реле и некоторые электронные приборы, которые допускают относительно большие изменения напряжения $U_{\text{п}}$ [2], а также не только традиционные устройства СЦБ, обеспечивающие контроль участков пути и выполняющие соответствующие взаимосвязи между стрелками и сигналами, но и такие, как ДИСК, КТСМ, УКСПС, АСК-ПС, САУТ и другие, выполняющие функции контроля состояния подвижного состава в пути следования, передачи информации и т. п. Ко второй группе относят аппаратуру, для которой стабильность напряжения питания $U_{\text{п}}$ электронных элементов, например интегральных микросхем (ИМС), является одним из основных факторов ее надежного функционирования. Очевидно, что первая группа аппаратуры относится к традиционным и широко распространенным на сети дорог устройствам СЦБ, а вторая – к новым и перспективным, например, микроэлектронным системам, внедрение которых происходит на железнодорожном транспорте в настоящее время.

Надежная работа аппаратуры СЦБ, относящейся к первой группе, возможна тогда, когда напряжение питания сигнальных точек лежит в пределах допустимых норм. В ряде случаев стабильности напряжения питания можно добиться путем введения в аппаратуру сигнальных точек специальных стабилизаторов напряжения. Однако на практике такие стабилизаторы часто отсутствуют и поэтому качество питающих напряжений $U_{\text{п}}$ обеспечивается путем принятия нестандартных мер, которые во многих случаях противоречат правилам эксплуатации, вызывают задержки поездов и в некоторых случаях могут нарушить условия безопасности движении [1].

При электротяге первичным источником электроснабжения устройств СЦБ является тяговая подстанция, у которой имеется объективно существующая нестабильность напряжения в определенных режимах работы, подробно описанных в работе [2].

Наиболее радикальным средством повышения качества напряжения является стабилизация напряжения $U_{\text{п}}$ непосредственно на входе каждой сигнальной точки. Попытка исполне-

ния стабилизирующих устройств в системе электроснабжения сигнальных точек была реализована в трансформаторной подстанции КТПОЛ-1,25/10(6)-0,22У1, эксплуатирующейся на ряде железных дорог [3 – 5]. Стабилизация напряжения в этой подстанции осуществляется путем переключения отводов вторичной обмотки линейного трансформатора при помощи двух симисторных ключей, что позволило получить двухпозиционное дискретное регулирование выходного напряжения.

Однако, как показал теоретический анализ работы и практический опыт эксплуатации этой подстанции в существующих системах электроснабжения устройств СЦБ, двухпозиционный принцип регулирования не обеспечивает требуемой стабильности напряжения $U_{\text{п}}$ при воздействиях дестабилизирующих факторов. При сохранении прежнего дискретного принципа регулирования требуется увеличение количества позиций переключения, а это приводит к существенному усложнению устройства стабилизации. Кроме того, использование дискретного принципа переключения переменного напряжения вызывает определенные трудности в выполнении норм коммутационных режимов полупроводниковых приборов. Поэтому более рациональным является оптимизации режимов работы первичного источника, т. е. тяговой подстанции, направленная на стабилизацию и повышение качества напряжения.

Ко второй группе относится также современная и перспективная высокоинтеллектуальная электронная аппаратура с использованием интегральных микросхем, которая строится, как правило, на микропроцессорных функциональных узлах с устройствами памяти.

Отклонение напряжения может вызвать серьезные сбои в работе этой аппаратуры. Более тяжелые последствия могут возникнуть при кратковременном пропадании питающего напряжения. В этом случае во время спада и последующего увеличения постоянного напряжения, питающего логические интегральные микросхемы, возникают ситуации, когда нулевые и единичные уровни напряжения при взаимодействии их с соответствующим напряжением платы BIOS, в которой имеется автономный электрохимический источник электропитания, могут привести к непредсказуемым последствиям в работе аппаратуры. Аппаратура информационных комплексов в таких случаях может перейти в режим самоконтроля, что приводит к перерыву связи, стиранию информации, срабатыванию защиты и т. п. [6].

При наличии источников вторичного электропитания (ИВЭПов) особое внимание следует уделять комплексным сопротивлениям линейного трансформатора, характеристикам ВЛ СЦБ и других элементов, входящих в состав системы электроснабжения сигнальных точек. Как описано в источнике [1], если величины сопротивлений значительны, то требуется принимать меры по исключению включения стабилизированного ИВЭПа при малых значениях напряжения питания $U_{\text{п}}$ сигнальной точки. Это обычно реализуется в схемах ИВЭПов введением специальных пороговых устройств включения, допускающих работу схем лишь при напряжении, большем заданного порогового. Поэтому нельзя допускать снижения напряжения питания сигнальной точки ниже минимально допустимого значения, установленного стандартом [7] и руководящими документами [8].

Одним из основных элементов любой сигнальной точки является в настоящее время светофор. Подавляющее большинство светофоров на сети дорог используют традиционные лампы накаливания, работоспособность которых и видимость сигналов светофоров в значительной степени определяется напряжение питания $U_{\text{п}}$. Понижение напряжения на лампе на 20 % по сравнению с номинальным уменьшает видимость сигнала светофора на 30 % [9], что существенно отражается на безопасности движения поездов.

Таким образом, наиболее чувствительными к изменению напряжения $U_{\text{п}}$ являются такие важные функциональные узлы устройств СЦБ, как рельсовые цепи, лампы накаливания светофоров и аппаратура преобразования информации. Провалы напряжения могут привести к ложной занятости РЦ в нормальном режиме работы, что вызывает задержки поездов. Одновременно с этим могут иметь место отказы, нарушающие условия безопасности движения поездов, что имеет место при перекрытии маневровых сигналов, и уменьшение видимости сигнала светофоров. Наиболее действенным средством повышения надежности функциони-

рования и исключения случаев ложной работы устройств СЦБ является улучшение качества напряжения питания $U_{\text{п}}$.

На основании проведенного в статье анализа предлагается исключить случаи провалов напряжения, обусловленные переходными процессами при коммутации преобразовательных агрегатов на тяговых подстанциях. Достигается это путем минимизации броска тока включения в трансформаторе, который вызывает снижение напряжения на шинах 10 [2] (от которых получают питание устройства СЦБ) за счет падения напряжения на элементах энергосистемы.

*Список литературы*

1. Набойченко, И. О. Совершенствование и разработка систем электроснабжения устройств СЦБ [Текст]: Дис… канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2008. – 178 с.

2. Сидоров, О. А. Влияние системы тягового электроснабжения на надежность электропитания устройств СЦБ и связи [Текст] / О. А. Сидоров, П. В. Тарута, М. А. Карабанов // Транспорт Урала. 2009. – № 4. – С. 95 – 97.

3. Аржанников, Б. А. Блок контроля и управления электропитанием сигнальной точки СЦБ [Текст] / Б. А. Аржанников, И. О. Набойченко, Л. А. Фролов // Теория и практика железнодорожных и промышленных систем и приборов автоматики, информатики и связи: Межвуз. сб. науч. тр. / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург, 2003. – Вып. № 23 (105). – С. 14 – 18.

4. Аржанников, Б. А. Режимы работы трансформатора электропитания сигнальных точек СЦБ [Текст] / Б. А. Аржанников, И. О. Набойченко, А. Г. Ушаков // Современные информационные технологии, электронные системы и приборы железнодорожного транспорта: Сб. науч. тр. / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург, 2005. – Вып. 36 (119). – С. 15 – 21.

5. Карабанов, М. А. Влияние качества электроснабжения на надежность функционирования электронной аппаратуры нетяговых потребителей // Современные направления научных исследований [Текст] / М. А. Карабанов // Труды II междунар. науч.-практ. конф. – Екатеринбург, 2010. – С. 87 – 89.

6. ГОСТ 13-109-97 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 33 с.

7. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации [Текст]. – М.: Техинформ, 2000. – 191 с.

8. Герман, Л. А. Устройства и линии электроснабжения автоблокировки [Текст] / Л. А. Герман, М. И. Векслер, И. А. Шелом. – М. : Транспорт, 1987. – 192 с.

УДК 629.4.027.115

## УСТРОЙСТВА БУКС ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ДЛЯ ВОСПРИЯТИЯ РАМНОЙ СИЛЫ

**Бородин Анатолий Васильевич**
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, заведующий кафедры «Теория механизмов и детали машин».
Тел.: (3812) 31-06-18.
E-mail: tmdm@omgups.ru

**Иванова Юлия Алексеевна**
Преподаватель кафедры «Теория механизмов и детали машин», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-06-18.
E-mail: Ivanovatmdm@mail.ru

**Ковалев Михаил Игоревич**
Аспирант кафедры «Теория механизмов и детали машин», ОмГУПС.
Тел.: (3832) 31-06-18.

*В статье приведен анализ отечественного и зарубежного опыта конструирования осевых упоров в буксах железнодорожного подвижного состава. Предложены перспективные конструкции осевых упоров скольжения и качения, позволяющие повысить ресурс цилиндрических подшипников и снизить энергозатраты на преодоление сил трения в элементах букс.*

Ключевые слова: *букса, рамная сила, осевой упор*.

## RAILWAY AXLE-BOX AXIAL SUPPORT DESIGNS FOR AXIAL LOADING

**Borodin Anatoliy Vasilievich**
Omsk State University of Transport (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr. Sci. Tech., head of the chair «Theory of mechanisms and machine elements».
Phone: (3812) 31-06-18.
E-mail: tmdm@omgups.ru

**Ivanova Yuliya Alekseevna**
The teacher of chair «Theory of mechanisms and machine elements», OSTU.
Phone: (3812) 31-06-18.
E-mail: Ivanovatmdm@mail.ru

**Kovalev Mihail Igorevich**
The post-graduate student of chair «Theory of mechanisms and machine elements», OSTU.
Phone: (3812) 31-06-18.

*The article provides an analysis of domestic and foreign experience in the design of axial supports for railway rolling stock axle-boxes. Perspective designs of sliding and rolling axial supports, allowing to increase the resource of cylindrical bearings and to reduce energy consumption for overcoming the friction forces in the axle-box elements.*

Keywords*: axle-box, axial loading, axial support.*

УДК 621.332.3

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ КОРРОЗИИ АРМАТУРЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ОПОРЫ ПО ШИРИНЕ РАСКРЫТИЯ ПРОДОЛЬНОЙ ТРЕЩИНЫ

**Запрудский Александр Алексеевич**
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта».
Тел.: (3812) 42-00-70, 8-903-983-90-59.
E-mail: palmuser@yandex.ru

*В статье рассмотрена методика оценки размеров коррозии арматуры по степени раскрытия продольной трещины на поверхности железобетонной опоры. Представлена разработанная схема замещения защитного слоя бетона, определены условия начала образования трещины и получено расчетное выражение для оценки коррозионного повреждения арматуры.*

Ключевые слова: *железобетон, продольная трещина, арматура, коррозия, растягивающие напряжения, внутренние усилия.*

## ESTIMATION TECHNIQUE OF DEGREE ARMATURE CORROSION OF A FERRO-CONCRETE POLE ON WIDTH OF A LONGITUDINAL CRACK DISCLOSING

**Zaprudsky Alexander Alexeevich**
Omsk State Transport Univirsity (OSTU).
35, Marx av. Omsk, 644046, Russia.
The post-graduate student of chair «Power supply for railways».
Phone: (3812) 42-00-70, 8-903-983-90-59.
E-mail: palmuser@yandex.ru

*In article the offered method of estimation of degree of armature corrosion on width of disclosing of a longitudinal crack on the surface of the ferro-concrete pole is considered. For this purpose the equivalent scheme of protective concrete layer has been developed, conditions of the beginning formation of a crack has been defined and expression for estimation of armature corrosion damage is received.*

Keywords: *ferroconcrete, longitudinal crack, armature, corrosion, stretching pressure, internal efforts.*

УДК 629.4.027.23:004.42

## ВЫБОР ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ РАСЧЕТА БОКОВОЙ РАМЫ ТЕЛЕЖКИ

**Матяш Юрий Иванович**
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство».
Тел.: 8-960-990-13-89.

**Бельский Александр Олегович**
Аспирант кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ОмГУПС.
Тел.: 8-923-677-19-47.
E-mail: mail-n@bk.ru

*В статье проведен анализ двух наиболее распространенных программных комплексов – ANSYS и SolidWorks Simulation – для расчета методом конечных элементов конструкции боковой рамы, а также даны рекомендации возможном применении указанных комплексов в теоретических исследованиях.*

Ключевые слова: *подвижной состав, грузовой вагон, тележка, боковая рама, анализ, метод конечных элементов.*

## CHOICE OF THE PROGRAM COMPLEX FOR CALCULATION OF THE LATERAL FRAME OF THE CART

**Matjash Yury Ivanovich**
Omsk State University of Transport (OSTU).
35, Marx av. Omsk, 644046, Russia.
Dr. Sci. Tech., professor, head of the chair «Cars and carload economy».
Phone: 8-960-990-13-89.

**Belsky Alexander Olegovich**
The post-graduate student of chair «Cars and carload economy», OSTU.
Phone: 8-923-677-19-47.
E-mail: mail-n@bk.ru

*In article function of two most widespread program complexes for calculation of a design lateral frame by a method of final elements are analyzed and the recommendation whenever possible their applications in theoretical researches is given.*

Keywords: *rolling stock, the freight car, the cart, lateral frame, the analysis, method of final elements.*

УДК 629.4.015:625.1.03

## ПРОБЛЕМЫ УЧЕТА ПРОДОЛЬНОЙ НЕРАВНОУПРУГОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ В ДИНАМИКЕ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

**Сабиров Руслан Дльмирович**
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Аспирант кафедры «Теоретическая механика».
Тел.: 8-960-987-09-12, (3812) 53-50-26.
E-mail: ruslan.sabirov@mail.ru

*В статье предлагается обзор основных работ, посвященных изучению способов учета продольной неравноупругости железнодорожного пути в динамике подвижного состава. Приведен критический анализ развития математического аппарата, описывающего движение подвижного состава по неравноупругому пути вдоль рельса. Сделан вывод, на основе которого предлагается дальнейшая проработка вопроса взаимодействия подвижного состава с неравноупругим путем.*

Ключевые слова: *неравноупругость пути, масса, жесткость, экипаж, дифференциальное уравнение, скорость, длина, траектория, расчетная схема.*

## PROBLEMS OF THE ACCOUNT IRREGULAR RESILIENCE WAY TO DYNAMICS OF A ROLLING STOCK

**Sabirov Ruslan Dlmirovich**
Omsk State University of Transport (OSUT).
35, Marx av. Omsk, 644046, Russia.
The post-graduate student of the chair «Theoretical mechanics».
Phone: 8-960-987-09-12, (3812) 53-50-26.
E-mail: ruslan.sabirov@mail.ru

*The article provides an overview of major works devoted to the study of ways of the irregular resilience way track in the dynamics of the rolling stock. Presented a critical analysis of the mathematical apparatus describing the movement of rolling stock on irregular resilience the rail. Concluded on the basis of which it is proposed the further development of rolling stock interaction with irregular resilience way.*

Keywords: *irregular resilience ways, the mass, stiffness, crew, differential equation, speed, length, trajectory design scheme.*

УДК 629.4

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МАЛЫХ МАСС СИСТЕМЫ «КОЛЕСО – РЕЛЬС» НА СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЕ ДИНАМИКИ

**Смалев Александр Николаевич**
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Преподаватель кафедры «Теоретическая механика».
Тел.: (960) 994-81-39.
E-mail: SmalevAN@yandex.ru

*В статье проведено исследование динамики необрессоренных масс железнодорожного экипажа с применением статистических методов. Выявлена зависимость частотных свойств рассматриваемой системы от малых масс некоторых ее элементов. Сделан вывод о незначительном влиянии масс этих элементов на статистические характеристики колебательных процессов в системе.*

Ключевые слова: *вертикальная динамика, необрессоренная масса, передаточная функция, частотная характеристика, спектральная плотность, среднеквадратическое отклонение.*

## ESTIMATION OF INFLUENCE OF THE SMALL MASSES IN WHEEL – RAIL INTERACTION SYSTEM ON STATISTICAL CHARACTERICTICS OF ITS DYNAMICS

**Smalev Alexandr Nikolaevich**
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
The teacher of chair «Theoretical mechanics».
Phone: (960) 994-81-39.
E-mail: SmalevAN@yandex.ru

*In article the dynamics of the unsprung masses of a locomotive underframe is studied using statistical methods. A dependence of frequency properties of the system on small masses of its some elements is detected. A conclusion is drawn about the insignificant influence of these masses on the statistical characteristics of vibration processes in the system.*

Keywords: *vertical dynamics, unsprung mass, transfer function, frequency characteristic, spectral density, standard deviation.*

УДК 621.332

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКЕ НА ОСНОВЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ

**Смердин Александр Николаевич**
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта».
Тел.: 8-904-588-40-48.
E-mail: smerdinan@omgups.ru

**Голубков Антон Сергеевич**
Кандидат технических наук, преподаватель кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.
Тел.: 8-904-326-61-80.
E-mail: golubkovas@omgups.ru

**Жданов Вячеслав Александрович**
Аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.
Тел.: 8-908-108-30-33.
E-mail: jdanovva@omgups.ru

*В статье рассмотрены перспективные методы расчета взаимодействия контактных подвесок и токоприемников на основе конечно-элементных моделей, предназначенных для исследования волновых процессов при токосъеме.*

Ключевые слова: *контактная сеть, волновые процессы, моделирование, конечно-элементный метод, токоприемник, контактный токосъем.*

## IMPROVED METHODS OF STUDY OF WAVE PROCESSES IN CATENARY BASED ON FINITE ELEMENT MODEL

**Smerdin Alexandr Nikolaevich**
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Cand.Tech. Sci, the senior lecturer of chair «Power supply of Railroad Transport».
Phone: 8-904-588-40-48.
E-mail: smerdinan@omgups.ru

**Golubkov Anton Sergeevich**
Cand.Tech. Sci., teacher of chair «Power supply of Railroad Transport», OSTU.
Phone: 8-904-326-61-80.
E-mail: golubkovas@omgups.ru

**Jdanov Vyacheslav Alexandrovich**
The post-graduate student of chair «Power supply of Railroad Transport», OSTU.
Phone: 8-908-108-30-33.
E-mail: jdanovva@omgups.ru

*In article reviewed future directions of interaction models wires suspensions and current overhead collectors, based on finite element model, designed to study wave processes in current collection process.*

Keywords: *catenary, wave processes, modeling, finite element method, current collector, contact current collection.*

УДК 621.336.7

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОКОВОЙ НАГРУЗКИ НА ИЗНОС КОНТАКТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТОКОПРИЕМНИКА ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

**Ступаков Сергей Анатольевич**
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная математика и механика».
Тел.: (3812) 31-34-46.
E-mail: stupakov1@yandex.ru

**Филиппов Виктор Михайлович**
Аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-46.
E-mail: fvm-omgups@mail.ru

*В статье представлены результаты экспериментальных исследований износа контактных вставок для токоприемников высокоскоростного электроподвижного транспорта.*

Ключевые слова: *высокоскоростной транспорт, устройства токосъема, контактные вставки, износ, плотность тока, переменный ток, постоянный ток.*

## RESEARCH OF INFLUENCE OF CURRENT LOAD ON DETERIORATION OF CONTACT ELEMENTS OF THE CURRENT COLLECTOR OF THE ELECTROROLLING STOCK

**Stupakov Sergey Anatolyevich**
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Cand.Tech. Sci, the senior lecturer of chair «Applied Mathematics and Mechanics».
Phone: (3812) 31-34-46.
E-mail: stupakov1@yandex.ru

**Philippov Victor Mikhailovich**
The post-graduate student of chair «Railway transportation Electrical supply», OSTU.
Phone: (3812) 31-34-46.
E-mail: fvm-omgups@mail.ru

*In the article are presented the results of experimental researches of the wear of contact elements of pantograph of electric railway.*

Keywords: *high-speed transport, current collector units, collector strips, wear, current density, alternating current, direct current.*

УДК 621.331:621.311

## СНИЖЕНИЕ КОММЕРЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ТЯГУ ПОЕЗДОВ НА ПОЛИГОНЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Хряков Александр Анатольевич**
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Аспирант, ведущий инженер отдела «Нанотехнологии».
Тел.: (3812) 77-80-28.
E-mail: alexomskhrv@mail.ru

**Никифоров Михаил Михайлович**
Кандидат технических наук, начальник научно-производственной лаборатории «Энергосберегающие технологии и электромагнитная совместимость», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 44-39-23.
E-mail: nikiforovmm@rambler.ru

*В статье рассмотрена структура потерь электрической энергии на тягу поездов, представлен новый цифровой электронный счетчик электроэнергии постоянного тока, дана оценка технико-экономической эффективности его внедрения на электроподвижном составе и фидерах контактной сети тяговых подстанций.*

Ключевые слова: *тяговые подстанции постоянного тока, электроподвижной состав, учет электрической энергии на тягу поездов, коммерческие потери, цифровой электронный счетчик электрической энергии, рациональность использования электрической энергии.*

## DECREASE IN THE COMMERCIAL COMPONENT OF LOSSES OF ELECTRIC ENERGY ON DRAUGHT OF TRAINS ON DIRECT CURRENT RANGE

**Khryakov Alexandre Anatolyevich,**
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Graduate, leading engineer «Nanotechnology» department.
Phone: (3812) 77-80-28.
E-mail: alexomskhrv@mail.ru

**Nikiforov Michael Mihajlovich**
Cand.Tech.Sci., the chief of research-and-production laboratory «Power-saving up technologies and electromagnetic compatibility», OSTU.
Phone: (3812) 44-39-23.
E-mail: nikiforovmm@rambler.ru

*In article the structure of losses of electric energy on draft of trains is considered, the new digital electronic counter of the electric power of a direct current is presented, the estimation of technical and economic efficiency of its introduction on electromobile with-stave and feeders of a contact network of traction substations is given.*

Keywords: *traction substations of a direct current, electrorolling stock, the account of electric energy on draft of trains, commercial losses, the digital electronic counter of electric energy, rationality of use of electric energy.*

УДК 621.311:621.331

## УПРАВЛЕНИЕ УСТРОЙСТВАМИ ПОПЕРЕЧНОЙ ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ С ЗАВИСИМОЙ ВЫДЕРЖКОЙ ВРЕМЕНИ

**Бренков Сергей Николаевич**
Дорожная электротехническая лаборатория Западно-Сибирской железной дороги (ДЭЛ ЗСЖД).
644020, г. Омск, ул. Леконта, 20.
Старший электромеханик.
Тел.: (3812) 44-27-61.
E-mail: Brenkov_sergei@mail.ru

*В статье приведен основной принцип расчета выдержки времени на включение и отключение устройства компенсации реактивной мощности при автоматическом регулировании его работы. Выдержка времени является зависимой от потребляемой тяговой нагрузки активной и реактивной мощности.*

Ключевые слова: *активная и реактивная мощность, устройство поперечной емкостной компенсации, выдержка времени.*

## MANAGEMENT OF DEVICES OF THE CROSS-SECTION CAPACITOR INDEMNIFICATIONS OF THE ELECTRIFIED RAILWAYS WITH DEPENDENT ENDURANCE OF TIME

**Brenkov Sergei Nicolaevich**
Electrotechnical laboratory or Western Siberian railway.
20, Lekonta st., Omsk, 644020, Russia.
Engineer.
Phone: (3812) 44-27-61.
E-mail: Brenkov_sergei@mail.ru

*In article main principle of the calculation of the delay time is adduction in article for cut-in and unhooking device of compensation to reactive power when his work has automatically regulate. The delay time is dependent from consumed active and reactive power by traction load.*

Keywords: *active and reactive power, the device of lateral capacitive compensation, delay time.*

УДК 621.331:621.311.4:621.317.3

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОЦЕНКЕ ПОТЕНЦИАЛА ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЯГИ ПОЕЗДОВ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ

**Вильгельм Александр Сергеевич**
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Инженер научно-производственной лаборатории «Энергосберегающие технологии и электромагнитная совместимость».
Тел.: 8-913-640-16-96.
E-mail: saint776@yandex.ru

**Ларин Андрей Николаевич**
Кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-производственной лаборатории «Энергосберегающие технологии и электромагнитная совместимость», ОмГУПС.
Тел.: 8-908-310-78-60.
E-mail: larinan75@mail.ru

*В данной статье рассматриваются экспериментальные исследования, направленные на оценку потенциала повышения энергоэффективности тяги поездов за счет применения рекуперативного торможения. В первую очередь рекуперативное торможение является средством обеспечения безопасности движения поездов, однако его применение для снижения скорости движения поезда также является дополнительным резервом экономии электроэнергии. Эти факторы обусловливают необходимость поддержания в исправном состоянии систем рекуперативного торможения на электроподвижном составе и инверторов тяговых подстанций постоянного тока, необходимых для преобразования постоянного тока в переменный и обеспечения возврата электроэнергии в энергосистему.*

Ключевые слова: *рекуперативное торможение, тяговая подстанция, локомотив, перевозочный процесс, энергетическая эффективность, качество электрической энергии.*

## EXPERIMENTAL RESEARCHES ACCORDING TO POTENTIAL OF INCREASE OF POWER EFFICIENCY OF DRAUGHT OF TRAINS AT THE EXPENSE OF APPLICATION OF RECUPERATIVE BRAKING

**Vilgelm Alexander Sergeevich**
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
The engineer of research-and-production laboratory «Power saving up technologies and electromagnetic compatibility».
Phone: 8-913-640-16-96.
E-mail: saint776@yandex.ru

**Larin Andrey Nikolaevich**
Cand.Tech.Sci., the senior research assistant of research-and-production laboratory «Power saving up technologies and electromagnetic compatibility», OSTU.
Phone: 8-908-310-78-60.
E-mail: larinan75@mail.ru

*In article the experimental researches directed on an estimation of potential of increase of power efficiency of draft of trains at the expense of application re-kuperativnogo of braking are considered. First of all recuperative braking is environments-stvom of safety of movement of trains, however its application for decrease in speed of movement of a train also is an additional reserve of economy of electro-energy. These factors cause necessity of maintenance in good repair systems of recuperative braking on an electrorolling stock and inverters tjago-vyh the substations of a direct current necessary for transformation of a direct current in variable and maintenance of return of the electric power in a power supply system.*

Keywords: *recuperative braking, traction substation, the locomotive, transportation process, power efficiency, quality of electric energy.*

УДК 629.423.1

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗВРАТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В КОНТАКТНУЮ СЕТЬ ПРИ РЕКУПЕРАТИВНОМ ТОРМОЖЕНИИ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МАРШРУТОВ МАШИНИСТОВ

**Давыдов Алексей Игоревич**
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Аспирант кафедры «Прикладная математика и механика».
Тел.: 8-906-990-93-84.
E-mail: DavydovAI@bk.ru

*Статья посвящена описанию методики анализа эффективности возврата электроэнергии в контактную сеть при рекуперативном торможении на электровозах переменного и постоянного тока по данным маршрутов машинистов.*

Ключевые слова: *маршрут машиниста, рекуперативное торможение, тяга поездов, энергоэффективность.*

## ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF THE RETURN OF ELECTRICITY IN THE CONTACT NETWORK WITH REGENERATIVE BRAKING OF ELECTRIC ROLLING STOCK ON THE BASIS OF ROUTE DRIVERS

**Davydov Alexey Igorevich**
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Postgraduate student of the chair «Applied Mathematics and Mechanics».
Phone: 8-906-990-93-84.
E-mail: DavydovAI@bk.ru

*The article is devoted to analyzing the effectiveness of the method of returning power to the contact network with regenerative braking on electric AC and DC according to the route drivers.*

Keywords: *route driver, regenerative braking, traction trains, energy efficiency.*

УДК 621.331:621.311.004.18

## ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА НЕТЯГОВЫЕ НУЖДЫ СТРУКТУРНЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

**Комяков Александр Анатольевич**
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника».
Тел.: (3812) 44-39-23.
E-mail: tskom@mail.ru

**Пономарев Антон Витальевич**
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 44-39-23.
E-mail: antony-mps@mail.ru

**Комякова Ольга Анатольевна**
Аспирантка кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 23-81-82.
E-mail: okomyakova@mail.ru

*В статье рассмотрена возможность применения современного математического аппарата искусственных нейронных сетей для планирования расхода электрической энергии нетяговых железнодорожных потребителей различной хозяйственной принадлежности с учетом влияния внешних факторов.*

Ключевые слова: *автоматизированная система коммерческого учета электроэнергии, планирование, искусственная нейронная сеть, энергосбережение.*

## APPLICATION OF NEURAL NETWORKS FOR PLANNING OF THE ELECTRIC POWER CONSUMPTION ON NOT TRACTION NEEDS OF RAILWAYS's STRUCTURAL DIVISIONS

**Komiakov Alexandr Anatolievich**
Omsk State Transport University (OSTU)
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of chair «Theoretical the electrical engineer».
Phone: (3812) 44-39-23.
E-mail: tskom@mail.ru

**Ponomaryov Anton Vitalevich**
Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of chair «Theoretical the electrical engineer», OSTU.
Phone: (3812) 44-39-23.
E-mail: antony-mps@mail.ru

**Komiakova Olga Anatolievna**
The post-graduate student of chair «Theoretical the electrical engineer», OSTU.
Phone: (3812) 23-81-82.
E-mail: okomyakova@mail.ru

*In article possibility of application of modern mathematical apparatus of iskusstven the neural networks for planning of the expense of electric energy not traction railway potre-bitelej a various economic accessory taking into account influence of external factors is considered.*

Keywords: *automated systems of the commercial account of the electric power, planning, neural network, energy saving.*

УДК 621.332.31:625.1:642.078.5

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИНЫ ЗАЛОЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОПОР АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

**Ли Валерий Николаевич**
Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).
680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение транспорта».
Тел.: (4212) 35-95-06.
E-mail: nknich@festu.khv.ru

**Сапов Александр Сергеевич**
Преподаватель кафедры «Электроснабжение транспорта», ДВГУПС.
Тел.: (4212) 64-71-77.
E-mail: Sapovas@mail.ru

*В статье рассматриваются основные факторы, влияющие на устойчивость опор контактной сети. Особое внимание уделяется проектно-строительным издержкам: низкому качеству строительных работ, отсутствию методики проверки и контроля. Для повышения контроля качества выполнения строительных работ предлагается воспользоваться методикой, базирующейся на возбуждении акустических волн ударным методом.*

Ключевые слова: *контактная сеть, устойчивость опор, основные факторы, виброакустический метод, макетный образец устройства.*

## DETERMINATION OF THE DEPTH OF LAYING REINFORCED CONCRETE SUPPORT BY ACOUSTIC METHOD

**Li Valery Nikolaevich**
Far East state university of means of communication (DVGUPS).
680021, Khabarovsk, Serysheva, 47.
Dr.Sci. Tech., professor of the chair «Power system».
Phone: (4212) 35-95-06.
E-mail: nknich@festu.khv.ru

**Sapov Alexander Sergeevich**
The teacher of chair «Power system», DVGUPS.
Phone: (4212) 64-71-77.
E-mail: Sapovas@mail.ru

*Te article deals with the major factors influencing the stability of overhead contact system supports. Special attention is paid to design and construction costs: poor quality of construction works, absence of inspection and control techniques. It is suggested that the technique based on the excitation of acoustic waves by percussion method, will improve the quality control of construction works.*

Keywords: *contact network, stability of support, major factors, vibro - an acoustic method, the model sample of the device.*

УДК 669. 662. 76

## К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

**Парамонов Александр Михайлович**
Омский государственный университет путей сообщения, ОмГУПС.
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика».
Тел.: (3812)31-06-23.
E-mail: amparamonov@mail.ru

**Кушнаренко Антон Вячеславович**
Аспирант кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.
Тел: (3812)31-06-23.
E-mail: kushnarenko_av@mail.ru

**Гусаров Артем Сергеевич**
Инженер кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.
Тел.:(3812)31-06-23.

*В статье рассматриваются пути повышения тепловой эффективности и экономичности нагрева металла. Предложены методика и алгоритм технико-экономической оптимизации*

*параметров теплового режима и конструкции печных агрегатов. Обоснована целесообразность применения разработанного алгоритма для определения оптимальных значений температуры уходящих газов на выходе из рабочего пространства нагревательной печи и температуры подогрева воздуха в рекуператоре, идущего на горение топлива, при проектировании и эксплуатации печных агрегатов. Использование данных разработок позволяет повысить тепловую эффективность и экономичность работы нагревательных печей.*

Ключевые слова: *нагревательная печь, металл, удельный расход топлива, эффективность, оптимизация, рекуперация.*

## TO THE QUESTION OF INCREASE OF OVERALL PERFORMANCE HEATING FURNACES

**Paramonov Alexander Mihajlovich**
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr.Sci. Tech., professor of the chair «Power system».
Phone: (3812)31-06-23.
E-mail: amparamonov@mail.ru

**Kushnarenko Anton Vjachesavovich**
The post-graduate student of chair «Power system», OSTU.
Phone: (3812)31-06-23.
E-mail: kushnarenko_av@mail.ru

**Hussars of Artem Sergeevich**
The engineer of chair «Power system», OSTU.
Phone: (3812)31-06-23.

*Ways of increase of thermal efficiency and profitability nagre-va metal are considered. The technique and algorithm of technical and economic optimization of para-meters of a thermal mode and a design of oven units is offered. The expediency of application of the developed algorithm for definition of optimum values temperatu-ry leaving gases on an exit from working space of the heating furnace of temperature of heating of air in a recuperator, fuel going on burning is proved, at designing and ekspluatatsii oven units. Use of the given workings out allows to raise tep-lovuju efficiency and profitability of their work.*

Keywords: *the heating furnace, metal, specific fuel consumption, efficiency, optimization, rekuperacia.*

УДК 656.25: 519.171

## КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

**Соколов Максим Михайлович**
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Преподаватель кафедры «Автоматика и телемеханика».
Тел.: 8-904-587-98-17.
E-mail: SokolovMM@omgups.ru

*В статье рассматриваются вопросы контроля качества электрической энергии, питающей устройства автоматики железных дорог. Предложена методика оценки качества электрической энергии с использованием математического аппарата векторной алгебры и теории графов.*

Ключевые слова: *качество электрической энергии, устройства автоматики, граф.*

**THE CONTROL OF ELECTRIC ENERGY QUALITY IN POWER SUPPLY SYSTEM FOR DEVICES AUTOMATICs OF RAILWAYS**

**Sokolov Maxim Michalovich**
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Teacher of chair «Automatics and telemechanics».
Phone: 8-904-587-98-17.
E-mail: SokolovMM@omgups.ru

*The article deals with the quality control of electric energy supply device automation of railways questions. The assessing method the quality of electrical energy using mathematical tools of vector algebra and graph theory is proposed.*

Keywords: *electric energy quality, devices of automatics , earl.*

УДК 004.772

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМ БЕСПРОВОДНОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО ДОСТУПА ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ВИДЕОДАННЫХ**

**Квиткова Елена Борисовна**
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Аспирант кафедры «Системы передачи информации».
Тел.: 8-908-809-94-50.
E-mail: e-kvitka@mail.ru

**Маркова Елена Игоревна**
Аспирант кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.
Тел.: 8-904-325-82-08.
E-mail: MarkovaElena88@yandex.ru

*Современные алгоритмы видеокодирования отличаются производительностью источника. Следовательно, основная задача состоит в поиске компромисса между производительностью источника и пропускной способностью канала. В статье предлагается использовать системы беспроводного широкополосного доступа для передачи видеоданных.*

Ключевые слова: *пропускная способность канала, производительность источника, WiMAX, кодек, модуляция.*

## USE OF WIRELESS BROADBAND SYSTEMS OF ACCESS FOR DATA TRANSMISSION VIDEO

**Kvitkova Elena Borisovna**
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
The post-graduate student of chair «Information transfer systems».
Phone: 8-908-809-94-50.
E-mail: e-kvitka@mail.ru

**Markova Elena Igorevna**
The post-graduate student of chair «Automatics and control systems», OSTU
Phone: 8-904-325-82-08.
E-mail: MarkovaElena88@yandex.ru

*Modern algorithms of video coding have different productivity of the source. Hence, the basic goal consists in compromise search between productivity of the source and throughput of the channel. In article is offered to use wireless broadband access systems for transfer of the video data.*

Keywords: *throughput of the channel, productivity of the source, WiMAX, codec, modulation.*

УДК 621.3+519.24

## АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Любченко Александр Александрович**
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Аспирант кафедры «Радиотехнические и управляющие системы».
Тел.: (3812) 37-68-33.
E-mail: lyubchenko@mail.ru

*В статье представлен подход к анализу процессов функционирования и технического обслуживания (ТО) восстанавливаемых элементов сложных технических систем средствами имитационного моделирования для определения зависимости комплексных показателей надежности от периодичности проведения ТО. Анализ основывается на имитации вложенной цепи Маркова, описывающей рассматриваемый процесс, с помощью метода Монте-Карло и последующей обработки данных методами математической статистики.*

Ключевые слова: *техническое обслуживание, восстанавливаемый объект, граф состояний, внезапный отказ, постепенный отказ, комплексные показатели надежности, имитационное моделирование.*

## PREVENTIVE MAINTETNANCE PROCESSES ANALYSIS OF COMPLICATED TECHNICAL SYSTEMS ELEMENTS

**Lyubchenko Alexander Alexandrovich**
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
The post-graduate student of chair «Radio and control systems».

Phone: (3812) 37-68-33.
E-mail: lyubchenko@mail.ru

*In the article the simulation method for operation and preventive maintenance process analysis of recoverable complicated technical systems elements is presented, which is devoted to determination of integrated reliability measures dependence upon periodicity of preventive maintenance. The algorithm is based on simulation of embedded Markov chain describing the process by means of Monte Carlo method with further data processing using methods of mathematical statistics.*

Keywords: *preventive maintenance, recoverable element, state graph, sudden failure, Gradual failure, integrated reliability measures, simulation.*

УДК 004.75

## ПРИМЕНЕНИЕ IP-СЕРВИСОВ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ КОНТРОЛЯ И УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И МОЩНОСТИ (АСКУЭ)

**Малютин Андрей Геннадьевич**
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и системы управления».
Тел.: (3812) 31-05-89, 8-960-990-1651.
E-mail: malyutinag@inbox.ru

**Коробова Кристина Вячеславовна**
Аспирант кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.
Тел.: 8-905-096-1953.
E-mail: kristyle@yandex.ru

*В статье проводится обзор стека протоколов TCP/IP и стандартов Международной электротехнической комиссии (МЭК), используемых в энергосберегающих системах на верхних уровнях АСКУЭ, и задачи повышения эффективности функционирования программно-аппаратного комплекса АСКУЭ, реализующего IP-сервисы. Актуальная в настоящее время проблема оптимизации IP-сервисов для нужд АСКУЭ объясняется тем, что уровни первичных измерительных приборов и устройств сбора и передачи данных чаще ограничиваются рассмотрением технологий физического и канального уровней, а вопросы реализации стека и предоставляемых им сервисов не проработаны. Выявление необходимых для оптимальной работы системы сетевых, транспортных протоколов, а также стандартов прикладного уровня приведет в дальнейшем к повышению уровня системности и информационной обеспеченности АСКУЭ.*

Ключевые слова: *АСКУЭ, стек протоколов TCP/IP, DNS, DHSP, VPN, NTP, стандарт МЭК 61850, энергосберегающие системы.*

## APPLICATION OF IP-BASED SERVICES IN THE SYSTEM OF AUTOMATIC METER READING (AMR SYSTEM)

**Malyutin Andrey Gennadevich**
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Cand. Tech. Sci.,the senior lecturer of chair «Automatics and control systems».

Phone: (3812) 31-05-89, 8-960-990-1651
E-mail: malyutinag@inbox.ru

**Korobova Kristina**
The post-graduate student of chair «Automatics and control systems», OSTU.
Phone: 8-905-096-1953.
E-mail: kristyle@yandex.ru

*In article the review of a stack of reports TCP/IP and standards of the International electrotechnical commission (IEC), used in power saving up systems at top levels AMR, and problems of increase of efficiency of functioning of programs-but-hardware of complex AMR realizing IP-services is spent. Actual in the present vre-mja the problem of optimization of IP-services for needs AMR speaks that levels pervichnyh measuring devices and gathering and data transmission devices are more often limited – to consideration of technologies of physical and channel levels, and questions of realization of services ste ow and given to it aren't worked. Revealing necessary for optimal th work of system of network, transport reports, and also standards will result a level butt th further in level increase системности and information security AMR.*

Keywords*: AMR, the protocol stack TCP/IP, DNS, DHSP, VPN, NTP, IEC 61850, energy-saving systems.*

УДК 621.331:621.311.4:621.3

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОТКЛОНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИГНАЛЬНОЙ ТОЧКИ

**Сидоров Олег Алексеевич**
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение железнодорожного транспорта».
Тел.: (3812) 31-34-46.

**Карабанов Максим Александрович**
Дорожная электротехническая лаборатория Западно-Сибирской железной дороги (ДЭЛ ЗСЖД).
644020, г. Омск, ул. Леконта, 20.
Электромеханик.
Тел.: (3812) 44-27-61.
E-mail: zmax04@mail.ru

*В статье рассмотрена схема питания сигнальной точки, для которой были исследованы в разных режимах работы наиболее важные функциональные узлы (рельсовые цепи, аппаратура преобразования информации и светофор), которые являются типовыми как для перегонных устройств, так и для станционных. Установлено, что отклонение напряжения питания этих устройств может привести к значительным негативным последствиям, существенно нарушающим условия безопасности движения поездов.*

Ключевые слова: *отклонение напряжения, сигнальная точка, рельсовая цепь, светофор, трансформатор, аппаратура преобразования информации, безопасность движения поездов.*

## IMPACT ANALYSIS OF VOLTAGE FLUCTUATION ON RELIABILITY WORKING OF SIGNAL DEVICE

**Sidorov Oleg Alekseevich**
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr.Sci.Tech., professor, head of chair «Railway Power Supply».
Phone: (3812) 31-34-46.

**Karabanov Maxim Alexandrovich**
Electrotechnical laboratory of Western Siberian railway.
20, Lekonta st., Omsk, 644020, Russia.
Electrician.
Phone: (3812) 44-27-61.
E-mail: zmax04@mail.ru

*The authors researched the circuitry of electrification signal device, the best important functional elements (railway network, information conversion equipment, traffic lights) that it work to deferent mode of operation. These elements are main element for interoffice signaling and station signal device. The voltage fluctuation on signal device is cause of negative event that make safety of railway traffic worse.*

Keywords: *voltage fluctuation, signal device, railway network, traffic lights, transformer, information conversion equipment, safety of railway traffic.*

**Уважаемые коллеги!**

Редакция научно-технического журнала «Известия Транссиба» приглашает Вас публиковать результаты научных исследований по тематическим направлениям журнала:

– подвижной состав железных дорог;
– транспортная энергетика;
– информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации;
– путь и искусственные сооружения;
– управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов;
– организация производства на транспорте.

Материалы просим высылать ответственному секретарю редакционной коллегии журнала Комяковой Ольге Олеговне по электронной почте: izvestia_transsiba@mail.ru

**Правила представления рукописей научных статей в научно-технический журнал «Известия Транссиба»**

**В редакцию предоставляются:**

текст статьи на белой бумаге формата А4 в 2 экз., а также в электронном виде (на любом носителе или по e-mail), имя файла определяется по фамилии первого автора: фамилия.doc;

название статьи, аннотация, ключевые слова, название тематического раздела журнала, в который представляется статья (в отдельном файле – на русском и английском языках);

сведения об авторах в отдельном файле на русском и английском языках (фамилия, имя, отчество, ученая степень и звание, место работы с указанием почтового адреса, должность, контактные телефоны, e-mail для обратной связи);

один экземпляр текста статьи должен быть подписан всеми авторами.

**Требования к рукописи статьи:**

рукопись статьи должна содержать УДК (в левом верхнем углу, обычный, 12 пт), инициалы и фамилию (по центру, 11 пт), название статьи (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт);

текст статьи должен быть набран в редакторе Word, размер страницы: формат А4 (210 × 297 мм);

размер полей: 20 мм (все четыре поля), размер и тип шрифта основного текста: Times New Roman, 12 пт;

размеры символов в формулах (Equation): обычный – 12 пт, крупный индекс – 7, мелкий – 5, крупный символ – 15, мелкий – 12 пт;

буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавита, математические символы такие, например, как cos, sin, max, min, – прямым шрифтом;

текст в таблицах, подрисуночные подписи и названия таблиц набираются шрифтом Times New Roman, 10 пт;

межстрочный интервал одинарный, абзацный отступ – 0,75 см;

каждый рисунок дополнительно должен быть представлен в оригинальном файле (формат JPEG или TIFF, разрешение – не ниже 300 пикс/дюйм);

рисунки, выполненные в редакторе Word, должны быть вставлены как объект;

ссылки на литературу в тексте статьи указываются в квадратных скобках, список литературы имеет заголовок *Список литературы* (не более 10 наименований), библиографическое описание источников оформляется по требованиям ГОСТ 7.1-2003.

Рукописи статей, опубликованных ранее или переданных в другие издания, не принимаются.

Число соавторов не должно превышать трех человек. Рекомендуемый объем статьи – не менее пяти и не более 10 страниц. В ином случае вопрос по объему статьи необходимо согласовать с редакцией журнала. Иллюстрации, схемы, таблицы, включаемые в текст статьи, учитываются в общем объеме текста.

Авторы должны избегать повторения одних и тех же данных в таблицах, на графиках и в тексте статьи.

В случае представления двух или более статей одновременно необходимо указывать желательную очередность их публикации.

В случае возвращения статьи автору для устранения замечаний или для ее сокращения датой представления считается день получения редакцией журнала окончательного текста.

Принятые к публикации рукописи статей не возвращаются авторам.

Материалы, оформленные не в соответствии с указанными выше требованиями, не принимаются к публикации и не возвращаются.

По всем вопросам, связанным с подготовкой, представлением и публикацией материалов, необходимо обращаться в редакцию.

Редколлегия оставляет за собой право литературной редакции содержания статьи без согласования с авторами.

*Научное издание*

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Авилов Валерий Дмитриевич – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Бородин Анатолий Васильевич – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Ведрученко Виктор Родионович – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Горюнов Владимир Николаевич – д.т.н., ОмГТУ (Омск);
Гончар Игорь Иванович – д.ф.-м.н., ОмГУПС (Омск);
Демин Юрий Васильевич – д.т.н., НГАВТ (Новосибирск);
Ермоленко Дмитрий Владимирович – д.т.н., ВНИИЖТ (Москва);
Исмаилов Шафигула Калимуллович – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Кандаев Василий Андреевич – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Костюков Владимир Николаевич – д.т.н., НПЦ «Динамика» (Омск);
Кузнецов Андрей Альбертович– д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Лебедев Виталий Матвеевич – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Маслов Геннадий Петрович – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Медведев Владимир Ильич – д.т.н., СГУПС (Новосибирск);
Митрохин Валерий Евгеньевич – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Мочалин Сергей Михайлович – д.т.н., СибАДИ (Омск);
Нехаев Виктор Алексеевич – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Николаев Виктор Александрович – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Овчаренко Сергей Михайлович – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Парамонов Александр Михайлович – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Рауба Александр Александрович – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Сафронов Эдуард Алексеевич – д.т.н., СибАДИ (Омск);
Сидоров Олег Алексеевич – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Сидорова Елена Анатольевна – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Сковородников Евгений Иванович – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Харламов Виктор Васильевич – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Четвергов Виталий Алексеевич – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Шпалтаков Владимир Петрович – д.э.н., ОмГУПС (Омск).

Редактор – Майорова Н. А.
Компьютерная верстка – Михалева С. С.

Научно-технический журнал «Известия Транссиба» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 3 июня 2009 г. Свидетельство о регистрации – ПИ № ФС77-36469.

Номер ISSN – 2220-4245.
Подписной индекс в общероссийском каталоге «Роспечать» на второе полугодие 2011 г. – 66087.

Адрес редакции (издательства): 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35;
тел./факс: (3812) 31-05-54; e-mail: izvestia_transsiba@mail.ru

Подписано в печать 18.03.2011.
Тираж 500 экз.
Распространяется бесплатно.

